

原子力発電所の耐震設計—10 年のあゆみ

Aseismic Design of Nuclear Power Plants — Developments of These Ten Years

柴 田 碧*

Heki SHIBATA

原子力発電所の耐震設計に関する諸問題の展開を、本所における研究と関連させつつ述べた。

1. ま え が き

原子力発電所の耐震設計問題は、わが国で動力炉開発の方針が決められるや否や、ただちに最も重要な問題の一つとして、人々の話題に供せられるようになった。それから10年余が過ぎ、日本原子力発電(株)の東海発電所は竣工し、同社の敦賀発電所、関西電力(株)の美浜発電所、東京電力(株)の福島発電所など、いずれも建設たけなわであり、プラントとしての姿をみせつつある。

この間、本所では坪井、岡本、亘理の諸研究室と、着任後間もない著者がこの問題にたずさわることとなった。あとで詳しく述べるよう土木、建築の分野では高い水準にあった耐震設計も、プラント内の機器、配管の耐震については、まったく問題として取り上げられたこともなく、実施設計にあたっては、建築などで行なわれている方法を、対象が異なることを無視して取り入れているに過ぎなかった。

本学工学部の諸研究室、各電力会社、各メーカなどとともに、本所のいくつかの研究室はこの問題を推進して来、1967 年度には耐震機械構造学という新部門が増設されることまでとなった。

以下にしるすところは、本所が関係して来た原子力発電所の耐震設計の10年余の経過を年表風にまとめたものである。この大部分は原子力安全研究協会の軽水炉安全性現状調査ワーキング・グループが1967年10月にまとめた同題名の調査報告書中で、著者が執筆した第一章から協会およびワーキング・グループの許可を得て、抜粋したものである。なお一部の関西電力(株)関係については、関係の方からメモをいただきそう入した。その他の部分についても執筆後日本原子力発電(株)の秋野氏ほかの方々によって内容が検討された。

2. 原子力発電所の耐震設計についての現状

この問題は、原理的に一般の建築物、土木構造物のそれとまったく同じはずである。しかし実際の過程に入ると、かなり異なっているのが実状である。その理由は地震によって破壊された場合の災害期待値が、他の施設に比べ桁違いに大きいからである。この言い方はあいまいであるので言い換えると、災害期待値を一般の施設程度

に引き下げるには水準の高い耐震設計が必要であるということになる。水準の高い耐震設計とはなにかというと、一方では地震荷重を大きくとるということであり、他方では精密な解析を行ない未知の部分のできるかぎり少なくした設計を行なうということである。

これらはどちらにしても、現状では設計から建設にいたるいずれかの段階で経費の増加をもたらす。原子力発電所を地震に対し無防備に置いたときの災害期待値の大きさが、この経費の増加を認める理由になる。このようにして実際の設計過程では在来の構築物より、より水準の高い設計が行なわれるのである。これに似たことは大ダムの建設においてもみられる。

あとで詳しく述べるように、わが国で原子力発電所の耐震設計が検討されるようになった時期は、地震工学が電子計算機などエレクトロニクスの技術に助けられて飛躍的進歩を開始しようとした時期にほぼ一致する。そして原子力発電所について要求される高い水準の耐震設計を行なうための諸研究が、地震工学、耐震工学の発展にかなりの役割を果たしているといえよう。

わが国における地震工学は世界をリードしているとはいえ、最近のある時期には電子計算機の活用という面などでアメリカにおくれをとったこともある。現状でもアメリカだけでなくソ連などの研究の進展にはつねに注目していなければならない。それとともに耐震設計の方法にいくらかの差が生じつつある。元来未知のことが多い事がらに対する対策についてほど流派がでしやすい。地震の発生には未知なことも多い。それに加えわが国における地震と、大陸の一部で発生する地震とではかなり性格が異なる。したがってわが国とアメリカで耐震設計法に異なった点があってもやむを得ないとも考えられる。しかし現実にアメリカから動力炉を輸入する場合、このくい違いについて議論することは重要である。ただ単に解析法の差によるのか、根本にある地震の性質の差なのか……問題点はつきない。

以下、構築物系(建築・土木)の分野と機械系の分野にわけて原子力発電所の耐震についての研究の進展をしるしてみよう(なお各年度はその年の4月から翌年3月までをとっている)。

* 東京大学生産技術研究所第2部

3. 構築物系の耐震設計研究経過

1957 年

前年度の秋ごろから Hinton 卿の来日などで話題にのぼっていたコールド・ホール改良型といわれる天然ウラン黒鉛炉の導入計画は本格化し、年度初めには日本原子力研究所で原子力委員会地震対策小委員会の計画に従い耐震設計についての調査研究を開始し、本所からは岡本教授が参加した。ほとんど同じころいくつかの大学の研究室、建築研究所で調査から実験まで幅広い活動が開始された。本年秋、11 月 1 日には日本原子力発電(株)が発足し、翌月日本原子力発電(株)の地震対策委員会（これは前記の原子力委員会地震対策小委員会から引き継いで発足したものであって、本所からさらに亘理教授が加わった）は資料集¹⁾をとりまとめたが、この資料はこの時点の地震工学、耐震工学の最高レベルの論文を集めたものといえる。前年 1956 年にアメリカ・カリフォルニア州 Berkeley で世界地震工学会議が開催され、世界各国のこの分野の活動が報告された。そして International Association for Earthquake Engineering の発足となり、電子計算機・アナログ計算機などエレクトロニクスの飛躍的發展によって、地震工学の分野でもそれまで不可能だった面が急速に開拓され出したのであった。原子力発電所の耐震設計法も上記の会議の成果が発点となり加速のよい出発となった。

コールド・ホール改良型を耐震化するには数多くの問題点があった。そのうち、もっとも重要なものは、炉心の大部分を占める黒鉛減速材の支持方法をどのようにするかということであった。燃料要素を含めた炉心全体を一体化して支持することが望ましいとされ、黒鉛の構造体としての強度などについて検討された。また一体化された炉心を压力容器として建築物へ剛結合とするか、あるいは柔結合とするかも検討された²⁾。

入札のための耐震設計仕様書をどのようにするかは、いわゆる静的設計法によるか動的設計法によるかの問題も含め、地震、土木、建築の各界からの意見が持ち寄られ検討された。その結果 Housner の応答曲線による方法を取り入れるまでもなく、剛構造体として静的震度を定めればよいという結論に達した。静的震度の値は、あとになって導入される重要度分類の考え方に構造物の高さおよび固有減衰値を考えに入れて、発電所の部分ごとに異なった値が定められた。このとき炉心などの重要部分に対しては、建築基準法で定める震度の 3 倍をとることとなった。これはその後の原子力発電所安全基準第一次案や水型炉の仕様書にも大きな影響をおよぼすこととなる。

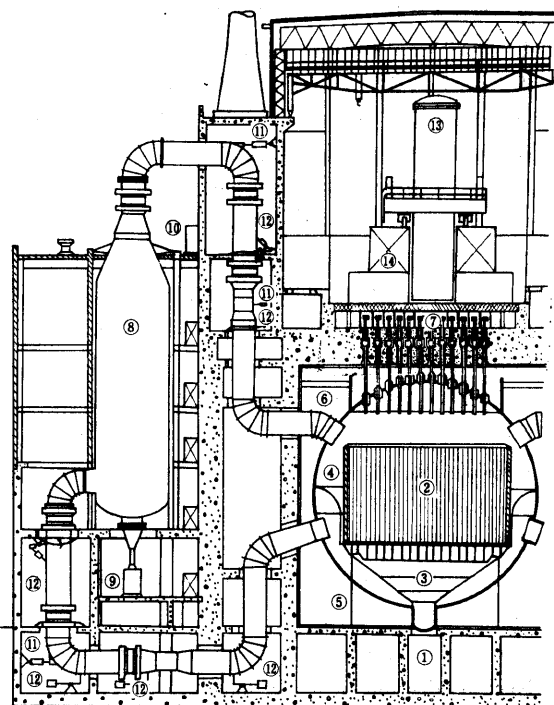
なお、この最終案をまとめるにあたっては原子炉調

査団地震班（班長武藤教授—当時東京大学工学部）がイギリスに派遣され、コールド・ホール型炉やイギリスの原子力開発研究の実状を調査した。

1958 年

前年度の入札仕様書に従った概略設計の図面と計算書が、イギリスの 3 グループより日本原子力発電(株)へ提出され検討が開始された。問題点は炉心構造と一次冷却系のガス・ダクトであった。ガス・ダクトについては機械の分野で述べる。炉心構造は黒鉛がその大きな割合を占めるにもかかわらず崩れやすく、地震荷重を外殻に伝える構造部材としてどのように使うべきかが論点であった。中性子線束を吸収する率の高い金属の構造部材は使わず、運転時と停止時の温度差による熱変形にもとづく内部応力を、一定限度以下に抑えることを条件とした構造の設計は非常な困難を伴った。さらに黒鉛は中性子照射線量に従い異方的に生長するといわれていた。当初はこれについての詳細なデータはまったくなく、原子炉の全寿命を通じての膨張量の見込みはきわめて不正確なものであった。そしてこの変形による内部応力をどのようにして考えるかが、上述の熱変形の問題にプラスされた。

熱変形が補正されるようになっているばねをたが状



- ① 原子炉支持体 ② 炉心 ③ ちり集め ④ 压力容器
⑤ 下部スカート ⑥ 耐震用上部スカート ⑦ スタンドパイプ ⑧ 熱交換器 ⑨ 循環機駆動機構 ⑩ 熱交換器耐震支持機構 ⑪ ダクト耐震支持機構 ⑫ ダクトつりあいおもり ⑬ チャージマシン ⑭ チャージマシンブリッジ

図 1 日本原子力発電(株)、東海発電所断面(文献 2)より
電気出力 166,000 kW・1967 年竣工、天然ウラン黒鉛
炉炭酸ガス冷却型

にはめる案や、異種金属の組み合わせによって伸縮するカゴによる案などが出た。これらについては各グループごとに討論され、他の分野の入札結果と合わせ、耐震設計全般にもすぐれていた後者が採用された。

建設省建築研究所の大型振動台が竣工し、これによる対辺間隔約 4 m 高さ約 0.8 m 2 層分の黒鉛を積んだ炉心模型についての実験が行なわれた。水平方向 0.8 G 垂直方向 0.4 G の正弦波を同時に加えられ満足する結果が得られた。このほか早稲田大学、東京大学、京都大学でも引き続き実験がなされた。

一方日本原子力研究所 JPDR の仕様書が本年秋から冬にかけて検討された。JPDR は動力炉としては出力も低く、したがって大きさの点からもほとんど耐震設計上問題となるであろうと予測される点はなかった。内容は東海発電所に対するものと似ていたが、設計震度の定め方は $3C_u$, $1\frac{1}{2}C_u$, C_u の 3 段階と制御系の一部に対しての $1\frac{1}{2} \times 3C_u$ に分けられ安全基準案の方式に近くなった。しかし重要度分類の考え方については明記されていない。ここでの耐震設計法の基調はもちろん静的設計である。

1959 年

本年に入り黒鉛減速材に対する照射効果が明らかになった。すなわち黒鉛は 400~500°C ではその方向にもよるが、照射線量が増すに従い、照射開始直後は膨張するが、あとになると単調に収縮し、かなりの量に達するとのことであった。このことにより、膨張を前提としたそれまでの計画は大幅に変更することが必要となった。夏から秋にかけ種々の案が検討された結果、六角柱を基本としてキイで連結してせん断で地震力を伝える方式をとることに決定した。これは圧縮力はまったく与えず周辺の膨張、収縮がそのまま内部へ伝達され、しかも地震力は変形なしに受け止められる構造で、幾何学的関係の実験から、振動試験まで行なわれたがいずれも好結果であり、たとえ一部の黒鉛柱が応力の伝達から脱落してもその機能は保たれることが明らかとなった。

一方ガス・ダクトに対するダンパの効果についての実験が建築物につり下げた実物大に近い模型で行なわれた。ダクト系の解析の詳細については機械系のところで述べる。

アメリカでは 1963 年に発行される *TID-7024, Nuclear Reactors and Earthquakes*³⁾ のための調査が、すでに Housner らによって進められていた。またかんたんなレビューも書かれており、このころから一部の人はかなりの関心を有し、思想的にはかなりまとまりつつあったことがわかる。一方日本原子力産業会議安全特別研究会の調査結果である“原子力発電所の安全対策⁴⁾”によると、中西部以東の 4 プラントでは

いずれも予想される地震は軽微であるとしてほとんど検討されていないと述べられている。

1960 年

前年度半から検討を開始していた通商産業省、原子力発電所安全基準専門委員会地震小委員会（委員長竹山謙三郎—当時建築研究所所長）での論議は活発となった。機械系については後述するように、どのようにして資料を収集するかにあったが、構築物関係では動的解析法をどのように取り入れるかが主眼であった。このためには震度をいくりに定めるかだけでなく、各地点の最大加速度振幅（あるいは速度振幅）をどのようにとるか、また振動性状をどのように規定するかなど検討された。また A, B, C の 3 クラスの重要度分類についても、前述の *TID* リポートの目次案でアメリカの意見が伝えられていたが、本年度夏東京で行なわれた第 2 回世界地震工学会議で発表された Housner の論文⁵⁾ の序論ではっきり述べられたので、わが国の立場から検討され、現在各仕様書で使われているものの原案が作製された。

東海発電所関係は炉心の実施設計のための材料試験などが実施された。工事はケーソン工事が進み、水平加力によるばね特性などの測定が行なわれた。このあとケーソン頂部などの常時微動計測も行なわれている。また 1957 年当時の地震計測に引き続き、1959 年夏より SMAC 強震計による観測が開始された。当初は原子力研究所構内に設置されていたが、その後東海発電所内 PR ホールなどにも設置された。一方ややおくれて、本問題に参加した本所坪井教授は本年初めまでに球形压力容器および、それに接続する構造物の壳体としての解析をほぼ終えた⁶⁾。これはその後壳体解析の理論の研究としてもまとめられた。

地震時の原子炉系緊急停止のため、スクラム回路に地震計をそう入することは JRR-1 をはじめ各種実験炉で行なわれていたが、これが作動して運転中の原子炉が停止した例はなかったようである。東海発電所の場合は、さらに強震の前駆振動を捕えてスクラムさせることも考えられ検討された。なお動力炉—原子力発電所—を地震時に停止した方がよいかどうかについて、アメリカの一部 (Pacific Gas & Electric 社など) ではわが国とは異なった考え方をしており Humboldt Bay 発電所には地震検知器を取り付けていないようである。実験炉については VBWR その他、地震地帯のものには取り付けられている。

1961 年

年度初めに原子力発電所安全基準第一次報告書⁷⁾ が出版された。地震小委員会で討論されたことは第 19 章耐震設計の本文および解説に盛り込まれた。火力発電技術基準や ASME のボイラ・コードのように具体

的な設計用数式や処理法まで記載するか否かについても論議がなされたが、設計法の選択の自由度を大きくするということで概念的に規定するといったものとなった。構築物、機械系ともに重要度分類によって、設計地震力を異なったレベルに設定する。基準地震力は建設地点の地震歴を調査して行なう。設計方針は静的設計を基本とするが、その重要度および振動特性によっては動的解析により検討もしくは設計を行なう、などの趣旨のものであった。これに対し計算例題など具体的方法が示されていないとの指摘があり、このあと約5年間この地震小委員会が継続調査にあたった。

この小委員会および東海発電所の設計の検討に際し問題となった点の一つに許容応力がある。東海発電所の球形圧力容器が地震荷重を受けるとき、その最大応力は球殻を支持しているスカートの付け根に発生するものと光弾性実験、理論解析などの結果は示している。そしてこの値は圧力容器の設計基準に示された許容応力よりは高く、一方その材料の降伏点よりは低い。また実物大の試験片による荷重試験の結果によれば通常の方法で求めた局所の応力値は、降伏現象が発生する荷重において、降伏点応力よりかなり高くなることを示した。これによる論点は二つある。一つは、内圧などを保持することをおもな目的とした部材と、自重などによる荷重を支持する部材とで許容応力の取り方をどのようにとるかである。とくに短期荷重と長期荷重の考え方、確定的な荷重と期待値でしか与えられぬ荷重との合応力の考え方など個々の問題としては解決しても、一般的考え方としてはまとまらぬままに過ぎている。他の一つは、応力計算の精度と許容応力の関連であるが、これはあとになって ASME のボイラ・コードの Section III などの影響もあり、かなり明確なものとなる。

東海発電所については炉心の立体的模型として6層のものがイギリスで完成し振動試験が行なわれたほか、黒鉛各層の荷重の分担率など実験的にも検討された。

北部カリフォルニアに建設中の Humboldt Bay 発電所は蒸気抑制型格納容器を使った沸騰水型発電所で地震地帯に設けられたものとしては最初のものである。火力発電所のボイラ部分と併列して置かれたこの原子炉は半地下式であり、原子炉建

屋の大部分は地下にある。耐震設計の方式は静的設計を行ない動的に検討するといったものであったが、地下部分の土圧および地下水圧に対する点に重きが置かれた。動的に問題となったのは天井クレーンのみであった。

1962 年

・アメリカでは Bodega Bay 発電所の土木工事が開始された。前年度初めごろ Housner より PG&E 社に出された報告によると、3段階の重要度分類を行ないその第1クラスについては Housner 応答線図（平均化したなめらかな曲線のもの）を使って動的設計を行なうが、その結果ほとんど費用を増すことなく建屋の耐震化は可能であるとしている。

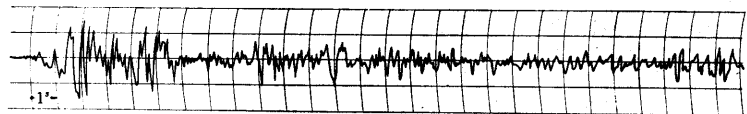
しかし、この計画の Bodega head は1906年のサンフランシスコ大地震の原因となった San Andreus 活断層からきわめて近く、かつまた予備掘削の結果その敷地内に岩盤のき裂もしくは断層が発見された。これによって本年度末から1963年度にかけ、隣接地域の反対運動からの訴訟事件ともなり、やがて断層部の処理法に良案が得られぬまま1964年度にいたり計画自体が断念されるにいたっている。

東海発電所の建設が進む一方、日本原子力発電(株)は、敦賀北方の立石地区に軽水炉を使用した第2発電所を計画し、その耐震設計方針の検討のための地震面からの立地調査に着手した。

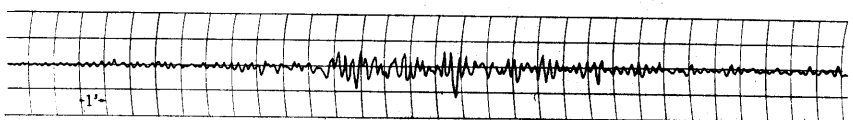
1963 年

日本原子力研究所はJPDRの竣工を待って、格納容器外部および基礎に加速度計そのほか若干の計器を取り付け常時観測を開始した。JPDRの建設は、アメリカ側もまた日本側も純技術面以外についても耐震設計の扱い方を勉強するのに役立った。

アメリカ・カリフォルニア南部の San Onofre 発電所の耐震設計は、一つの代表例ともなるべきもので地



a) El Centro 地震 1940 年 5 月 18 日 NS 動
(アメリカ・カリフォルニア州 El Centro)
正式名称は Imperial Valley Earthquake と呼ばれる。



b) 釧路地震 1962 年 4 月 23 日 NS 動
(北海道釧路測候所)

波形が単純であって最大加速度振幅が大きかった。しかし被害は皆無に近かった。

図 2 地震波形の例

震歴の調査からはじまる一連の過程が着実に実行されている。3 段階の重要度分類が第 1 に行なわれている。応答解析は平均的応答曲線が使われているが、ここで近距離地震と遠距離地震の二つを想定している。建設地点に、ある震度の地震動をもたらす地震をそのマグニチュードを横軸にとり、縦軸にひん度の期待値をとったグラフを作り解析した結果、同じ震度をもたらす地震の震源距離に 2 段階あると期待してよいことがわかったからである。この 2 種の地震について別個の応答曲線を使って動的設計を行なっている。

前にも触れた TID-7024, Nuclear Reactors and Earthquakes³⁾ がアメリカの AEC より出版された。これは Lockheed Aircraft 社への委託研究であったが、その調査は Housner らのグループによって行なわれた。内容は 8 章にわかれ、地震についての概説、地域と地震、各種原子炉と耐地震性、構造物の耐震設計、地震応答計算、液槽の振動、原子炉事故と地震の関連、防護系と述べている。そのほかこれらの理論的基礎となる論文を付録に再録している。日本とアメリカの地震の性質の差によるものや、研究過程の差によるものか、かなり考え方に差がある点がある。これが後述するような箇所で見られて来るのである。

1964 年

日本原子力産業会議の安全特別研究会ではハザード・レポートについての調査報告⁸⁾ をまとめた。耐震設計問題については、その現状を報告したのち、最強地震の想定法と実際の耐震解析法を未解決な問題点としてあげている。

前年度の計画を基礎に建築学会、原子炉耐震特別小委員会（主査竹山謙三郎）は、科学技術庁原子力平和利用研究委託費により、JPDR の隣接地域に若干のボーリングを行ない、地中地震計を埋設し地中から構築物へ伝ばしてゆく地震加速度波を自然地震によって観測する計画を進めた⁹⁾。

東海発電所の建設は進み、敦賀発電所も土木工事を開始する段階に近づいた。敦賀立石地点では破砕帯が発見されたが Bodega head のような問題とはならなかった。岡本研究室では敦賀地点のような岩盤上における地震波がどのような性質を示すか、各ダム地点における地震記録の調査を行なった。

本年度末には敦賀発電所の耐震設計仕様書が完成した。これは A_s , A, B, C の 4 段階の重要度分類に基礎をおいた静的設計・動的検討方式のものであった。 A_s への割増し、すなわち *possible* と *probable* との比率は $1\frac{1}{2}$ とされた。とくに格納容器は A_s の性格を有するので *possible* な地震と、そのあとにくる *probable* なクラスの余震を 2 段階に想定するなど、設計条件は複雑になっている。このほか排ガス煙突にいたるガ

ス・ダクトについても別記した。

ロス・アンジェルス近郊に加圧水型で計画中の Malibu 発電所がある。これについての設計方針には、それまでいくつかの考え方で行なわれて来た許容応力の定め方の問題がかなり明確になったように思われる。A クラスについては常時応力に、設計条件による動的解析結果としての地震応力を加えたものが、通常の許容応力 (ASME, ASA あるいは Uniform Building コードなどで定める) を超えないものとする。また設計条件の 2 倍の地震によって機能が損われず、通常のシャット・ダウンが可能であることとする。格納容器は仮想事故が発生した状況下で、さらに設計条件による地震応力を加えたものが、降伏点（数値としての）を超えないとともに、2 倍の地震によっても機能が損われない。なお上述のすべての場合、任意方向の水平動に上下動を加えたものを考える。以上が、その内容であって、2 倍という比率や通常の長期荷重による許容応力を中心とした考え方はかなり厳しいものであるといえる。

建築学会原子炉耐震小委員会は、JPDR での地震計測を継続する一方、都下調布市の鹿島建設(株)、技術研究所構内ほか 2 箇所に鉄筋コンクリート造の試験体（高さ 7.5m, 幅 3.5m, 奥行 3.5m）を建設して、隣接地における -20m までの地中測点とともに地震加速度の計測を科学技術庁原子力平和利用研究委託費により企画、順次実施した。

本年 6 月新潟地方にあった強震の結果、土木構造物および一部の建築物は地盤の流動現象などにより大きな被害を受けた¹⁰⁾。また化学工場なども今までにないような被害を受けたところもあったが、火力発電所は一部の土木構造物を除いては、ほとんど無傷であった。岩盤地帯に建設されることが予想される原子力発電所については、これによって、考え方を検討しなければならぬ点はほとんど見られなかった。

なおこの年度の終わりには New Zealand にて第 3 回世界地震工学会議が開かれた。原子力関係の論文は多くはなかったが、全分野にわたり電子計算機の使用が活発となったことが目立った。

1965 年

本年度に入ると関西電力(株)、美浜発電所および東京電力(株)、福島発電所の計画が具体化され耐震設計仕様書が作製された。福島発電所は日本原子力発電(株)、敦賀発電所と炉の形式がほぼ同じ沸騰水型であることなどもあり、かなり共通な点があって骨子は変わっていない。むしろ格納容器、ダクトなどについては簡略化されている。

美浜発電所は加圧水型であるが、耐震設計の基本的考え方は敦賀発電所と同様である。構築物および機器

は重要度に応じて、A, B, C に分類され、これらはいずれも原則的には静的に設計される。

震度としては、構築物は建築基準法に定める値を C_h , C_v とすると、A, B, C に対して、それぞれ水平方向に $3C_h$, $1.5C_h$, C_h 、鉛直方向に $1.5C_v$, $0.75C_v$, $0.5C_v$ をとる。機器、配管類についてはすえつけ位置の上記震度の 1.2 倍を用いる。A については、このほかに基岩における水平方向 300 Gal の地動に対して動的解析を行ない、上記静的解析の結果と比べてきびしい方を探り設計する。原子炉格納容器と原子炉安全停止機構のようなきわめて重要なものについては基岩水平 400 Gal の地動に対してその機能が維持されるかどうか検討される。(ただし C_v は基準震度、 C_h は割増震度)

B の機器、配管類で支持構造物と共振のおそれのあるものは基岩水平 150 Gal の地動に対する動的解析により、設計震度は検討修正される。

地震荷重と他の設計荷重との合算による応力の許容値は、建築基準法によるか、あるいはこれに規定されていない部材については弾性限度とする。

建築学会原子炉耐震小委員会の記録の収集は進み、ある地震に対する計算による応答波形を記録と比較することや、構築物の記録から逆に基礎における地動を推定することなどが試みられた。

アメリカでは Bodega Bay 発電所の敷地内にある断層の年代および活動性についての議論が行なわれ、活断層と考えた場合、それに対する経済的な対策が見いだされぬまま PG & E 社は建設を断念した。一方 San Onofre 発電所の建設は進行している。

通商産業省原子力発電所安全基準委員会地震小委員会による調査報告書の作製は進み、超高層建築物の設計が進むにつれ得た知識なども取り入れて、次年度はじめに出版された。例題は含まず、TID-7024 に比べて一般的な記述にとどまり、やや具体性に欠けるものとなった。

1966 年

前年度秋から始まった松代群発地震は浅層地震であることからくる特異な性質もあるが、待機すれば震度 IV 程度の地震が記録できるということから、実験的にもおおいに利用された。そのうちのいくつかは地震工学国内シンポジウム 1966 で報告されたが、地震動におよぼす建物の影響とか、ごく表層の地盤のわずかな差による地震スペクトルの変化など、きわめておもしろい結果が得られている。

日本原子力発電(株)、東海発電所は完工し、敦賀地点も掘削を終え、コンクリート打ちが開始された。完全剛構造の方針に従い、かなり多量のコンクリートが岩盤の傾斜に沿って打たれたことが一つの特徴である。

東海発電所でも若干問題となったコンクリート構築物の地震力による変形が、敦賀発電所でも問題となった。コンクリート構築物すなわち原子炉建物は質量としても大きいので、その変形は、軽くて剛性の高い格納容器のドライ・ウェルに比べて、上層部の同一高さで比較するとかなり大きくなるという計算結果が得られた。これは構築物の剛性を増すということで解決した。このほか GE 社の設計方針は前述の Malibu 発電所のところなどで述べたことに近い。

東京電力(株)福島発電所、関西電力(株)美浜発電所の掘削工事はいずれも大きな問題点もなく進み、それぞれ本工事に着工することができている状態となった。

建築学会原子炉耐震特別小委員会は、その後も地震測定を継続する一方、起振機による強制振動実験および常時微動計測を行なって本年度末で一応研究を終了した。

本年の 6 月 IAEA (国際原子力機構) 主催の Aseismic Design and Testing of Nuclear Facilities (原子力施設の耐震設計および試験) に関する専門家会議が東京で行なわれ、岡本教授、著者が参加した。日本およびアメリカの関係分野から、それぞれ 15 名および 14 名が参加し、そのほかイギリス、イタリア、中国、カナダ、チリ(この両代表はユネスコより)など

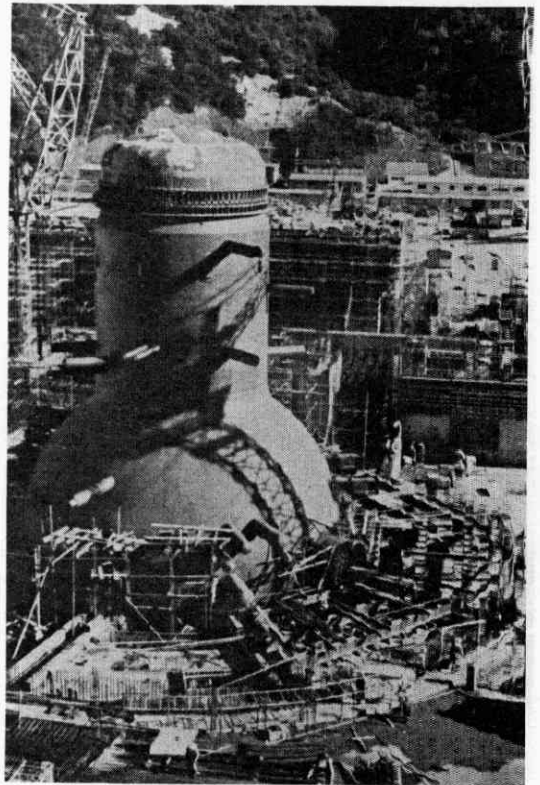


図 3 日本原子力発電(株)、敦賀発電所
沸騰水型 (BWR)、電気出力 340,000kW
(1967 年 10 月撮影)

計 35 名で、当初各国の現状を示す論文 22 編が読まれたあと、各分野にわかれ詳細な討議を行ない、最後に勧告案を作成した。この勧告案には日本、アメリカの現状を併記し、それより一本の結論の得られたものをまとめた。とくにしるべきこととしては、地震を 2 段階に想定すること、3 段階の重要度分類を行なうことなどがあげられる。両国で一致しなかったことは上述の分類の各段階の内容ははじめ、応答計算に地震波による解析を使うか、応答曲線としてまとめて設計図表化して使うことなどであった。そのほか活断層ないしは地震のメカニズムについても議論があったが、これはそれぞれの立地条件の差によるものと考えられる。

1967 年

松代地震はわが国の地震工学の研究に大きな足跡を残しつつほぼ終息し、北信地方に散発的にかなりの強さの地震が発生するといった段階に達した。

発電所の建設は 3 地点で、いずれも格納容器の溶接工程がほぼ終わるか、あるいは着手する段階となった。また数地点があらたに話題に上り、一部では試掘なども行なわれたが、用地取得に問題が残っている地点もある。

このようなことから、建設可能な地点がかなり制限されて来たこと、および発電所を都市の外輸送電線近くに置きたいという電力会社の希望から、原子力発電所の都市接近化が話題となった。わが国の都市は多くは、沖積層のような軟弱地盤上にあるので、都市接近化はほぼ軟弱地盤地において杭、ケーソンなど地下構造物上に発電所を建設することと同意義となる。

本所では岡本、久保教授が本問題に関心を有し、前年度末千葉実験所内に完成した大型振動台によって、杭で支えられた構造物の振動に関する実験を行なっているのをはじめ、数値モデルによる解析なども行なわれている。

各発電所の設計、施工については大きな問題はなかった。機械系の設計と関連したことで、フロア・リスポンズ（各階の床面における地震波形による機器系一質点の応答）の特性について議論があった。一つは建屋の第 1 層の応答を地盤そのままとするか、地盤のばね作用を介在させるかであり、ほかの一つは沸騰水型における建屋上部を鉄骨構造とした際の応答倍率の増加である。

本州・四国連絡橋の設計方針も固まって来、そのための作業によって得られた知見も、いろいろな面で役立っているように思われる。

4. 機械系の耐震設計研究経過

機械系の耐震設計問題は原子力関係についても、やや

おくれて発足した。建築・土木構築物系と違い、これまで被害についての経験が皆無であった。したがって冷却用ダクト・配管系が比較的揺れやすく設計加速度を大きいめにとらなければならないだろう、ということが考えられた程度であった。コールダ・ホール改良型についての耐震設計仕様書（入札の段階）も、この線に沿い安全度をみて静的に 2G の水平加速度を考えるものとした。

この段階までは、機械関係の専門家の積極的な参加はなかった。以下年代を追って、ふたたびしるして行く。

1958 年

日本原子力発電（株）の地震対策小委員会に細部機構グループが発足した。本所から亘理教授、著者が、工学部機械工学科からの吉沢、藤井両教授とともに参加した。第 1 段階として東海発電所のイギリス 3 社の提出した概略設計書の検討を行なった。このなかの一次冷却系ガス・ダクトの振動解析について疑義がもたれ、工学部藤井研究室その他でガス・ダクト模型の振動実験を行なった。この結果、上述の疑問点は連続体の振動という立場から、さらに解明されなければならないことが判明した。

1959 年

前年度のガス・ダクト模型の実験結果を藤井教授、著者らが検討した結果、一般形状をした配管（もしくは梁）系についてエネルギー法などを適用して振動解析を行なう場合であっても、一般規準座標系によって考えなければならないことが判明し、小寸法模型による定性的検討を本所柴田研究室において着手した。

本年度半ばから通商産業省、原子力発電所安全基準専門委員会地震小委員会が発足し、資料のとりまとめと、安全基準案の草稿の作成に着手した。

また水型炉の一次冷却系についての知識を得るため、東京電力（株）品川火力発電所 2 号機の竣工した際に、配管の工事状況を調査するとともに、ガバナ・テストの衝撃による配管の振動状況を視察した。

1960 年

本所亘理教授を主任研究者として、著者および工学部機械工学科の数名のグループにより文部省科学試験研究費を受け、大型機械構造物の耐震に関する研究を実施した¹⁾。この研究は配管系を中心とした機械系の耐震設計法の基礎となる理論体系と手法を得ることを目的としたものである。個別の課題としては、小寸法模型による配管の振動特性の測定、ダンパの効果についての基本的実験、機械・構築物系の応答推定についての各種計算法の検討および配管の振動解析法の検討を行なった。

一方品川火力発電所における調査は発展して、科学技術庁原子力平和利用研究委託費により、東京電力（株）、技術研究所が主体となって、原子炉配管系の耐震

安全設計に関する研究を実施した¹²⁾。これは上記発電所における配管について、強制振動、自由振動、常時微動などについて実地に計測することを目的としたものが第1の課題であって、予備試験と本試験（1961年度）により、3種の配管について固有振動数、振動型および減衰定数を測定し、各測定法の長短所について比較した。第2の課題としては上記3種に相当する中寸法模型を製作し、小寸法模型と合わせ、その相似則などについて検討し、寸法によらずかなりの精度で固有値が固有振動数と関連して得られることがわかった。さらに中寸法模型で応力分布を測定したり、回転型ダンパを装備してその効果を確認した。

通商産業省の安全基準草案の作成は動的解析をどの程度取り入れるか、および地震荷重に対する許容応力をどのように定めるか、議論が活発に行なわれた。

1961 年

前年度に引き続き文部省科学試験研究費による研究が実施された。東京電力（株）による研究も模型～実系間の相似則の成立限界、模型実験の適正規模、配管系の減衰定数の平均的傾向などを把握することができた。一方日本原子力産業会議の安全特別研究会内に地震小委員会（主査藤井澄二）が発足した。

また年度初めには通商産業省の原子力発電所安全基準第一次報告書が完成した。これには機械系は動的に応答を算出して設計するとの方針が示されたが、全般的に議論が起り、引き続き検討されることになった。また日本国有鉄道は火力発電所大型ボイラの支持に油ダンパを採用し、模型実験の成果とともに公表した。

1962 年

東京電力（株）の研究などの成果および安全基準第一次報告書の内容についての討議の結果、さらに強力な研究態勢を必要とするの結論に達し、日本機械学会は研究協力委員会の下に耐震設計法研究分科会（主査吉村国土—当時日本原子力産業（株）、調査開発部長）を設置した。この分科会は1960年度の東京電力（株）に引き続き、科学技術庁原子力平和利用研究委託費を受け、配管系の振動解析および機械・構築物系の地震応答についての研究を、原子炉配管系の耐震設計に関する研究として実施したが、亘理教授、著者の両名が参加した。

第1に配管の振動解析プログラムを作製し、その計算結果を模型実験と比較することを行なった。本年末にはIBM-7090が導入される予定だったので、その運転開始を目標にプログラミングを進めDYNAPS-4を完成した。これを検証するための模型実験が柴田研究室で行なわれた。

第2の課題は、工学部藤井研究室によって実施さ

れ、機械・構築物系の応答倍率を確率過程論による極値分布から求め、それをアナログ計算機による地震波および白色雑音による擬似地震波に対する応答倍率と比較し、両者が一致するか後者がやや前者を下廻るとの結論を得た。その結果は応答倍率表として作製された¹³⁾。

日本原子力発電（株）、敦賀発電所に対する仕様書などの検討が開始されたが、機械系についてはかなり先の問題とされた。

1963 年

日本機械学会耐震設計法研究分科会は前年度に引き続き科学技術庁原子力平和利用研究委託費をうけ、東京電力（株）、千住火力発電所（当時休止中）において大規模な振動実験を行なった。これは引き続き工学部井口助教授および本所佐藤助教授が中心となった。前年度第2課題を担当した佐藤は年度初めに本所へ助教授として赴任したものである。配管は分岐、中間支点のあるものを含み、3種が選ばれ、ダンパも試験として多数装着された。それに引き続き横須賀、川崎、品川発電所とともに常時微動法による測定を実施し、配管を中心とした機器類の振動特性を収集解析した。

この間標準地震動の開発のため東京大学地震研究所

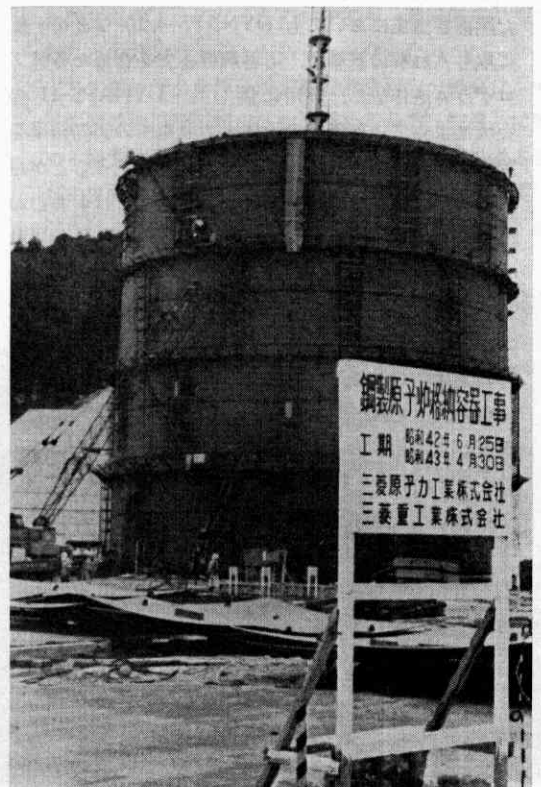


図4 関西電力（株）、美浜発電所
加圧水型（PWR）、電気出力 340,000kW
(1967年10月撮影)

と協力して、構築物あるいは計測器の伝達特性を知って、地震波形がその前後でどのような変化を受けるかを知るため、位相特性を考慮した変換のためのプログラムの作成を開始した。また標準地震動はじめ各種地震動による 2 自由度系の応答を求めるプログラムが作成され試算された。

前年度の耐震設計法研究分科会での調査の結論により同様な組織で压力容器構造設計基準研究分科会（主査奥田克己一当時三菱重工業(株)、常務取締役）が設立され、耐震の問題とは独立して压力容器のノズル部周辺を中心とした部分の各種強度について実験および解析的研究を科学技術庁原子力平和利用研究委託費によって開始した。本所より大井教授が参加した。

1964 年

上述の研究委託は本年度に一部継続され、前年度中に付加物、分岐部などを有する配管系の振動解析プログラム DYNAPS-10 によるテストが行なわれたが、その結果を折り込み実地に使用しやすい形に拡充整備した DYNAPS-11 を作成した。一方本問題の基本的諸点の解明のため、著者が文部省在外研究員として University of California at Berkeley において DYNAPS-4 から改造した DYNAPS-7 を使って各種の試計算を行なった。その結果も折り込まれている。また関係各企業においても DYNAPS-4, 10 などの一部に取り入れ解の基準化、応答解析までを含めた各種プログラムを作成し、実用に供した。DYNAPS-11 の完成によって、前年度の千住火力発電所の実測結果を模型実験の結果、数値解析の結果と比較することが可能となった。これにより低次振動についてはおおむね一致するが、高次振動のある振動型ではかなりのずれがあることが明らかになった。これは管端末がほかの機器に接続されていて、完全固定などの条件が満たされていないためであろうと推定された⁴⁾。

なお本年の特筆すべきことは 6 月 14 日に新潟地方を襲った大地震である。本所からも工場関係の被災状況を調査するため、再度にわたり調査団が派遣された。昭和石油(株)の油貯槽の火災のほか化学プラントの被害がめだった。配管系の被害は基礎の浮上、沈下によるものが主であったが、共振による破断らしきものも一部にみられた。地下埋設管の被害は非常に大きく一つの問題を投げかけている¹⁰⁾。

日本原子力発電(株)、敦賀発電所に関する仕様書が完成した。機器・配管系は剛に支持され、したがって静的設計法をとるのが原則となるが、固有振動数の分類により共振あるいは柔領域に入るものについては動的設計を行なうこととした。他方、東海発電所は完工に近づき柴田研究室も参加して二次系主蒸気管を中心に振動計測を実施した。

1965 年

压力容器構造設計基準研究分科会は压力容器ノズル部、スカート接続部の応力解析を理論、光弾性模型および鋼製模型により行なってその比較を行なった。また、ノズル部に主点を置いて高応力疲れの実験を進めた。これらの研究の一部は大井研究室で実施された。耐震設計法研究分科会は本年度初めに報告書作製の準備を終え解散した。

一方東京電力(株)、福島発電所、関西電力(株)、美浜発電所についても仕様書の検討が開始された。

また本年度後半から原子燃料公社の再処理プラントの耐震設計の方針につき検討を開始したが柴田研究室もこれに加わった。これはセルとよばれる小室内に径 25mm 程度の配管が多数配置されている構成のため従来とまったく異なった方針によらざるを得ないためである。

これと相前後して長野県松代地方に群発地震が発生し継続した。この地震はきわめて浅層に発生するものであるためか、従来観測されていなかった高い振動数成分に富み、機械の分野における耐震設計の基本方針にかなりの衝撃を与えた。佐藤研究室でも現地で測定した結果、このことを確認した。1966 年夏の Park field 地震の記録¹⁵⁾とともに最大加速度というものを再検討する必要があることを知ったのも、また一つの成果である。

1966 年

日本原子力発電(株)、敦賀発電所の建設も進み、一次冷却系の設計の時期も近づいた。また、この数年火力発電所の規模が増大したため、主蒸気管系などの耐震対策が問題となり、油ダンパを装備した例もいくつか見られるようになった。このため配管振動解析計算が何例か試みられている。その他原子燃料公社の燃料再処理プラントについて、耐震設計の基本方針の検討をほぼ終了した。

压力容器構造設計基準研究分科会は高応力疲れの実験に主点を置いて進める一方、ノズルに外力が加わった際の応力分布を数値的に解析する方法について研究を進めている。本年度半ばまでに 1963 年度から 3 年間にわたって受けた科学技術庁原子力平和利用研究委託費に関する報告書¹⁶⁾を 2 冊まとめ、年度末で解散し、次年度からは原子炉压力容器設計資料調査分科会として継続されることになった。

1963 年度に制定された ASME の Boiler and Pressure Vessel Code の Section III は原子炉压力容器に関するもので、この分科会との関連性が深いものであった。本年度に入ってわが国における通商産業省関係の基準をこの面から検討することになり、火力発電技術協会が压力容器専門委員会（委員長寺田重三郎一当

時東京電力(株), 最高顧問)を組織し短い期間で検討した。その結果アメリカへその制定のいきさつや背後資料を調べるための調査団が派遣された。この速報¹⁷⁾によるとアメリカ側では地震応力については、とくにむずかしくは考えず一次応力として他の応力と加算するのが妥当であると判断しているとのことである。

建築学会は 1964 年度から科学技術庁原子力平和利用研究委託費により JPDR および模擬試験体(構造物)に地震計, 加速度計を取り付け地震応答を測定しているが, それと同時に配管系についても同様な測定を行なうことが検討された。JPDR の一次系について調べた結果, 格納容器外への測定回路の引き出し, および加速度計ピックアップの高放射線量曝射に対する安定性に問題があることが判明した。都下調布市の第 1 号試験体に径 125 mm で長さ約 8 m の L 型配管を取り付け, 柴田研究室は鹿島建設(株), 技術研究所と協力して計測を続行した。

日本機械学会では前年度末に配管等耐震設計法調査分科会(主査藤井澄二)を発足させたが, 本年度半ばにおいて原子炉耐震設計法研究分科会に改組し, 科学技術庁原子力平和利用研究委託費により格納容器など原子炉関係の容器の振動解析の研究に着手し, 模型による振動実験は柴田研究室で実施された。

1967 年

本年の最も大きな事からは §3 でも述べた IAEA の専門家会議である。この会議に提出された機械系の報告は日本, アメリカ併わせて 5 編であった。いわゆる耐震設計については, わが国の方が進展している感が深かった。しかし個々の設計の過程については, 現実面の細かい配慮とか実用性の観点にたった経験が不十分であると思えた。地震荷重に対する許容応力の問題は, 压力容器の設計技術の急速な進歩にともない, その結果の活用をさまたげないようつねに検討し改善して行かなければならぬことが感ぜられた。この勧告案は 9 月末までに再整理され IAEA 本部へ送付された。

日本原子力発電(株), 敦賀発電所は格納容器の圧力試験を完了し, コンクリート打ちもかなり進行した。関西電力(株), 美浜発電所は, はば格納容器の溶接を完了した。一方東京電力(株), 福島発電所は格納容器の溶接が開始された。これが本年度末の工事の概況である。一般的に数多くある配管

の耐震設計を円滑に処理することが問題となり, 計算方法の再検討が望まれている。

火力発電技術協会・压力容器専門委員会では原子力压力容器規程案¹⁸⁾として ASME の Boiler and Pressure Vessel Code, Section III の訳をまとめた。これはさらに電気事業法にもとづく発電用原子力設備技術基準の原案の一部として検討がすすめられている。アメリカでは AEC が Tentative Regulatory Supplementary Criteria for ASME Code-Constructed Nuclear Pressure Vessels が出, それに対する ASME および WH 社の反論が入手された。これによると耐震設計を全体として考えることなしに個別の機器などに適用するのは無意味である。許容応力についても総合的に考えなければならぬ, などの意見がみられる。また放射線照射の影響として材料疲労とくに低サイクルのものについて議論されているのは注目する必要がある。

建築学会の試験研究は本年度で終了し報告書¹⁹⁾としてまとめられた。試験体内の L 型配管の固定端に対する応答倍率は, 正弦波共振の理論値約 110 倍に対し, 加振機による共振試験約 80 倍, 1.7 Gal の地震に対し約 7 倍という値を示した。このような低減率は地震の継続時間が倍率の大小に非常に影響することが明らかとなった。いわゆる剛, 柔構造の関係により卓越振動数がどのようになるかについても, 理論的に予想されたとおりであることが明らかとなった。

日本機械学会の原子炉耐震設計法研究分科会は, 原子炉容器の振動解析の研究を進める一方, 配管系に関する研究と本研究を総合する観点で, 多入力による多自由度系の応答解析に着手した。両課題とも前年度に引き続き原子力平和利用研究委託費によっており, 原

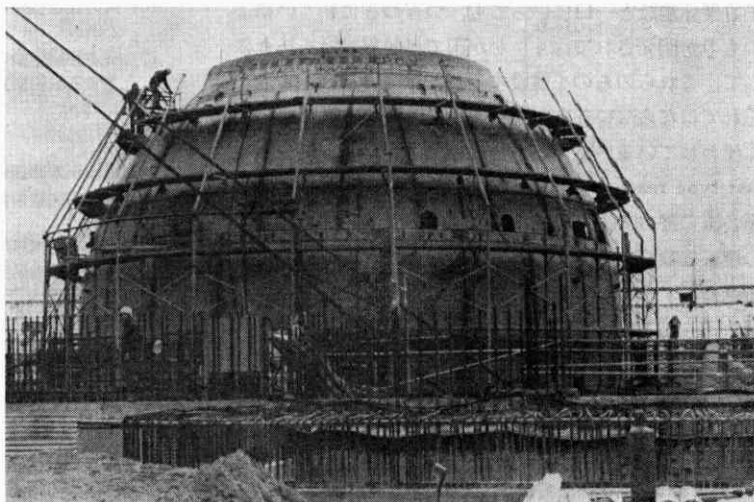


図 5 東京電力(株), 福島発電所
沸騰水型(BWR), 電気出力 400,000 kW
(1968 年 3 月撮影)

子炉容器の実験は柴田研究室で、応答解析は柴田、佐藤両研究室で行なわれている。格納容器模型の振動特性がきわめて複雑なこと、スカート付き容器のスカート部周辺の応力分布が静的加重法によっても、最低次共振時であってもほぼ一致することなどが判明した。

5. む す び

以上の経過をたどって原子力施設の耐震設計は進んで来た。しかし現在の問題点を挙げて見るならばあまりにも数多いので驚く。その中で最も重要と思われることのみに触れる。

数日前の5月16日に北海道南沖を震源とする地震が発生し、東京～青森間のマイクロ回線が中断した。新聞報道によると、非常用発電セットを載せた鉄枠が発電機の軸方向にストッパなどが無かったため、滑り出したのだという。自重約9 tonであるので、平常の外力では動くことがないとして、アンカを施さなかったともいわれる。この報道が正しいなら、非常用の設備であってもなお地震に対する配慮が欠けていたといわざるを得ない。原子力施設の耐震設計で恐ろしいのはこのことである。耐震設計の焦点となる配管などを除いては、各分野の専門家がその設計にあたるわけである。担当者に耐震設計の知識がないならば、あるいは考え方が不十分であるならば、いたるところに上述のようなことが生ずる可能性が待っている。耐震の専門家の養成ももちろんであるが、それ以上に必要なのは、原子力発電所の設計にたずさわる他の分野の人々への耐震に関する常識の普及である。

燃料再処理プラントの着工も間近になり、高速炉(FBR)のプロト・タイプの概念設計も進められている。原子力関係施設と一口にいても、つぎつぎに新しい構造のものが開発されて行く。わが国では耐震設計を抜きにして、これらのものを建設することはできない。さらに忘れてはならないことがもう一つある。現在世界中で広く使われているいくつかの形式の原子炉は実証炉(proven type reactor)とよばれている。アメリカはじめ関係各国の努力により核的事故の発生の実験を含め、多くの運転経験を有するにいたったのである。この点、地震荷重に対するこれらの原子炉の挙動は実証されていると

はいいがたい。そして、このための研究、実験を行なえるのはわが国において他にはないと思われる。今後の最重要課題であることを指摘して本稿を終える。

(1968年5月31日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本原子力発電株式会社：原子炉地震対策委員会第一次資料(1957.12), 196 pp.
- 2) 武藤：原子力学会誌, Vol. 1, No. 7 (1959.7), 447; Vol. 2, No. 1(1960.1), 25, Vol. 5, No. 5(1963.5), 774.
- 3) United States Atomic Energy Commission: *Nuclear Reactors and Earthquakes, TID-7024* (1963.8), 415 pp.
- 4) 日本原子力産業会議原子動力研究会：原子力発電所の安全対策(1959.12), 174 pp.
- 5) G. W. Housner: *Proc. of the 2nd World Conference of Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 1 (1960.7), 133.
- 6) 坪井, 秋野ほか：生産研究, Vol. 12, No. 6 (1960.6), 258.
- 7) 通商産業省原子力発電所安全基準委員会：原子力発電所安全基準第一次報告書第19章(1961.4), 575 pp.+付録.
- 8) 日本原子力産業会議安全特別研究会：ハザードレポート調査報告(1964.8), 18.
- 9) 田治見ほか：日本機械学会誌, Vol. 68, No. 559 (1965.8), 1013.
- 10) 機械耐震設計グループ：生産研究, Vol. 16, No. 10 (1964.10), 293 ほか.
- 11) 柴田, 重田：日本機械学会論文集, Vol. 29, No. 200 (1962.5), 783 ほか.
- 12) 東京電力株式会社：原子炉配管系の耐震安全設計に関する研究, 試験成果報告書(1962.4), 336 pp.+128 pp.
- 13) 日本機械学会：原子炉配管系の耐震設計法に関する成果報告書(昭和37年度), (1963.12), 405 pp.
- 14) 同上(昭和38年度), (1965.11), 246 pp.
- 15) G. B. Oakeshott ほか：*Bull. of Seismological Soc. of Amer.*, Vol. 56, No. 4 (1966.8), 961.
- 16) 日本機械学会：原子炉用压力容器のノズル取付部および支持スカート取付部の構造強度に関する試験研究(1966.9), 176 pp. ほか.
- 17) 火力発電技術協会：原子力压力容器規格調査団報告書(1967.5), 3-110.
- 18) 火力発電技術協会：原子力压力容器規格案(1967.12), 252 pp.
- 19) 日本建築学会：原子炉施設の地震時における振動特性に関する試験研究成果報告書(昭和40年度), (1968.3), 130 pp.

どのほか本問題に関する文献は数多くあるので挙げきれない。下記の文献の参考文献欄を参照していただきたい。

柴田：日本機械学会誌, Vol. 70, No. 579 (1967.4), 521.
柴田：機械の研究, Vol. 19, No. 1 (1967.1), 173.
同 Vol. 19, No. 2 (1967.2), 311.

