特集・原 子 カ

# 沸騰水型原子力発電所の耐震性研究 Some Studies for Aseismic Design of BWR Power Station

沸騰水型原子力発電所は、万全の耐震設計が施されているが、より合理的な設計 手法の開発と、耐震性の実証を目的として強力に研究が進められている。この論文 では,最近日立製作所で実施した試験及び研究から,設計地震条件についての人工 地震波作成技術及び解析精度の向上を目的とする建物-地盤系の振動解析手法, 並 びに燃料集合体振動試験及び地震時の原子炉停止能力を実規模の試験装置により実 証した制御棒挿入実証試験について、それぞれの概要を紹介する。以上のような、 基礎的な研究から実機試験に至る広範囲な研究成果の積み重ねによって、沸騰水型 原子力発電所の耐震設計が、より信頼性の高いものとなることを期待している。

笠井洋昭*	Kasai Hiroaki
田中基八郎*	Tanaka Kihachirô
高柳政明*	Takayanagi Masaaki
盛山武夫**	Moriyama Takeo
樫 村 義 貞***	Kashimura Yoshisada

### 言 1 緒

原子力発電所は, 安全性の確保を最重視して建設されてい るが、我が国のような地震国では、特に耐震性に留意されね ばならない。沸騰水型原子力発電設備(以下,BWRと略す)は, 多年にわたる建設経験と、試験・研究に裏付けされた設計技 術とによって、高度の耐震性をもつように万全の配慮が払わ れているが, 耐震性に対する社会の強い要求に応ずるため,



構造的な改良・開発及び試験・研究が強力に進められている。

#### 耐震性研究の動向 2

耐震性に関する試験・研究は、 合理的な設計条件の確立に 関するもの、 地震応答解析手法の精度向上に関するもの及び 地震応答値の評価,特に機能維持の実証に関するものに大別 される。図1に代表的な研究例を示すが,設計条件の合理化 は、地震学の進歩に伴う設計指針の見直しに関連して、人工 地震波の作成,設計用減衰定数の設定などが対象となってい る。解析技術については、一般的な手法は既に信頼性の十分 高いものとなっているため、特殊な構造物のより精度の高い 解析手法の開発とその立証に、研究の重点がおかれている。 近年, 耐震性の実証に関する試験・研究は, 設計用地震動が 大きくなり、また地震災害をより厳密に評価しようとする要 求から積極的に実施され、電気計装品の振動試験<sup>1</sup>制御棒の挿 入実証試験2),機器・配管の振動測定3)などに成果を挙げてお り,その他の社外の計画,例えば原子力工学試験センターの 超大形模型による実証試験などにも参画している。

上述のように、日立製作所での耐震性研究は、原子力機器 の総合メーカーとして、プラントの基本仕様に関するものか ら,現地での振動測定に至るまで広範囲にわたっているが, ここでは、それらの代表例について最近の成果を概説する。

の継続時間を記録波形に依存するが、後者は任意に設定でき の過去の地震被害歴,地震地体構造などをもとに設定されて ることに特徴をもっている。これらの2種の手法について、 いるが, 地震動の周波数特性については, 強地震記録又は敷 地で観測された地震の波形を用いる方法と、 人為的に応答ス 計算プログラムを開発しているが, 記録波修正法の作成例を ペクトルを定める方法とがある。地震応答解析の手法として, 図2に、正弦波合成法の作成例を図3に示す。正弦波合成法 では、各周波数成分の位相角の関係(現状では乱数を用い、不 単純なモーダルアナリシスを用いる場合には応答スペクトル 規則としている), 波形の包絡曲線などについて実際の地震波 だけで十分であるが,非線形応答解析,振動台加振入力,建 \*\*\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所電力事業本部 \* 日立製作所機械研究所 19

耐震研究の目的別分類とその例 ¥ | 耐震研究の目的は3種に大別 される。 内について本文に概要を述べている。

屋床応答スペクトル算出及びモード減衰によるモーダルアナ リシスを行なう場合には時間履歴の地震波形が必要である。 従来は記録波形を数波使用し,特性の不均一を補ってきたが, このたび応答スペクトルから地震波形を作成する手法を開発 し、より合理的な耐震設計を可能とした。

基準となる応答スペクトルから地震波を作成する手法には, 記録波形をもとに、周波数成分ごとの応答倍率を修正する方 人工地震波の作成 3 法(記録波修正法)と、全く新たに正弦波を合成する方法(正弦) 耐震設計の基本条件である設計用の地震動は,発電所敷地 波合成法)とがある。前者は、各周波数成分の位相角、主要動 100 日立評論 VOL. 60 No. 2(1978-2)



図2 地震波修正法による作成例 原波形としてエルセントロ地震波を用い,米国NRC Regulatory Guide 1.60による応答スペクトルに合致するように修正を行なった。



図3 正弦波合成法による人工地震波例 正弦波の合成によって,基準応答スペクトルに合った人工地震波を作成した。

の特性に対する考慮が必要であり、人工地震波を設計用に使 用する場合の今後の課題となっている。

# 4 建物-地盤系の解析

 $\mathbf{20}$ 

建物の振動特性は,建物が設置される地盤の影響を強く受けるため,建物-地盤系のモデル化に特に留意している。現在は,図4(a)に示すように,支持地盤の弾性を理論的に等価なばねに置換する手法が一般に用いられているが,敷地の制約などにより建物の基礎形状が複雑となる場合には,新たな解析手法が必要となる。このため,有限要素法を用いたモデル化の手法について検討を加えている。

原子炉建屋の解析モデルの例を同図(b)に示す。この例では 地盤を2次元の三角形要素でモデル化しているが,建物自体 には従来の梁要素をまた建物の基礎には剛体要素を用い 建物の振動によって誘起される地盤の振動性状を知ることが でき、地中埋設物の解析,建物同士の相互干渉の評価にも有 効な手法であることが分かる。

有限要素法の適用には,地盤の境界条件などに多少の検討 の余地が残されているが,この種の新たな手法を導入するこ とによって,建物-地盤系のより詳細な地震応答解析が可能 となっている。

## 4 炉心機器の耐震性研究

原子力発電所の心臓部を構成する炉心は,耐震設計上,最 重要機器の一つであり,安全性に対し万全の対策がなされて いる。特に,発電所で感知された地震が一定加速度を超える と,スクラム信号発生により制御棒が自動的に炉心に挿入さ れ 原子炉が停止される。したがって 炉心の耐震性を正確

には此不可未安系で、よん建物の至他には剛体安系で用い、	41、原丁がが停止される。したかうて、か心の耐度圧を止伸
従来の解析モデルとの適合に留意していることに特色がある。	に評価するためには, 振動試験によって解析手法, 解析モデ
振動モードの解析結果は同図(c)に示すようであり、比較的軟	ルの妥当性を確認するとともに、制御棒については地震時の
らかい地盤についての解析例であるため,一次,二次の振動	挿入機能を実証する必要がある。これらの要求に対し、従来
モードは建物のロッキング振動が現われている。また、固有	から種々の試験,研究,を行ない設計に反映させているが <sup>1),2)</sup> ,
振動数は一次元解析モデルとよく一致している。更に、この	最近, 炉心構造が改良され耐震性が改善されたことに伴い,
解析例にも顕著に現われているが,有限要素法を用いると,	一連の試験,研究を行なった。それらの主なものを,次に紹





の事実は、現在の解析が十分安全側であることを示すもので ある。

試験装置の全景 図 6 中央部の円筒容器内に炉心構造を模擬した燃料 集合体と制御棒,及び制御棒駆動機構が設置されている。

21

### 5.2 制御棒挿入実証試験

地震時にも原子炉の緊急停止(スクラム)が確実に遂行可能 なことを実証するため,動的試験装置を製作した。制御棒の 目的としている。装置の全景を図6に、構造の概略を図7に 挿入性については,既に静的に燃料変位を模擬した試験を実 示す。この装置では、実際の炉心と同一の振動性状をもって 施しているが<sup>1)</sup>,より現実的な状態でのスクラム特性と制御棒 いるように配列された4体の燃料集合体と制御棒,及び駆動 挿入による燃料集合体の振動性状の変化を測定することを主 機構一式を,油圧加振機によって実際の地震状態とほぼ同様





制御棒挿入軌跡と燃料集合体変位変化 义 8 燃料集合体の振幅が 増加するに従い, 挿入に要する時間が長くなる。一方, 燃料集合体の振幅は制 御棒が挿入されることにより10~25%減少する。

	加振方向	炉圧	初期HCU 圧力(kg/ cm <sup>2</sup> G)	加振波形	記号
	Cont	0	80	正弦波	Δ

制御棒動的挿入試験装置概略図 义 7 試験容器を加振して燃料集合 体を振動させ、その状態で制御棒を水圧によって挿入している。

に振動させ、振動が十分に成長した状態で制御棒を挿入し、 挿入時間と制御棒位置の関係及び燃料集合体の振動性状の変 化を測定している。試験容器内は常温,常圧としたが,実際 の運転状態でのスクラム特性を推定するために、加振周波数, 水圧制御ユニット(HCU)のアキュムレータ初期圧力を種々 に変えている。図8に制御棒挿入軌跡と燃料集合体の振幅の 変化の一例を示す。この試験では、スクラム時間中、振動数、 振幅一定の正弦波で加振しているが、燃料集合体の振幅が大 きいとスクラム時間は徐々に長くなる傾向を示しており、ま た,燃料集合体の振幅は、制御棒の挿入によって減少する傾 向を示している。図9は、90%挿入に要する時間と燃料集合 体振幅との関係を加振方向, HCU 圧力をパラメータとして 示している。ここで、 圧力 $80 \text{ kg}/\text{cm}^2$  G は実機の圧力に相当し、 また、 圧力 48kg/cm<sup>2</sup> G は非加振時の挿入時間を実機の運転状 態での挿入時間に合わせた圧力である。同図に示すように, 加振方向の違いによる挿入時間の顕著な差は見られず,また, HCU 圧力48kg/cm<sup>2</sup> G の場合でも、加振機の能力の限界であ る最大振幅(63mm)まで挿入可能であることが確認できた。こ の振幅は、現在国内BWR プラントで推定される地震時の最 大振幅をはるかに超えるものである。測定結果から得られた 動的抵抗力をもとに、制御棒挿入特性のシミュレーション解 析を行なったが、地震入力(エル・セントロ炉内構造物応答波) では、この試験の正弦波入力の場合より更に挿入時間が短く なることが確認された。



90%挿入時間と燃料集合体変位 × 9 燃料集合体振幅が±63mmまで 挿入性が確認されたが, 地震入力の場合には, 更に挿入が容易になることが解 析により確認された。

略を述べた。特に、制御棒挿入実証試験では、国内のプラン トで推定される最大燃料振幅をはるかに超える地震時に,原 子炉の停止が確実に行なえることが実証された。このような 広範囲の耐震性研究を継続して行なって成果を蓄積し、設計 に反映させることによって, 沸騰水型原子力発電設備の耐震 性をいっそう高めてゆきたいと念願している。最後に、試験 を実施する上で御協力をいただいた東京電力株式会社原子力 開発研究所,及び財団法人電力中央研究所地盤耐震部の各位 に対し,深謝の意を表わす次第である。

#### 言 6 結

22

本稿では、耐震設計の合理化の一助となる人工地震波の作 成法,より厳密な建物基礎の解析を可能とする建物-地盤系 の解析及びBWRプラントの最重要機器である炉心の解析法 の妥当性と制御棒挿入を実証する試験について、それぞれ既

# 参考文献

- 1) 鈴木ほか3名:原子力発電所用電気計装品の耐震設計,日立 評論, 59, 567~572(昭52-7)
- 2) 落合ほか2名:日立製作所における原子力機器の耐震研究, 日立評論, 53, 1116~1119(昭46-11)
- 3) 加賀ほか4名:原子力プラント主要機器および配管の振動測 定と解析,日本機械学会誌,79,377~383(昭51-4)