

生産施設内の機械設備の耐震設計

鈴木 浩平*・青木 繁*

要 約

機械系の諸設備・機器の耐震設計にたずさわる研究者、技術者にとって、やや大きな表現をすれば昭和56年(1981年)はひとつのエポックとなる年であった。10月26日、通産省は官報(号外)を発表し、「高圧ガス設備等耐震設計基準」を告示し、今後設計されるべき貯槽、塔、架構などに耐震設計を義務づけた。この「基準」は、長年に亘る研究者、技術者および使用者からなる委員会による討論、検証、実験などの成果を踏えて策定されたものであり、今後、他の生産施設の耐震設計基準を策定するための参考指針にもなりうるものと考えられる。

一方、同じく通産省のもとでは、原子力発電施設の耐震設計の標準化、及び、大型加振実験による安全性実証などの計画が着実に進められており、昭和55年の建築基準法施工令の改正などとの絡みもあり、ここ数年間は生産施設の耐震設計にとって非常に重要な時期となりそうである。

本稿では、機械工学の立場から、都市施設の機能維持と密接なかかわりをもつ生産施設内の機器・設備の耐震問題について、その現状と若干の問題点をさぐってみたい。

1 耐震設計の対象となる諸設備と設置条件

耐震設計の対象となる生産施設に関連する諸設備を大別すると、図1のようになる。

すなわち、公共供給施設(ライフライン)に関する設備、生産施設に関する施設、及び公共サービス等に関する一般施設に大別できる。それぞれのカテゴリーには用途、目的、大きさ、重要度などが異なる多くの機器、装置が含まれており、また、これら個々の装置の中には、地震時の動的挙動がほとんど明らかにされていないものも多い。

これらの設備類の地震時における振動・破損を考察するときは、それらがどこに設置されているかによって取扱い方に大きな差異が生じる。一般に、地下に埋設された設備を除くと、図2のように、いくつかの支持点を介して建屋構造物に直接連結されているものと、図3のように、独立の基礎上に設置されたものとに分けられる。後者は、設備類が近接しているときは共通基礎の場合も含まれる。

とくに、図2のようなさまざまな設備が建屋に設置されている場合(このような例が、実際には非常に多い)には、それぞれの設備やそれを格納している構造物の応答を単独に考察することは適切ではない。すなわち、この場合には、いくつかの要素構造の“動的結合系”として扱うことになる。ここで、要素構造というのは、1.地盤系、2.基礎系、3.主構造系、4.非構造系、5.装置・機器などがそれに当たる。こうした“動的結合系”として、図2を力学モデルにおきかえると、図4のようになる。

一方、図2の点線で囲った部分の系や、図5のような系のように、検討の対象となる特定の設備を単独に解析することも重要である。原子力発電所内諸設備の地震応答についても、しばしばこの観点にとられ、いわゆる“床応答解析(floor response analysis)法”はこの立場をとっている。これらの系は一般に建屋内または建屋と共有する基礎をもっており、地震時の挙動はこの基礎の振動特性に左右される。これを、“動的単独系”とよぶことにする。この系に対する地震応答特性についてさらに考察してみよう。

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

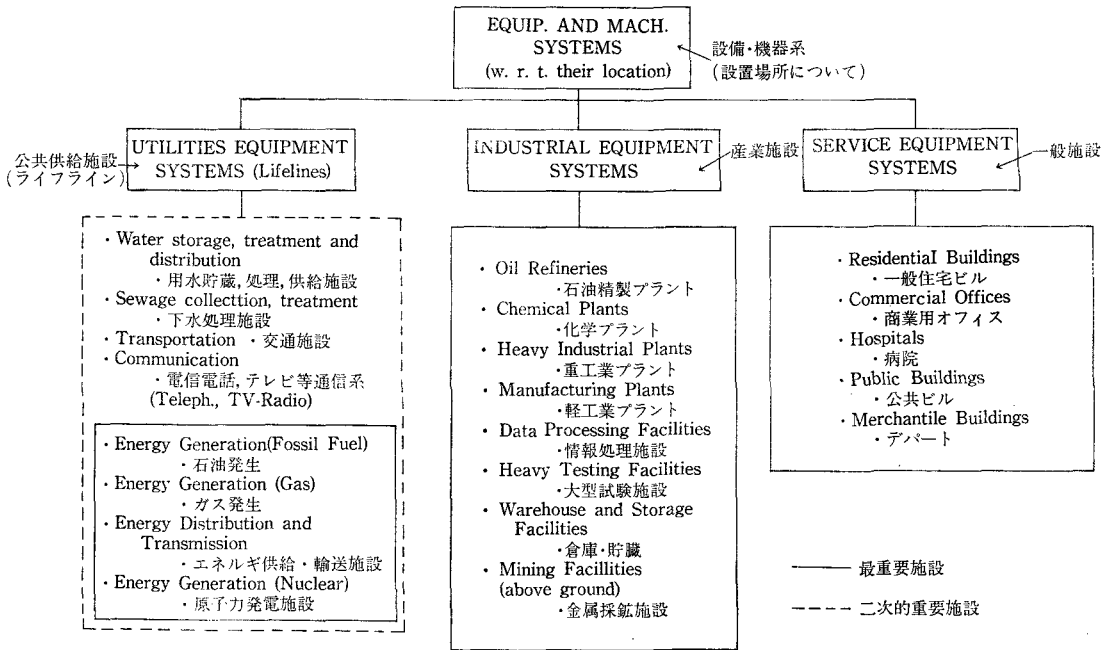


図-1

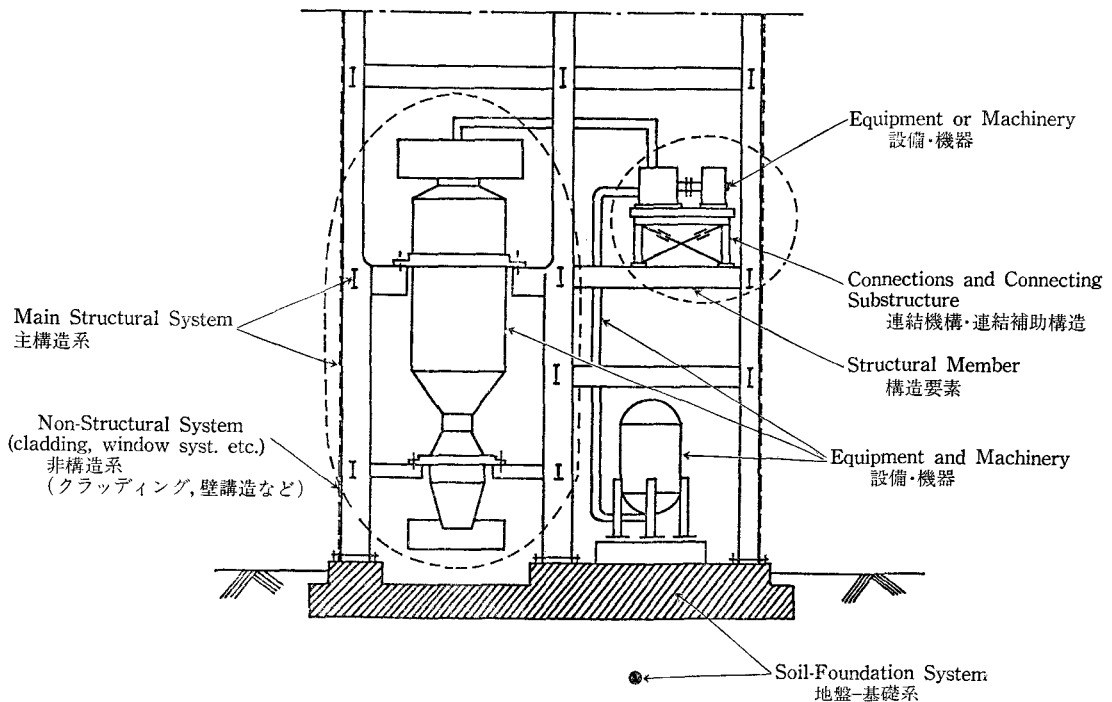


図-2

2 設備の地震応答と相互作用

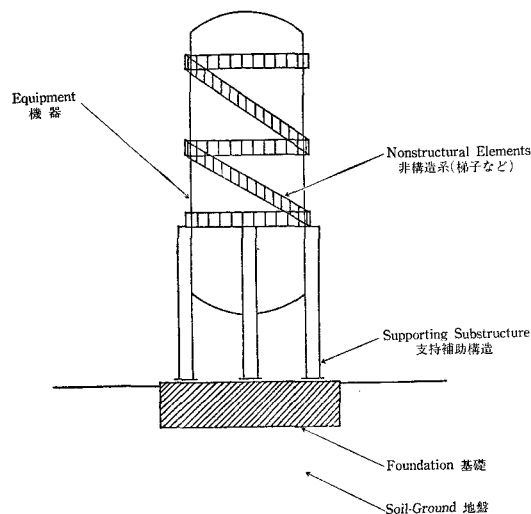
機器・配管を含む諸設備の地震時応答、機能保持、破損、および構造信頼性に影響を与える要因としては、

- (1) 入力地震動の性質：
最大加速度、マグニチュード、継続時間、スペクトルなど
- (2) 設備の構造特性：
質量分布、固有振動数、強度、可塑性、減衰及びエネルギー吸収特性など
- (3) 支持、連結機構：
結合の形式、設備と補助構造（支持系）間、あるいは、補助構造と主構造（建屋系）間の結合機構のフレキシビリティとリジディティ、ダンパなど、とりつけた減衰機構の特性
- (4) 相互作用：
対象外の他の設備や同一施設内の他のシステムとの相互作用、建屋の各階や地表レベル間をまたぐ設備の特徴
- (5) 負荷：
地震荷重以外に考慮すべきさまざまな荷重
- (6) 破損モード：
各設備のもっとも可能性が高い破損モードの類型

“単独系”としての設備系の応答を考えるときは、連結装置、支持装置のとりつけ方いかんによって応答量が大幅に変動する。このことから、すえつけ法と連結法の態様によって設備を分類したのが図6と図7である。いうまでもなく、地表面上や直接基礎上に設置された設備については、地表面の地震動とそれほど異なる入力作用が作用していると考えてよく、また、フロア・スラブに剛連結された設備には、フロア・スラブ自体の振動応答が入力として作用しているとしてよいであろう。

ところが図2の点線で囲った部分のように、支持構造上でフレキシブルな架台上に設置されたものについては、支持構造とのカップリング効果を考えなくてはならないため応答は大変に複雑となる。そして、むしろこのカップリング効果が設備の応答を左右することさえありうる。相互作用は、先にのべた基礎系、主構造系、非構造系、設備系などの間に生じうるが、一般に窓や壁構造などの非構造系と設備系は振動を縮減する役割を果たすことが明らかになっている。

このことより、一般には設備系の振動・損傷の危険性は、それがとりつけられている主構造系（建屋）の大変形に負うところが大きい。周知のように地震動による振動振幅は各階で増幅されるので、通常、多くのフロア・レベルを有している設備の方が、基礎・地盤上の設備よ



図—3

りも作用するせん断変形が大きくなる。とくに図5のように、かなり重量のある設備が、架台や支持構造上に連結されているときは、架台の基礎の振動振幅は、設備があるときとないときでは全く異ってしまうので、相互作用には神経を使わねばならない。とくに、設備の1次固有振動数と、建屋構造の固有振動数が一致あるいは非常に近接しているときは、振幅増幅率は10倍以上になることさえ普通であり、地盤が軟弱なときはさらに倍率が増加し、非常に危険な状況になることが予想される。

3 耐震設計の地震応答解析法

設備・機器・配管等の標準的な地震応答計算法の概略を示すと図8のようになる。これらの方法にはそれぞれ特徴があり、対象構造物とその重要度を考慮し、適用に当っては十分な理解が必要となる。

(1) 動的応答計算法

動的応答計算法には、時刻歴解析法、応答スペクトル法、正弦波等による方法がある。時刻歴応答計算法は、対象構造物の設置地域に対して適切な地震動波形を選んで入力し、構造物モデルの運動を記述する微分方程式を直接積分して、その時刻歴応答を求める方法である。応答スペクトル法は、標準的な解析法として最も良く利用される。構造物を各固有モードの直交性を利用して多数の1質点系にし、あらかじめ1質点系の応答の最大値として計算された応答スペクトルを利用し、モード合成によって応答計算をする方法である。耐震設計という立場からみると、設計者に工学的余裕を与え、合理的な耐震設計ができる利点がある。正弦波などによる方法は、地震動を正弦波3～5波におきかえて入力する一つの便法

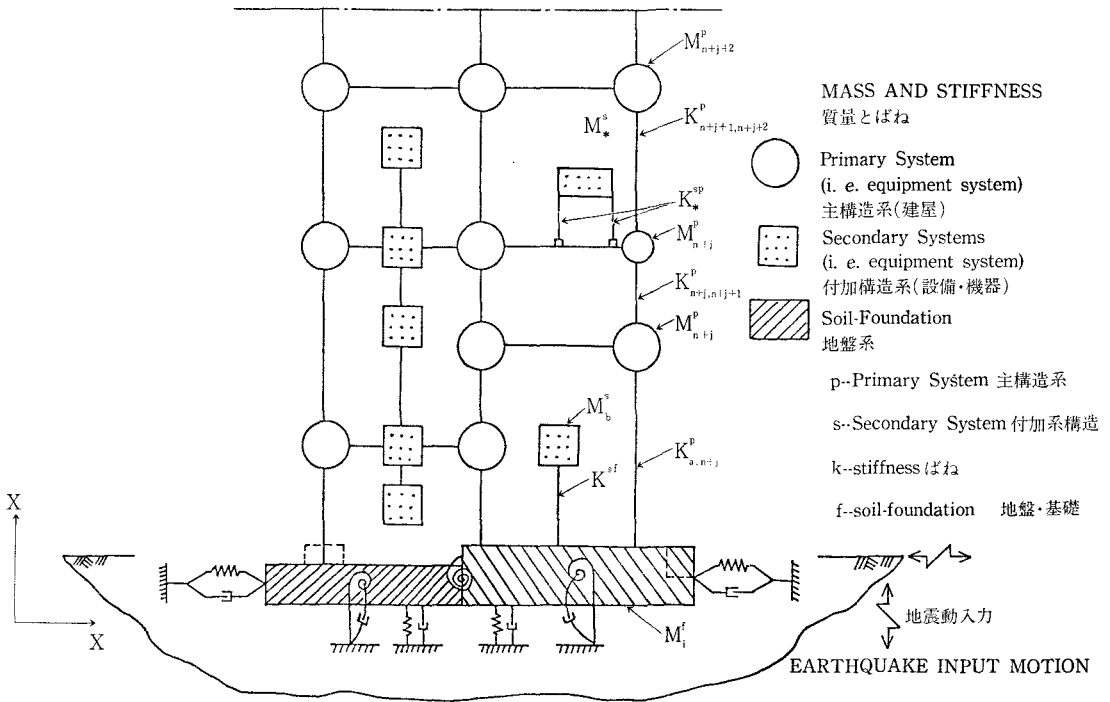


図-4

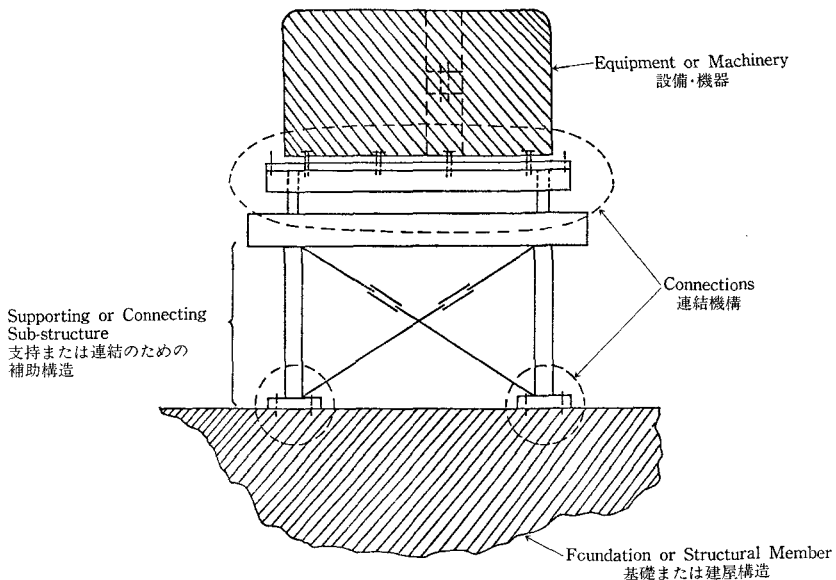
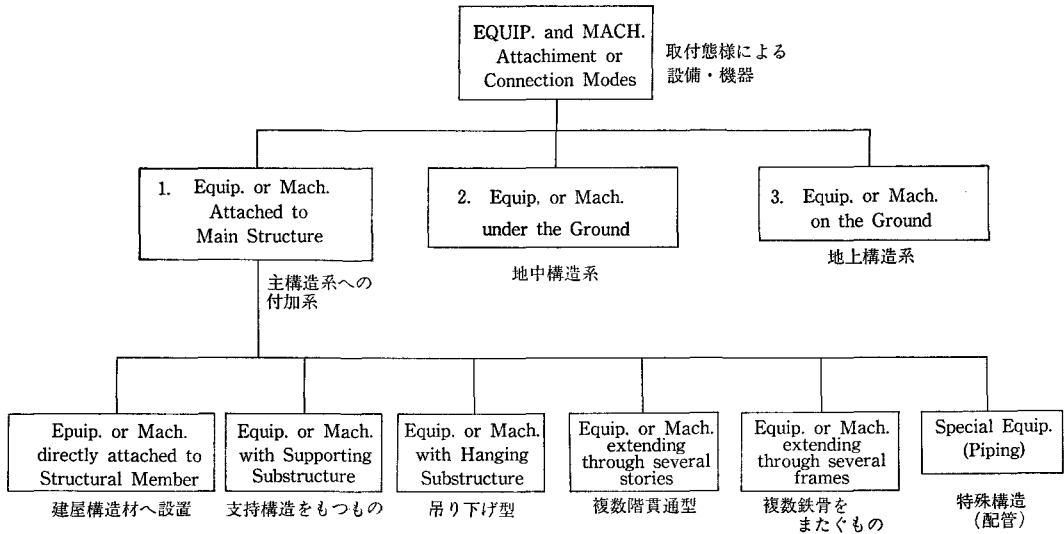
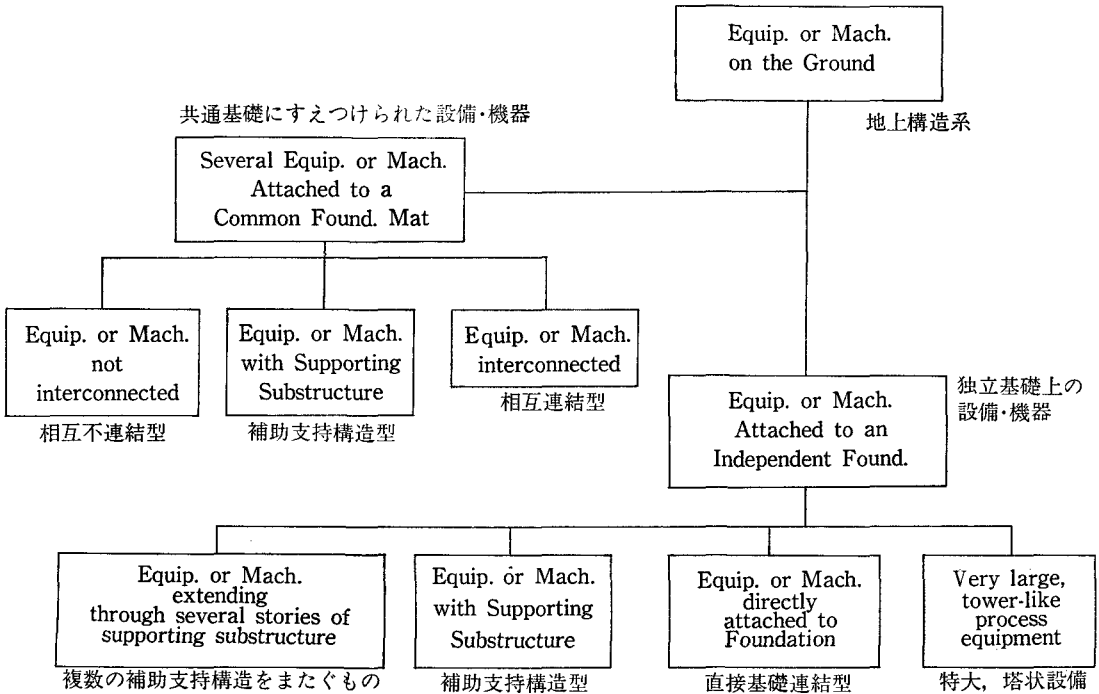


図-5



図一6



図一7

であり、高圧ガス施設の貯槽のスロッシング計算などに適用されているが、原子力機器などには使用されない。

(2) 静的震動法

設計計算に当たって、地震の加速度による慣性力に着目

して加速度に対する重力加速度の比、Kの値をもとに、静力学的に計算する方法であり、比較的剛性の高い（短周期）構造物に対して用いられてきた。

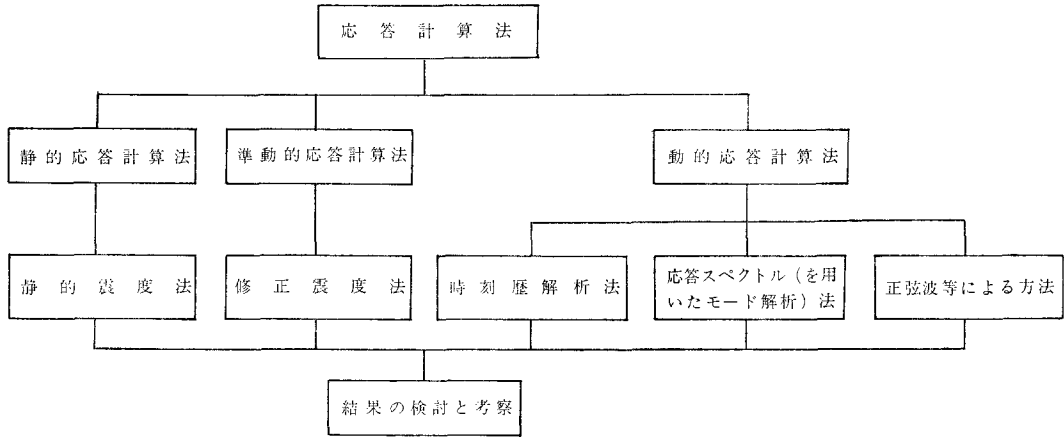


図-8 機器・配管系の地震応答計算法

表-1 原子力施設内機器・配管類の重要度分類

クラス	機器、配管類の名称
A	原子炉格納容器 (As)
	原子炉
	原子炉非常停止装置 (制御棒クラスタおよび駆動装置) (As)
	ほう素制御系 (化学体積制御系の一部)
	1次冷却材系
	原子炉格納容器スプレイ系
	アニュラス空気再循環系
	非常用炉心冷却系 (燃料取換用水タンクを含む)
B	原子炉補助冷却系 (工学的安全施設に関する補機の冷却系)
	非常用電力供給系
	安全保護設備の動作に必要な電気計測装置
	化学体積制御系 (ほう素制御系を除く)
C	原子炉補助系 (Aクラス以外のもの)
	廃棄物処理系
	補助建屋クレーン
C	タービン発電機および2次系機器
	補助ボイラ 上記AおよびBクラス以外の通常の機器および配管類

(3) 修正震動法

(2)の静的震動法は、構造物の動的特性を静的に扱うものであり、計算は容易であるが、工学的不合理性はまぬがれない。修正震動法は、構造物の1次の振動モードのみに着目し、動的応答特性をなるべく単純化して計算し

ようとするものである。モード解析や時刻歴応答解析のような手間がかからず耐震計算ができるという特徴があるため、広く用いられている。

4 原子力施設内機器・配管の重要度分類

一般に耐震設計の対象となる生産施設内の機器・配管類は、

- (1) 原子カプラントに関連するもの
- (2) 化学プラント、石油コンビナートなど一般産業施設に関連するもの

の二種類に分けて考えられる。前者は後者に比べ、放射線物質を扱っていることから、より厳しい規制が施される。ここでは、原子力施設内の機器・配管系の耐震上の重要度分類について述べる。

原子カプラント内の機器・配管系の耐震設計の主目的は、それらが破壊的大地震に遭遇し、その損傷により発

表-2 重要度クラス別の設計震度

クラス		As	A	B	C
動的解析	水平	270~405gal	180~300gal	行なわない	行なわない
	鉛直	行なわない	行なわない	行なわない	行なわない
静的解析	水平	(0.576+0.0072H)G		(0.288+0.0036H)G	(0.192+0.0024)G
	鉛直	0.288 G	0.144 G	0.096 G	

- 注1. Hは建屋の基礎からの高さ(m)。
- 2. Gは震度の単位で、1Gが重力と等しい。
- 3. galは加速度の単位で cm/s². 980 gal = 1 G。

表-3 原子力施設の対象別力学モデル

モデル種別		対象例
多質点モデル	建屋連成	原子炉圧力容器, 原子炉格納容器 原子炉圧力容器内部構造物
	非連成	配管, たて型ポンプ等
1質点モデル		横型ポンプ, 熱交換器, タンク, 液体揺動等
殻体連続体モデル		(原子炉格納容器)

生が予想される, プラント内人員及びプラント外の一般公衆への放射線災害を完全に防止しうる安全性の確保にある。従って, さまざまな緊急事態や事故状態を想定して, 例えその発生確率が非常に低い破壊モードに対してもなおその異常事態における安全性が確保されるように設計がなされなくてはならない。

この観点から, 原子力施設の耐震設計上の施設別重要度が, 地震により発生する可能性のある放射線の環境への影響をもとにして次のように定められている。

- (i) Aクラス: 自ら放射性物質を内蔵しているか, 又は内蔵している施設に直接関係しており, その機能その失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの, 及びこれらの事態を防止するために必要なもの, ならびにこれらの事故発生の際に, 外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって, その影響・効果の大きいもの。
- (ii) Bクラス: 上記において, 影響・効果が比較的小さいもの。
- (iii) Cクラス: Aクラス, Bクラス以外であって, 一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの。

Aクラスのうち, とくに重要度の高いものをAsクラスとして特別の扱いをする。表1には, こうして分けられた重要度分類の各クラスに属する原子力施設の機器・配管をまとめて示している。

詳細を述べる余裕はないが, これらのクラス別に耐震設計の評価法, 耐震許容応力などが, 専門的立場から精細に検討されている。ごく簡単にいうと, A (As)クラスに入る機器・配管類は, 各サイトごとに定められた設計用地震動により動的解析を行なわなければならない。また, Bクラスについても, 建屋(主構造系)と共振の恐れのあるものについては動的解析が必要となる。さらに, A, B両クラスに対しては, 従来の建築基準法のおおの3倍, 1.5倍の地震力を用いた静的解析もなされることになっている。

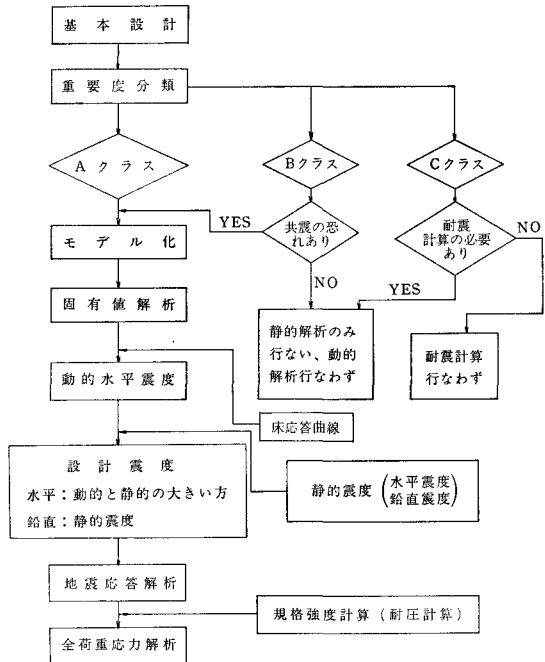


図-9 機器・配管系の地震応答解析手順

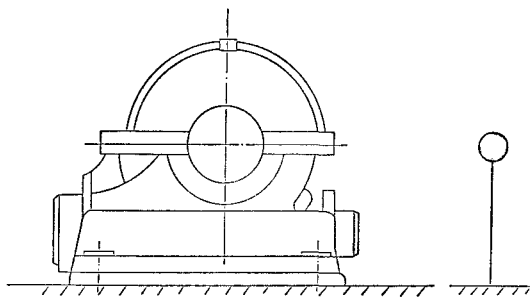


図-10 横型ポンプとその力学モデル(1質点系)

5 原子力機器・配管の耐震設計法

原子力プラント内の機器・配管系の耐震設計を行う場合, まず表1に従ってそれらの重要度分類を行う。対応するクラスごとに, 設計地震力に応じて設計震度を定めるのであるが, これは当然動的解析と静的解析の場合では異なり, 表2のようになる。機器・配管についての全体的な解析手順を流れ図に示すと図9のようになる。

ところで, 具体的に機器・配管を動的解析する場合には, 1質点モデルで行うか, 多質点または連続体で行うかという問題がある。これらのモデルは, 対象構造物別に最適なものが選ばれているが, おおよそ表3に示す通

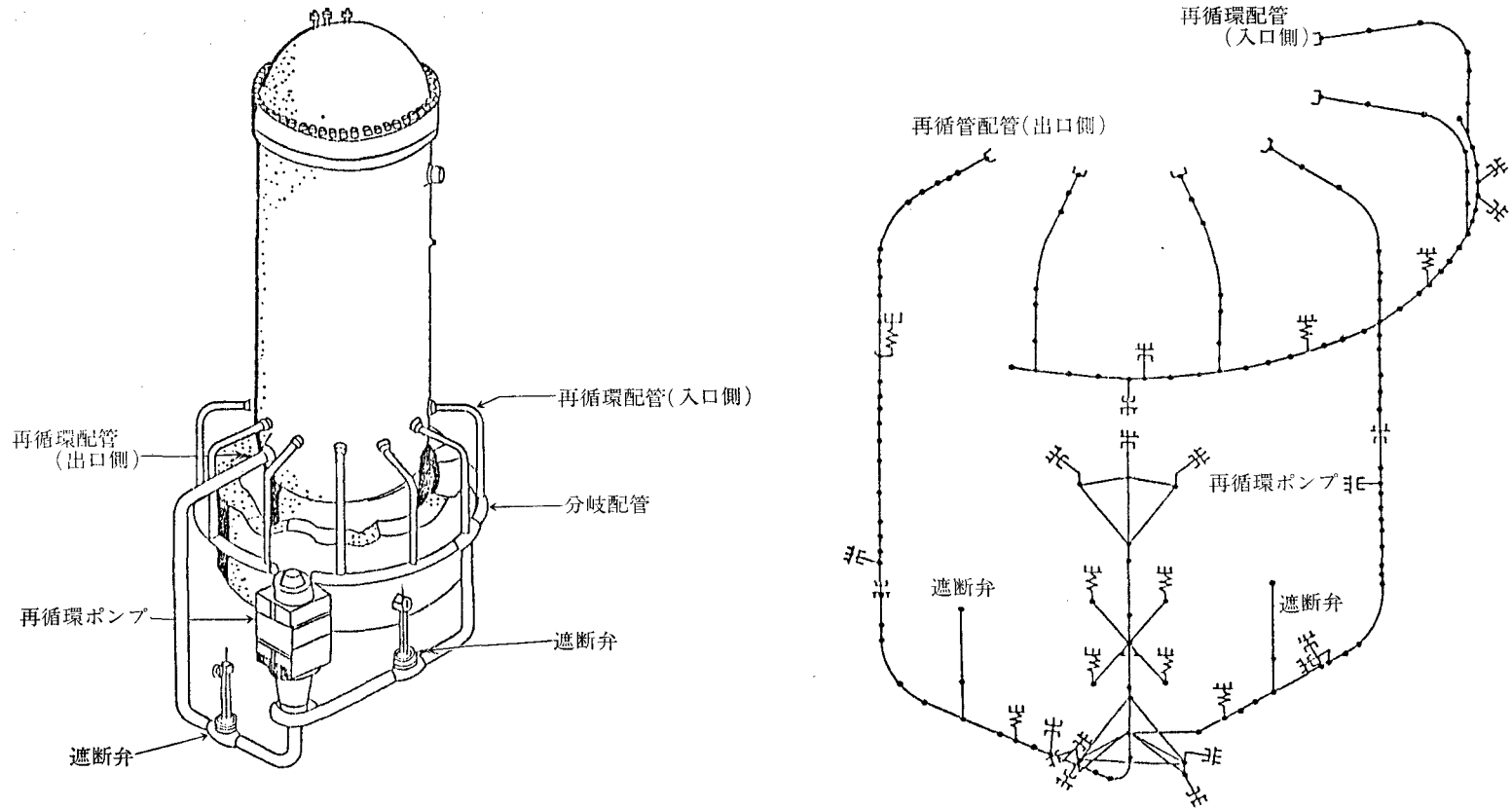


図-11 BWR 再循環配管系とその多質点力学モデル

りである。例えば、横型ポンプ、熱交換器、タンクなどは図10に示すように1質点系の力学モデルに置換して、支持構造を含めた機器全体の固有振動数を計算し、床応答スペクトルによって応答加速度を求めて地震荷重を計算することになる。一方、形状が細長で1質点系による近似が妥当でない機器や配管系、さらに原子炉压力容器、格納容器は一般に多質点系もしくは連続体としてモデル化される。図11は、沸騰水型原子炉(BWR)の代表的配管系の一つである再循環配管の概略図と、その多質点系による耐震解析モデルを示す。モデルの質点設定に当っては、配管支持装置取付点、ポンプ・バルブ等の設置点、配管口径変更点、ノズル位置等を基準として応力評価上重要な位置に質点を定めている。また、配管の曲り部においては、剛性の変化率を評価し、バルブ、ポンプ等については、等価な剛性と質量を評価したモデル化がなされている。

配管系について議論を限ると、その使用目的(高压高温用、低压低温用)、形状(小口径、大口径)、支持方式(オイルスナップ、リジッドハンガ、スプリングハンガなど)により非常に多種多様である。例えば、1100MWeのBWRプラント一基当りの動的解析対象設備は建屋、容器、ポンプ、タンクを含め約450になるが、そのうち配管が213を占める。従って配管の耐震設計の工数は大変な量になり、それに伴う経済的負担も莫大となる。

こうした状況を勘案し、計算モデル化→固有値解析→応答解析→応力解析という設計ルートの一部を計算図表の形で標準化するなどその簡略化にもさまざまな工夫がなされている。

6 おわりに

以上みてきたように、機械設備といってもその対象はきわめて広範囲であり、建築・土木構造物と比較して、耐震設計法を一律に集約しにくい要素があまりにも多い。他の諸分野ですすめられている耐震基準や指針との整合性もはかりつつ、当面は下記の諸課題などを中心にした設計改善策が望まれている。

1. 機器・配管系の設計計算の標準化
2. 耐震設計用標準プログラムの開発

3. 簡易耐震設計計算法の確立
4. 弾塑性設計方式の確立
5. 標準機器の耐震性能の表示法の確立
6. 設計マージンの評価法の確立
7. 地震時停止レベルの決定と地震後検査の定型の確立

大都市施設の中で、生産施設と住民とのかかわりは非常に大きい。この観点から、本稿が行政及び研究機関の関連各位に僅かでも参考になれば幸いである。

終りに、図、表を含め引用及び参考にさせて頂いた文献の著者の方々に深甚の謝意を表わす。

参 考 文 献

鈴木浩平

- 1980 「高压ガス施設の地震対策について」
『総合都市研究』11号, pp. 79~93

大蔵省印刷局

- 1981 「高压ガス設備等耐震設計基準」
(通産省告示515号), 『官報』号外93号,
pp. 3~28

U. Yuceglu

- 1980 「Seismic Design of Equipment Supports
and Connections in Industrial Installa-
tions」
『ASME-Preprints for PVP-73』, 80-C2

柴田 碧

- 1981 「耐震工学の現状と今後」
『耐震設計—基礎から最新技術まで—』, 日
本機械学会, pp. 15~30

清水信行

- 1981 「耐震設計の計算手法」, 同上, pp. 71~80

仲戸川哲人

- 1981 「PWR 機器・配管系の耐震設計」
『機械学会・機械系の耐震設計のための構造
動力学に関する研究分科会資料』
SD-2, pp. 1~35

落合兼寛

- 1981 「原子力発電所機械設備の地震応答解析モデ
ル」同上, SD-3A, pp. 1~21

ON A SEISMIC DESIGN OF MECHANICAL EQUIPMENTS
IN INDUSTRIAL FACILITIES

Kohei Suzuki and Shigeru Aoki

Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No. 14, 1981, pp.93—102

This report is a preliminary summary of a study program on the seismic design of equipment and machinery systems in industrial facilities.

First, a brief review of the seismic design criteria and methods of response analysis are presented. Several suggestions concerning the interaction effects among structural and equipment components are included.

Second, the discussion focuses on recent developments around anti-earthquake designs for nuclear power-plant facilities. Classification of the facilities by "their factor of importance" and design principle are mainly explained.