

JAERI-M

8350

J T -60の耐震解析 (II)
—応答解析—
(臨界プラズマ試験装置設計報告・69)

1979年7月

高津 英幸・清水 正亜・奥村 光男* 川上 誠*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

J T - 6 0 の耐震解析 (Ⅱ)

— 応答解析 —

(臨界プラズマ試験装置設計報告・69)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
高津 英幸・清水 正重・奥村 光男*・川上 誠*

(1979年6月29日受理)

即ち報告済みである解析手法及び固有値解析の結果を用いて、J T - 6 0 本体の地震時の応答解析を行った。解析は、EL CENTRO波及びTAFT波について、最大入力加速度が水平方向 200 gal、鉛直方向 100 gal の入力条件で行った。

解析によれば、装置本体は真空容器を除いてほぼ一体となって振動し、建家基礎面からの高さに比例した応答変位量を示す。上架台中央で最大 1.06 cm の変位を生じる。これに対し、真空容器は独立な動きを呈し、厚肉リング 40°セクタの変位が大きく、最大 1.72 cm の変位を示す。さらに、真空容器ベローズは、隣接厚肉リングの変位に伴う強制変形を受け、厚肉リングの振動の振幅と位相が最悪の場合を考えると生じる応力強さは約 24 kg/mm² となり、他の設計荷重との重量を考えると許容応力を越えるため、真空容器支持アームの剛性を上げる等支持系の設計変更が必要であることが明らかになった。

また、星形トラスは耐震設計上も有効であり、コンポーネントの変位を 10 ~ 30 % 抑えること、各コンポーネントの干渉は起こらないことも明らかになった。

Seismic Analysis of the JT-60 (II)

— Dynamic response analysis

Hideyuki TAKATSU, Masatsugu SHIMIZU,
Mitsuo OKUMURA* and Makoto KAWAKAMI*

Division of Large Tokamak Development,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 29, 1979)

Seismic analysis of the JT-60 was made to confirm its integrity in earthquakes in connection with any aseismatic design changes. Described are the results of dynamic response analysis of the machine under the earthquake waves of EL CENTRO 1940 (NS and UD) and TAFT 1952 (EW and UD) with maximum accelerations of 200 gal for horizontal vibration and 100 gal for vertical.

Results showed that the machine vibrates in one body except the vacuum vessel; the displacement is proportional to the height from the ground floor, and the maximum is 1.06 cm at the upper support structure. The vacuum vessel vibrates independently of the other components and the maximum displacement is 1.72 cm at a 40°-sectorial rigid ring. The bellows of the vacuum vessel are deformed forcedly due to the displacement of the adjacent rigid rings, which exerts a large stress up to about 24 kg/mm^2 on the bellows under the worst matching in vibration phase and amplitude of the rigid rings. Therefore, the need is indicated for design change of the support structure of the vacuum vessel, such as increase in rigidity of the support arms.

It was also shown that trusses of the upper support structure suppress displacement of the machine by 10-30%, and there is no geometrical interfere among the components.

Keywords: JT-60 Tokamak, Seismic Analysis, Dynamic Response Analysis,
Vacuum Vessel, Bellows, Support Structure, Stress

* Kozo Keikaku Engineering Co.

目 次

1. 序 言	1
2. 応答解析	3
2.1 解析手法	3
2.1.1 解析手法	3
2.1.2 解析条件	5
2.2 解析結果	6
2.2.1 変位応答	6
2.2.2 応力応答	8
3. 検 討	10
4. 結 言	14
謝 辞	15
参 考 文 献	15

Contents

1. Introduction	1
2. Dynamic response analysis	3
2.1 Analysis method	3
2.1.1 Analysis method	3
2.1.2 Conditions for dynamic analysis	5
2.2 Analysis results	6
2.2.1 Time dependence of displacement	6
2.2.2 Time dependence of stress	8
3. Discussions	10
4. Conclusions	14
Acknowledgement	15
References	15

図 一 覧

- 第 1.1 図 JT-60 本体の鳥瞰図
- 第 1.2 図 解析手順
- 第 2.1 図 装置全体モデルの模式図
- 第 2.2 図 建家を含む装置全体モデルの模式図
- 第 2.3 図 ステップ 2 における計算対象範囲
- 第 2.4 図 加速度応答スペクトル (EL CENTRO 波)
- 第 2.5 図 " (TAFT 波)
- 第 2.6 図 建家屋上面の最大応答変位
- 第 2.7 図 真空容器の種類
- 第 2.8 図 装置 X 方向断面上の各節点の最大応答変位 (ステップ 2)
- 第 2.9 図 上架台星形トラス取り付け部の X 方向時刻歴変位応答
- 第 2.10 図 真空容器の x 方向時刻歴変位応答
- 第 2.11 図 " y " " "
- 第 2.12 図 ボロイダル磁場コイル x " "
- 第 2.13 図 トロイダル " " "
- 第 2.14 図 変位応答の時間変位 (平面図)
- 第 2.15 図 " (断面図)
- 第 2.16 図 トロイダル磁場コイルと真空容器との間の空間

表 一 覧

第 2.1 表	解析条件
第 2.2 表	固有値解析結果 (S T モデル)
第 2.3 表	〃 (S モデル)
第 2.4 表	〃 (B S T モデル)
第 2.5 表	〃 (B S モデル)
第 2.6 表	解析ケース一覧
第 2.7 表	建家屋上面の最大水平応答変位
第 2.8 表	上架台の最大応答変位
第 2.9 表	上架台の一階床に対する相対変位
第 2.10 表	真空容器の最大応答変位 (A タイプ)
第 2.11 表	〃 (B 〃)
第 2.12 表	〃 (C 〃)
第 2.13 表	主要コンポーネントの最大応答変位 (ステップ 2)
第 2.14 表	星形トラスの最大応答応力
第 2.15 表	各コンポーネントの最大応答応力
第 2.16 表	最大応答変位
第 2.17 表	〃 応力
第 2.18 表	厚肉リングの水平面内最大変位

1. 序 言

現在、原研で建設を進めている臨界プラズマ試験装置(JT-60)は、第1.1図に示す様に、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空容器、架台、支持柱等多くの質量及び剛性の異なるコンポーネントが複雑かつ密接に配置された複合構造物である。JT-60は実験装置であるが、その装置規模及び製作費用から考えて、原子炉等と同程度の重要構造物と考えられ、その耐震上の安全性の検討が必要不可欠である。

ところで、構造物の地震時の挙動を解析する場合、解析対象を何らかのレベルでモデル化する事が必要である。このモデル化で従来よく用いられてきた手法は、解析対象の実形状を忠実に反映した有限要素モデルと、対象構造物の重量、剛性を比較的大胆な仮定の下に定めるバネ・マスモデルである。

前者は、対象構造物の実形状を忠実に反映している事から、その有する固有な振動特性も忠実に反映しているという長所を有する反面、本装置の如き複雑な構造物を解析する場合には節点数を膨大なものにしてしまい、解析に要する計算時間も莫大となる等実用的でない。一方、後者は、数少ない節点数で比較的容易に対象構造物の全体的な挙動を把握する事ができるという長所を持つ反面、対象構造物の重量、剛性の算出に当ってはそのバランスに殆んど注意が払われず、その有する固有な振動特性が保証される事は稀である。従って、各コンポーネントのみならず、装置全体の振動特性を評価する上でも大きな誤差を生ずる可能性がある。

本解析においては、JT-60全体が、いくつかの構造コンポーネントから構成されている事に着目して、各コンポーネント毎に、形状に忠実な有限要素モデル(詳細モデル)を作成してその局所的な振動特性を評価すると共に、それを基にして、工学的に適切なモデル化を行いより簡略化された数値モデル(簡略モデル)を作成し、それらを組み合わせて装置全体モデルを構築するという新しい手法を開発した。この手法は、簡略数値モデルの決定に当って、各コンポーネントの振動特性をできる限り忠実に表現できるという有限要素モデルの長所を有すると共に、節点数をある程度抑える事ができるというバネ・マス系モデルの長所も併せ持ち、かつ特殊な解析用プログラムを必要とせず、汎用構造解析プログラムと工学的知識だけで十分である等、JT-60の様に複雑な構造物の動的解析に対して有効な解析手法であると考えられる。この解析のフロー・チャートを第1.2図に示す。

この解析手法、及びその手法を用いて行ったJT-60装置の耐震解析のうち固有値解析の結果については既に報告を行っている。⁽¹⁾ ここでは、先ず、JT-60装置全体を構造コンポーネントに分割する。そして、コンポーネントの中で、その振動特性を把握する必要がある3つの主要コンポーネント、即ち、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空容器(40°セクタ及び60°セクタ)に関して、詳細モデルを作成して各々の振動特性を把握する。更に、節点数を極力抑え、かつ第1~10次迄の次数において固有周期及び固有振動モードが詳細モデルのそれと良い近似性を有する簡略モデルを作成する。また、これらと、他のコンポーネント—架台、支柱、可動リミター及び建家のモデルを組み合わせる事により約90の節点を有す

る装置全体モデルを構築した。

更に、建家も含めた装置全体モデルの固有値解析を行い、その結果、JT-60は真空容器の振動モードが優位を占め、装置に生じる固有振動モードの第1～5次（固有周期 $T_1 \sim T_5 = 0.222 \sim 0.187 \text{ sec}$ ）を占める事が明らかとなった。

本報告書では、以上述べたモデル化及び固有値解析の結果を踏まえて行った応答解析について報告を行う。先ず第2章で応答解析の概要と解析条件を述べたあと、解析結果をまとめる。更に、第3章では、応答解析の結果に関したいくつかの項目について検討を行う。そして第4章でまとめを行う。

現時点において、製作担当メーカーでは装置全体の耐震解析は未完了であるが、これらの検討内容は、装置製作担当メーカーの耐震解析に方針を与え、その解析結果のクロス・チェックに資するのみならず、より早く積極的に機器設計に反映できるバック・データを与えるものとする。

2. 応答解析

2.1 解析概要

2.1.1 解析概要

本解析の構造モデルは、別報告の「JT-60の耐震解析(I)―解析手法及び固有値解析⁽¹⁾」において構築した、S、ST、BS、BSTの4つの構造モデルを対象としており、それらに対して次式で示す運動方程式を解く。

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = -\ddot{y}_0 [M] \{P\} \quad (1)$$

ここで、

- [M] ; 質量行列
- [C] ; 減衰行列
- [K] ; 剛性行列
- \ddot{y}_0 ; 入力地震波
- {x} ; 地盤に対する相対変位
- {P} ; ベクトル

第2.1図に装置全体モデル、第2.2図に建家を含むモデル全体の模式図を示す。

本解析では、構造解析汎用プログラムSAP-Vを使用し各構造モデルに対して既に求められている固有値を用いて、モード合成法により応答履歴解析を行う。モード合成法では、構造物の応答は、P個の固有振動モードによって適切に表現できると仮定しているが、Pの値は固有値解析の結果から、第2.1表に示す値とした。

なお、4つの構造モデルは、以下に記す観点からJT-60本体の地震時の挙動を調べるものであり、そのモデル規模を第2.1表に併せてまとめる。

- (i) Sモデル …… 装置モデル、星形トラスなし。
装置基礎入力によって、装置単独の振動特性を調べるモデルである。
- (ii) STモデル …… 装置モデル、星形トラス付き。
装置基礎及び星形トラス端同位相入力により、建家が非常に剛な場合の装置の振動特性を調べるモデルである。
- (iii) BSモデル …… 建家-装置モデル、星形トラスなし。
装置の振動特性に与える地盤、建家の影響を考慮するモデルである。但し、星形トラスのない場合、もしくは地震時に星形トラスが座屈し、装置に対して拘束効果を持たない場合を想定している。
- (iv) BSTモデル …… 建家-装置モデル、星形トラスあり。
装置の振動特性に影響を与えると考えられる全ての影響(建家、地盤、星形トラス)

を考慮するモデルであり、実機の条件に最も近いモデルである。

既に得られている4つの構造モデルの固有値解析の結果を第2.2表から第2.5表に示す。

本解析では、上記4つの構造モデルの各々に対し、数種類の荷重条件の下で応答計算を行う為、解析ケースは20ケース以上となる。本モデルの様に多数の節点、要素を持つ構造物に対し、全解析ケースに渡って全節点、全要素の応答を解析し出力する事は、いたずらに計算時間及び出力量を膨大なものにするのみであり得策ではない。そこで、本解析では、解析を2つのステップに分け、各ステップで観点を変えた解析を行う。即ち、ステップ1では、4種類の構造モデル全般に対して全20ケースの応答計算を、代表的な節点及び要素について計算し、全体的な傾向を把握する。次に、ステップ2では、ステップ1の結果より、最も不利な解析ケースを選択し、装置の1/4の部分抽出してより詳細な検討を加える。

ステップ1及び2について以下に具体的に記す。

(i) ステップ1

対象とする構造モデルは、S、ST、BS、BSTモデルの全てであり、各モデルの主要な部位の最大応答変位及び最大応答応力を出力する。そして、同一入力波で、どの部位に応力、変位が大きく発生するのか等モデルの全体的な傾向を調べると共に、入力波の相違によって各部位の応力、変位がどのように変わるかを検討する。更に、これらの検討から、次のステップ2で採用する装置の1/4部分、入力波の種類及び入力方向を決定する。

ステップ1で応答変位、応答応力を求める節点、要素は、構造物全体の応答性状を知る目的から、下記の判断基準に基いて決定した。即ち、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルの各コイルユニットに関しては、入力波方向に平行に（もしくは最も平行に近く）取り付いている1ユニットと、それに直交する1ユニットの主要な部位とする。真空容器は特に入力波の方向に関係なく、各容器の支持アーム部分、ベローズ部分及び厚肉リング部の主要な部位とし、そして星形トラス、中心支柱、可動リミタ等架台はその主要部位とする。

(ii) ステップ2

ステップ2で解析対象とするのは、ステップ1の結果より最も不利なケースである事が判明したBSTモデルである。このモデルの装置部分の1/4を抽出し、そこに含まれる各コンポーネントの全部位の最大応答応力を出力し、真空容器、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルの応力を調べる。

一方、各コンポーネントの変形を出力し、最大変位からコンポーネント間の相対変位を検討し、更に全体の変形状態を把握する為に、最大変位の出現する前後の変形図を作成する。

ステップ2の応力応答では、第2.3図で斜線で示す装置の1/4部分に含まれる真空容器、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル及び支柱の全要素、並びに星形トラス及び可動リミタの全要素、更に架台の代表的要素について応答応力を求める。

また、変位応答では、X方向入力に対して、第2.3図に示す装置中央のX方向断面（A-A'断面）及び真空容器上の各節点において応答変位を求める。

(iii) 解析ケース

ステップ1及び2の解析ケースの一覧を第2.6表にまとめる。ステップ1では、第2.6表に示す20ケースについて応答解析を実施した。但し、S、STモデルのT A F T波及びSモデ

ルの鉛直方向入力に対する応力計算は省略する。

ステップ2では、ステップ1の結果より判断し、装置各部の応力が最も大きいとみられる主要コンポーネントの全要素及び可動リミタ、星形トラスの全要素並びに架台の代表的部分について、T A F T波のX方向入力に対する応力の計算を行う。更にEL CENTRO波のX方向入力に対する変位応答の時刻歴を、X方向中央断面上及び真空容器上の節点等について出力する。

2.1.2 解析条件

(i) 入力波

入力地震波は、過去の著名な地震記録のうちから一般に最も良く用いられている次の2記録4成分を採用する。

EL CENTRO	Calif	1940	NS及びUD成分
T A F T	Calif	1952	EW及びUD成分

これらはいずれも比較的堅固な地盤における記録であり、今回対象とするJT-60建設地点の地盤のボーリング結果を検討した結果、類似している為そのまま用いるものとする。両者の加速度応答スペクトルを第2.4図と第2.5図に示す。

各解析ケースの入力地震波及び入力方向は第2.6表に示す通りである。ここで水平方向(X及びZ方向)の入力に対しては各記録の水平成分一即ち、EL CENTROのNS成分、T A F TのEW成分を、上下方向(Y方向)の入力に対しては各記録の鉛直成分一即ち、UD成分を用いる。

最大加速度は、水平入力においては200 gal、上下入力では100 gal、となる様補正して入力する。

(ii) 減衰定数

本応答解析に用いるプログラムSAP-Vのモード合成法による解析では、対象モデルを構成する部材の個別的な減衰定数の指定はできず、全構造体に1つの値しか指定できない。従って、S、ST、BS、BSTモデルの各々に対して単一の減衰定数の評価が必要となる。しかしながら、現状としては各モデルのマクロな減衰定数を評価する事は、基礎データに乏しく困難である為、以下に記す方法によって減衰定数を決定する。

S、STモデルでは、構成材の大部分が非磁性鋼、Ni基合金、銅である為、鉄骨構造物の解析に一般的に多用されている減衰定数 $h = 1.0\%$ ⁽²⁾を採用する。

BS、BSTモデルにおいては、建家が鉄筋コンクリート構造物であり、一般に減衰定数 $h = 5.0\%$ が採用されているのに対し、装置は既に述べた様に一般の鉄筋構造物に準じる構造物で $h = 1.0\%$ が採用されている為、両者に関きがある。不均一な減衰分布を有する構造物を厳密に取り扱うには、複素固有値解析を行う必要があるが、一般に困難である。近似減衰定数を与える計算手法等も提案されているが、ここでは、本モデルが建家と装置の連成系モデルである事に着目して、モデル全体を簡単なバネ・マス系に置換し、これによって連成系の振動特性に与える減衰定数の影響を把握し、それを基にしてモデル全体としての減衰定数を求めるという手法を採った。直接積分法による解析の結果、建家、装置ともに $h = 5\%$ とした場合と、建家 $h = 5\%$ 、装置 $h = 1\%$ とした場合とで装置の応答に殆んど有意な差が無かつた事から、

BS, BSTモデルでは, $h = 5.0\%$ を採用するものとする。

各モデルの減衰定数を第2.1表にまとめる。

(iii) 応答計算時間

応答計算時間は, 最大応答が得られる事を考慮し, 応答計算刻み時間は, 各合成モード次数の固有振動モードを十分に含み得る事を配慮して第2.1表に示す様に決定した。

2.2 解析結果

2.2.1 変位応答

(i) ステップ1

ステップ1で行った20ケースの応答解析の変位応答の結果を第2.7表から第2.12表にまとめる。

第2.7表は, BSTモデルの屋上面における最大応答変位の水平成分を示す。当然, 建家の弱軸であるX軸方向入力の場合のX方向変位が最も大きく, 最大変位で1.10 cm (TAFT)であり, 一方, Z方向変位の最大値は0.70 cm (EL CENTRO)である。また, 全体的な傾向として, X方向入力に対してはTAFT波の方がX方向変位が大きく, Z方向入力に対してはEL CENTRO波の方がZ方向変位が大きい。

第2.6図は, 屋上面の平面図であり, 主要節点の変位が示されているが, この図から明らかな様に, 建家はX方向に加振された場合に可成り偏心した応答を示す。

建家の変形に関しては第3章において更に検討を行う。但し, BSモデルとBSTモデルでは建家の応答に有意な差が見られなかった。これは, 装置の総重量約4,000 tonに対し, 建家の総重量が約145,000 ton (基礎を除く)と圧倒的に大きく, BSTモデルで建家3Fと装置上架台とを連結しても, 建家の応答はBSモデルとほとんど変わらないと思われる。

次に, 第2.8表に上架台中央の節点の最大応答変位を示す。S, STモデルでは, 上架台の最大水平応答変位は, 入力波や入力方向にかかわらず0.10 ~ 0.15 cm程度であり, ほぼ同じ様な値を示す。STモデルは星形トラスにより上架台の変形を拘束する様に見えるが, 解析の仮定上, 全ての固定点が入力波に従って振動するので, 架台は逆に星形トラスから加振力を受ける事になる。従って, 地動との相対変位は必ずしもSTモデルの方が小さくはならない。

一方, 建家を含むBS, BSTモデルでは, 架台の変形は星形トラスの有無で大いに異なる。これは, 装置の総重量が建家の総重量の約 $1/36$ と小さい為, 建家の場合とは逆に, 架台と建家3Fが星形トラスによって連結される事により相互作用によって架台が大きな影響を受ける為である。第2.8表からわかる様に, 星形トラスの存在により上架台の変形は約3 ~ 18%減少している。

また, 第2.9表には, BS, BSTモデルにおいて, 装置が設置される床面(1F)上の節点と, 上架台中央の節点との相対変位を, 各々の節点の最大変位の差として近似的に求めた数値を示す。但し, 建家のロッキング変形による影響は除去されていない。この値は, あく迄概略値であるが, 星形トラスの連結効果はより著しく, トラスの存在により上架台の変形は約13 ~ 28%減少する。

上架台の変形の全体的な傾向としては建家と同様であり、X方向入力ではT A F T波による応答が大きく、Z方向入力ではE L C E N T R O波による応答の方が大きい。

第2.10表から第2.12表には、真空容器厚肉リング端の変位の最大値を、その真空容器セクタのタイプ別に示す。真空容器は、形状及び支持方式により第2.7図に示す様に3つのタイプに分類され、各タイプ毎に振動特性が異なる事が、その固有値解析⁽¹⁾で明らかになっている。真空容器は、装置各コンポーネントの中で最も大きな変位を示す。これは、固有値解析の結果から考えて当然の事である。

応答性状の違いは応答変位にも明らかに現れており、以下に各タイプ別の変形性状を述べる。
タイプA；40°セクタで60°セクタの両側に設置されるもの。

X方向入力及びZ方向入力のいずれに対しても変形が大きく、各々最大値は1.58、1.72 cmである。変形の方法は接線方向である。変形はE L C E N T R O波よりT A F T波の方が大きい。

タイプB；40°セクタでタイプAの40°セクタにはさまれて設置されるもの。

Z方向の入力に対して大きく振動する。X方向の入力に対しては上下に大きく振動する。

タイプC；60°セクタ

X方向の入力に対して大きく振動する。Z方向の入力に対しては上下に大きく振動する。上下方向の入力に対しては、第2.10表から第2.12表で明らかな様に、各タイプ共々の最大値はほぼ同じ値である。この場合、水平方向の変位は比較的小さいので、結局、上下方向の入力に対しては、水平方向の入力に比べて、真空容器厚肉リング間の相対変位はかなり小さいと云える。

(ii) ステップ2

ステップ2では、BSTモデル、E L C E N T R O波、X方向入力時における装置各部の変位分布、時間変化を調べた。

第2.8図には、第2.3図に示す装置X方向断面上の各節点における最大応答変位を示す。更に、同図より主要コンポーネントのX方向及びY方向の変位の最大値を抽出して第2.13表にまとめる。最大応答変位は、X、Z方向のいずれも真空容器に生じ、各々0.74、0.54 cmである。また、いずれのコンポーネントもX及びZ方向最大応答変位は、地震動開始後3秒以内に生じている。特に、X方向最大応答変位は、全てのコンポーネントで同一の時刻に発生している。

第2.8図からわかる様にトロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルは同程度の変位であり、これらのX方向変位は上下架台のX方向変位を高さ方向に内挿した値にほぼ近い。即ち、上下架台、支柱、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルは、ほぼ一体となって変形し、高さ方向に直線的な変位分布を示している。これに対し、真空容器のみが独立な動きを呈している事がわかる。

第2.9図から第2.13図には、主要コンポーネントの代表的な節点の変位の時刻歴を、地震動開始後3.5秒迄末す。第2.9図は、上架台の星形トラス取り付け部のX方向応答変位を示している。同様に、第2.10図、第2.11図には真空容器厚肉リングのX方向応答変位、Y方向応答変位を、また第2.12図、第2.13図には、ポロイダル磁場コイルとトロイダル磁場コイ

ルの代表的節点のX方向応答変位を示す。

真空容器の水平面(X-Z面)内の変形と装置のX方向断面の変形を、各々、地震動開始後3.37, 3.41, 3.45秒の3時刻についてプロットしたものを第2.14図及び第2.15図に示す。これらの時刻は第2.10図に示す様に、真空容器の変位が極大となる時刻と、その前の2時刻を選んだものであり、全体的な変形の進行状況を把握する事ができる。第2.14図を見ると、タイプAの真空容器が水平面内で大きく振動している事がわかる。また、第2.15図からも、上下架台、支柱、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルは、ほぼ一体となって変形し、高さ方向に直線的な変位分布を示しているのに対し、真空容器は独自の動きを呈し、上下方向の振動が顕著である。

なお、水平面内の真空容器の変位は第3章で更に検討を加える。

2.2.2 応力応答

(i) ステップ1

ステップ1では20ケースに渡る応答解析を行ったが、各コンポーネントの詳細な応力値は、ステップ2で行う最も厳しいケースであるBSTモデル、TAF T波、X方向入力時の解析で検討を行う。ここでは、建家及び装置の設計に重要な影響を与える星形トラスの最大応答応力の解析結果を第2.14表に示す。星形トラス支持床スラブの支点反力は、支点到結合される2本のトラスの最大応答応力から次式を用いて算出する。

$$\begin{Bmatrix} P_H \\ P_V \end{Bmatrix} = (N_1 + N_2) \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

但し、ここで

P_H ; 支点反力(壁に対して平行成分)

P_V ; 支点反力(壁に対して鉛直成分)

N ; 星形トラス軸力

θ ; 星形トラスと壁がなす角度

この場合、2本の星形トラスの最大応力の発生時刻の違い及び軸力の符号を無視し、最も危険な状態を想定したものである。

第2.14表からわかる様に、星形トラスの応答応力は、波の入力方向と星形トラスが取り付く床の剛性の効き方で、解析ケース毎にその最大応力応答の発生位置が異なる。各ケースの中の最大値は、BSTモデル、TAF T波、X方向入力の場合であり、第2.14表に示す星形トラス1, 2に発生しており、軸力124,94 tonである。また、この軸力を建家3F床スラブに面内力として伝えた場合、壁に垂直方向、平行方向の反力は、各々184 ton及び115 tonとなる。

(ii) ステップ2

ステップ2では、BSTモデル、TAF T波、X方向入力時における装置各コンポーネントの詳細な応力応答を求める為、BSTモデルの1/4部分を抽出し、それに含まれる真空容器、

トロイダル磁場コイル，ポロイダル磁場コイル，支柱，可動リミタ，星形トラスの全要素，並びに架台の代表的部分の要素の応力を求めた。第2.15表に，主要コンポーネント毎に最大応力を示す要素を抽出し，その最大応力の算出結果をまとめる。ここで，梁要素に対しては，軸方向応力 σ_1 ，これと直交する2方向の曲げ応力 σ_2 ， σ_3 及び剪断応力 τ を示し，シェル要素に対しては x ， y 方向の応力 σ_x ， σ_y 及び剪断応力 τ を示す。なお，ここでペローズの応力は異方性板に対して与えられており，ペローズの局所的な応力を応力変換式^⑥ から求めると，ペローズの山表面で，トロイダル方向応力 $\sigma_1 = 5.5 \text{ kg/mm}^2$ ，ポロイダル方向応力 $\sigma_2 = 0.1 \text{ kg/mm}^2$ ，剪断応力 $\tau = 4.1 \text{ kg/mm}^2$ である。

第2.15表からわかる様に，真空容器支持アーム，ポロイダル磁場コイル支持柱及びトロイダル磁場コイル補強枠で大きな応力が生じるが，いずれもそれだけで許容応力を越える事は無い。

3. 検 討

(i) 応答に与える入力波の加速度応答スペクトルの影響

建家屋上面の応答変位を第2.7表に示したが、これを見ると明らかな様に、X方向とZ方向で最大応答を記録する入力波が異なる。即ち、X方向ではT A F T波を入力した時の応答が大きく、Z方向ではE L C E N T R O波を入力した時の応答が大きい。これはE L C E N T R O及びT A F Tの原波形の加速度応答スペクトルの影響であると考えられる。

第2.4図及び第2.5図に、E L C E N T R O波とT A F T波の原波形の加速度応答スペクトルを示したが、一方、建家及び装置から成るB S, B S Tモデルの固有値解析⁽¹⁾で明らかになった様に、建家のX方向の振動の第1次固有周期は0.23秒(B S, B S Tモデルでは第5次モードに相当)であり、Z方向の振動の第1次固有周期は0.20秒(同、第10次モードに相当)である。これより、E L C E N T R O波の場合、第2.4図に示す様に、X方向の振動に対する加速度応答倍率は2.2であり、Z方向の振動に対しては3.2である。また、T A F T波の場合、第2.5図に示す様に、X方向の振動に対する加速度応答倍率は3.0であり、Z方向の振動に対しては2.8である。従って、X方向の振動に対してはT A F T波を入力した場合の方が応答が大きく、Z方向の振動に対してはE L C E N T R O波を入力した場合の方が応答が大きい事がわかる。

同様に、真空容器が振動する低次のモード(同、第1~4次モードに相当)の固有周期は0.22~0.21秒である。これを入力波の加速度応答スペクトルで見ると、加速度応答倍率で表わして、E L C E N T R O波で2.4~2.9倍、T A F T波で3.2倍を呈している。この事は、真空容器の応答では、T A F T波に対する応答変位がE L C E N T R O波に対するものより大きい事と合致する。

(ii) 建家の変形

第2.7表に示す様に、建家屋上位置での最大変位は、B S TモデルでX方向1.10cm(T A F T波)、Z方向0.70cm(E L C E N T R O波)である。これらと基礎位置との相対変位は、各々0.65、0.31cm程度であり、階高で除した剪断歪は(0.6~1.3)×10⁻⁴とコンクリートのひび割れ限界3×10⁻⁴に比べて十分小さい。但し、相対変位値の算出に基礎のロッキングは考慮していないので、実際の歪は更に小さいと思われる。

また、第2.6図に示す様に、X方向の入力に対しては建家全体がねじれ変形を示す。即ち、X方向入力に対しA側の変位はB側の変位より約50%大きい。しかし、上記2つの変位差を距離で除してねじれ角を求めると5.0×10⁻⁵と極めて小さく強度上問題にはならないと思われる。

(iii) 星形トラスの有無による応答の相違

装置上架台に取り付けられる星形トラスは、トロイダル磁場コイル励起時に生じるトロイダル磁場コイルの転倒力を上架台が支持している事から、その上架台のねじれを抑える目的で設置されている。一方、耐震設計では、星形トラスを取り付けた場合、それが取り付く上架台及

び建家3F床スラブに一部応力の集中が生じると考えられるが、それによって装置の全体変形がよく拘束されるという事から、各コンポーネントの振動が一般的に抑えられ、その結果、内部応力も小さくなるものと考えられる。この星形トラスの効果を定量的に検討する。

第2.16表に、BS、BSTモデルの代表的節点の最大応答変位の比較、第2.17表には、同じモデルの代表的要素の最大応答力の比較を示す。これらの数値は、全体的な傾向を調べる為に、最大応答のみに着目したものであり、表中の数値は必ずしも同一の入力波に対応するものではない。

第2.16表からわかる様に、変形の拘束は、上架台(トロイダル磁場コイルも含む)、ポロイダル磁場コイル、可動リミタについては顕著であるが、真空容器に関しては有意な差がない。これは、上架台等が星形トラスの拘束効果を直接受けるのに対し、真空容器は上架台との結合が弱く、上架台が星形トラスで支持されるか歪かは真空容器の応答にとって大きな影響がない為と考えられる。

一方、応力に関して調べると、第2.17表からわかる様に、上架台については星形トラス付きの場合の方が応力が大きい。しかし、ポロイダル磁場コイルについては、星形トラスにより上架台の変位が拘束される為、必然的にポロイダル磁場コイルの歪が少くなり応力は減少する。真空容器については変位同様有意な差がない。なお、第2.17表では、可動リミタに生じる応力がSTモデルに比べてBSTモデルで極めて大きい事が目立つが、これは上架台の固定度が上がった事により、いわゆるむち打ち現象的な応答性状になった為と考えられる。

(V) 各コンポーネント間の干渉

JT-60の様に、多くのコンポーネントが空間的に複雑に、かつ密接に配置されている構造物では、地震動を受けた場合のコンポーネント相互の干渉に対する裕度を検討しておく必要がある。JT-60の場合、第2.8図で見た様に、架台、支柱、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルはほぼ一体となって変形しており、それら相互の空間を考えれば干渉は問題とならない。一方、真空容器は、他のコンポーネントとは独立な振動性状を呈しており、かつその絶対値も最大である為、その空間的な干渉、即ち真空容器とそれを取り囲むポロイダル磁場コイル支持枠との干渉は検討を要する。そこで第2.8図に示した装置断面の変位分布を基に検討を行う。

真空容器のトラス最内周節点のX方向変位の最大値は0.74cmであり、最近傍のポロイダル磁場コイル支持枠の節点のX方向変位が0.64cm程度であるので両者の相対水平変位は0.10cm程度である。

真空容器の上下動は、最大で0.54cmであり、一方、ポロイダル磁場コイル支持枠の鉛直方向変位は非常に小さいので無視すると、両者の相対鉛直変位は0.54cm程度である。

真空容器のトラス最内周節点の上下の節点に着目すると、この節点の水平、鉛直方向の最大変位は0.74、0.50cm程度であり、一方、これらの節点の近傍のポロイダル磁場コイル支持枠の水平変位は、小さいもので0.61cm程度であり、鉛直方向の変位は非常に小さく無視すると、両者の相対変位は単純なベクトル合成から $\sqrt{(0.74 - 0.61)^2 + 0.50^2} \cong 0.52$ cmとなる。

以上の検討から、第2.8図で示した断面での真空容器とポロイダル磁場コイル支持枠との相

対変位は、トーラス最内周部でトーラス主半径方向に約0.10cm、上下部で鉛直方向に約0.54cm、斜め方向には約0.52cm程度である事がわかった。但し、第2.8図に示す変位分布図は、真空容器の最大変位が0.74cmであるケースを示しているが、第2.10表からわかる様に、全てのケースで変位が最大となるのはT A F T波、Z方向入力の場合であり、変位は1.72cmであるから、この場合は上記数値の約2.3倍の相対変位であるものと思われる。従って、最大相対変位は、

水平方向	0.23cm
鉛直方向	1.24cm
斜め方向	1.20cm

程度である。真空容器とトロイダル磁場コイルサポートとの間の空間には、第2.16図に示す現在の設計からも明らかな様に温度制御層等が設置される為、両者のギャップは非常に小さいが、上記の値であれば地震時に相互の干渉は生じない。

(V) 真空容器の水平面内での変位

(IV)において真空容器とトロイダル磁場コイルサポートとの干渉を検討したが、真空容器の変位応答は厚肉リングにはさまれるベローズの強制変位という点からも注目する必要がある。即ち、真空容器は8つの厚肉リング(既に見た様にAタイプ40°セクタ4つ、Bタイプ40°セクタ2つ、Cタイプ60°セクタ2つ)と8つのベローズが交互に配置された構造であるが、前者の剛性が後者のそれに比してはるかに高い為、前者の変位に伴った強制変位を後者は受ける。この強制変位によってベローズに生じる応力が可成り大きいと予想される為、以下に検討を行う。

真空容器の最大変位はトーラス最内周節点で生じる。この節点のX、Z方向の最大変位を δ_x 、 δ_z とし、また、この節点の近傍の変位をトロイダル磁場コイルの節点で代表し、 δ_x^* 、 δ_z^* とすると、真空容器の最大相対変位 δ_R は

$$\delta_R = \sqrt{(\delta_x - \delta_x^*)^2 + (\delta_z - \delta_z^*)^2} \quad (3)$$

で与えられる。また、各節点のトロイダル方向、及び主半径方向の最大変位 δ_θ 、 δ_r は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \delta_\theta \\ \delta_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_x - \delta_x^* \\ \delta_z - \delta_z^* \end{Bmatrix} \quad (4)$$

但し、ここで θ は、各節点のトロイダル方向とX軸とのなす角度である。第2.10表から第2.12表に示す応答変位の最大値から算出した各最大変位量を第2.18表にまとめる。この算出に用いた各応答変位の最大値は、必ずしも同一時刻の値ではないが、厚肉リングにはさまれたベローズの厚肉リングによる強制変位量の上限を与えるものと考えられる。これによると、ベローズが受ける可能性のある最大圧縮(もしくは引張り)歪 ε と剪断歪 μ は

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} = \frac{1.99 + 0.99}{55.0} = 5.42 \times 10^{-2} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\delta'}{\ell} = \frac{0.31 + 0.31}{55.0} = 1.13 \times 10^{-2} \quad (6)$$

ℓ : ベローズのスパン長

である。

一方、第2.16表で示したベローズの最大応力は、BSTモデル、TAFT波、X方向入力の場合であり、その時のベローズ頂部の最大応力強さは約 10 kg/mm^2 である。この場合、ベローズの受けているトロイダル方向の圧縮歪と剪断歪は次式より求まる。

$$\varepsilon = \frac{\delta_{xx}}{D_{11}^P} = \frac{0.0451}{2.39} = 1.88 \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\tau}{D_{33}^P} = \frac{4.15}{8.09 \times 10^2} = 5.13 \times 10^{-3} \quad (8)$$

ここで、

δ_{xx} : トロイダル方向膜応力

τ : 剪断応力

D_{11}^P : ベローズのトロイダル方向面内剛性

D_{33}^P : ベローズの剪断剛性

であり、また、

$$D_{11}^P = \frac{bt^3 E}{12I(1-\nu^2) \left(1 - \frac{b^2 t^3 u^2}{12I b_w}\right)} \quad (9)$$

$$D_{33}^P = \frac{bE}{2b_w(1+\nu)} \quad (10)$$

である⁽³⁾。(5)、(6)式と(7)、(8)式との比較から、最大で圧縮歪で約2.9倍、剪断歪で約2.2倍の値を取り得る可能性がある。この場合最大応力強さは約 24 kg/mm^2 となり、他の設計荷重⁽⁴⁾との重畳を考えると、ASME SEC. IIIの許容応力を越える為、真空容器支持アームの剛性を上げる等支持系の設計変更が必要である。

4. 結 言

既に報告済みである解析手法及び固有値解析の結果を基に、JT-60本体の地震時の応答解析を行った。解析は、EL CENTRO波及びTAFT波について、最大入力加速度が水平方向200gal、鉛直方向100galの入力条件で行った。

装置本体は真空容器を除いてほぼ一体となって振動し、建家基礎面からの高さにはほぼ比例した応答変位量を示す。上架台中央で最大1.06cmの変位を生じる。これに対し、固有値解析でも見た様に、JT-60は真空容器の振動が卓越するモードが優位を占めており、その応答解析でも真空容器は独立な動きを呈している。特に厚肉リング40°センタの変位が大きく、最大1.72cmの変位を示す。

JT-60の様に、多くのコンポーネントが空間的に複雑かつ密接に配置されている構造物では、地震時の各コンポーネント間の干渉が問題となり、特にその構造から真空容器とポロイダル磁場コイル支持枠との干渉が懸念されるが、本解析の結果、干渉は起きない事が明らかになった。

応力応答に関しては、真空容器ベローズ、真空容器支持アーム、ポロイダル磁場コイル支持枠及びトロイダル磁場コイル支持枠で大きな応力が発生する。特に真空容器ベローズは、隣接厚肉リングの変位に伴う強制変形を受け、これによる応力が大きい。厚肉リングの振幅と位相が最悪の場合を考えると、ベローズに生じる最大応力強さは約 24 kg/mm^2 となり、他の設計荷重との重畳を考えると許容応力を越える為、真空容器支持アームの剛性を上げる等支持系の設計変更が必要である。

星形トラスは、それが取り付く上架台及び建家3F床スラブに一部応力集中が生じるが、それにより装置の全体変形がよく拘束され、その結果、内部応力も小さくなる等耐震設計上も有効である事がわかった。即ち、星形トラスの存在により真空容器以外は変位が10～30%程度抑えられ、また応力も大きく減少するのに対し、星形トラス取り付け座部(建家3F)の反力は高々200ton程度となるが、これは建家設計上は問題ないと思われる。

謝 辞

本研究の遂行に際し終始御支援を戴いた磯康彦大型トカマク開発部長，吉川允二同次長に感謝致します。また本報告書を作成するに当り，終始有益な御指導を戴いた飯島勉JT-60第2開発室長，太田充本体開発グループ・リーダーに深く感謝致します。また解析データの作成等多くの作業に御協力戴いたJT-60第2開発室及び構造計画研究所の各位に対しても深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1)(1) Takatsu, H., Shimizu, M., Okumura, M., Kawakami, M.; JAERI-M 8155 (1979).
- (2) 原子炉等安全審査委員会; 原子炉等の耐震設計所内指針(1975)内部資料.
- (3) Morishita, O., Takatsu, H., Takashima, T., Yamamoto, M., Ohta, M., Yoshii, A., Suzuki, M.; JAERI-M 6822 (1976).
- (4) Takatsu, H., Yamamoto, M., Shimizu, M., Ohta, M., Saigo, T., Miyata, H., Sato, H., Itoh, Y.; Proc. 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville (1977).

謝 辞

本研究の遂行に際し終始御支援を戴いた磯康彦大型トカマク開発部長，吉川允二同次長に感謝致します。また本報告書を作成するに当り，終始有益な御指導を戴いた飯島勉JT-60第2開発室長，太田充本体開発グループ・リーダーに深く感謝致します。また解析データの作成等多くの作業に御協力戴いたJT-60第2開発室及び(株)構造計画研究所の各位に対しても深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1)(1) Takatsu, H., Shimizu, M., Okumura, M., Kawakami, M.; JAERI-M 8155 (1979).
- (2) 原子炉等安全審査委員会; 原子炉等の耐震設計所内指針(1975)内部資料.
- (3) Morishita, O., Takatsu, H., Takashima, T., Yamamoto, M., Ohta, M., Yoshii, A., Suzuki, M.; JAERI-M 6822 (1976).
- (4) Takatsu, H., Yamamoto, M., Shimizu, M., Ohta, M., Saigo, T., Miyata, H., Sato, H., Itoh, Y.; Proc. 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville (1977).

第 2.1 表 解 析 条 件

Model	S	ST	BS	BST
Number of node	775	779	991	991
Number of freedom	4512	4512	5874	5874
Solution time duration (sec)	10	10	10	10
Solution time step (sec)	0.01	0.01	0.01	0.01
Number of frequencies for mode superposition	20	20	30	30
Damping factor (%)	1.0	1.0	5.0	5.0

第 2.2 表 固有値解析結果 (S T モデル)

Mode number	Frequency (Hz)	Period (sec)	Mode
1	4.50	0.222	V.V. (40° sector)
2	4.55	0.220	V.V. (40° sector)
3	4.73	0.212	V.V. (40° sector)
4	4.79	0.209	V.V. (40° sector)
5	5.35	0.187	V.V.
6	6.12	0.163	P.F.C.
7	8.41	0.119	V.V. (60° sector)
8	8.63	0.116	V.V. (60° sector)
9	9.34	0.107	V.V. (40° sector)
10	9.47	0.106	V.V. (40° sector)
11	10.64	0.094	S.S.
12	10.80	0.093	S.S.
13	11.51	0.087	*
14	12.37	0.081	*
15	12.65	0.079	*
16	13.34	0.075	*
17	13.56	0.074	*
18	13.61	0.073	*
19	14.39	0.070	*
20	14.42	0.069	*

V.V. Vacuum Vessel
P.F.C. Poloidal Field Coil
S.S. Support Structure
* Compound Mode

第2.3表 固有値解析結果 (Sモデル)

Mode number	Frequency (Hz)	Period (sec)	Mode	Mode number in ST model
1	4.50	0.222	V.V.(40° sector)	1
2	4.55	0.220	V.V.(40° sector)	2
3	4.73	0.212	V.V.(40° sector)	3
4	4.79	0.209	V.V.(40° sector)	4
5	5.35	0.187	V.V.	5
6	6.05	0.165	P.F.C.	6
7	7.44	0.134	S.S.	-
8	8.40	0.119	V.V.(60° sector)	7
9	8.62	0.116	V.V.(60° sector)	8
10	9.28	0.108	V.V.(40° sector)	9
11	9.48	0.105	V.V.(40° sector)	10
12	10.13	0.099	S.S.	-
13	10.38	0.096	S.S.	-
14	11.43	0.088	*	13
15	12.35	0.081	*	14
16	12.65	0.079	*	15
17	13.34	0.075	*	16
18	13.54	0.074	*	17
19	14.39	0.070	*	19
20	14.42	0.069	*	20

第 2.4 表 固有値解析結果 (B S Tモデル)

Mode number	Frequency (Hz)	Period (sec)	Mode	Mode number in ST model
1	1.09	0.919	B.(RF)	-
2	1.49	0.670	B.(RF)	-
3	2.38	0.420	B.(RF)	-
4	2.57	0.389	B.(RF)	-
5	4.33	0.231	B.	-
6	4.47	0.224	V.V.(40° sector)	1
7	4.55	0.220	V.V.(40° sector)	2
8	4.75	0.211	V.V.(40° sector)	3
9	4.79	0.209	V.V.(40° sector)	4
10	4.91	0.204	B.	-
11	5.33	0.188	V.V.	5
12	6.12	0.163	P.F.C.	6
13	6.73	0.149	*	-
14	7.69	0.130	*	-
15	8.34	0.120	*	7
16	8.57	0.117	*	8
17	8.75	0.114	*	-
18	9.02	0.111	*	-
19	9.47	0.106	*	-
20	9.68	0.103	*	-
21	10.38	0.096	*	-
22	10.57	9.47	*	-
23	11.37	8.80	*	-
24	12.32	8.12	*	-
25	12.57	7.95	*	-
26	12.63	7.92	*	-
27	13.08	7.65	*	-
28	13.33	7.50	*	-
29	13.51	7.40	*	-
30	14.37	6.96	*	-

B. Building

第2.5表 固有値解析結果 (BSモデル)

Mode period	Frequency (Hz)	Period (sec)	Mode	Mode number in ST model
1	1.09	0.919	B.(RF)	-
2	1.49	0.670	B.(RF)	-
3	2.38	0.420	B.(RF)	-
4	2.57	0.389	B.(RF)	-
5	4.28	0.234	B.	-
6	4.46	0.224	V.V.(40° sector)	1
7	4.55	0.220	V.V.(40° sector)	2
8	4.74	0.211	V.V.(40° sector)	3
9	4.79	0.209	V.V.(40° sector)	4
10	4.84	0.207	B.	-
11	5.33	0.188	V.V.	5
12	6.03	0.166	P.F.C.	6
13	6.63	0.151	*	-
14	7.21	0.139	S.S.	-
15	7.59	0.132	*	-
16	8.19	0.122	*	-
17	8.46	0.118	*	-
18	8.57	0.117	*	-
19	8.75	0.114	*	-
20	9.47	0.106	*	-
21	9.59	0.104	*	-
22	10.19	0.098	*	-
23	10.53	0.095	*	-
24	11.36	0.088	*	-
25	12.32	0.081	*	-
26	12.57	0.080	*	-
27	12.63	0.079	*	-
28	13.33	0.075	*	-
29	13.50	0.074	*	-
30	14.37	0.070	*	-

第2.6表 解析ケース一覧

Step	Model	Input wave		
		Name	Direction	Amplitude (gal)
1	S	El Centro NS 1940	X	200
	S	El Centro NS 1940	Z	200
	S	Taft EW 1952	X	200
	S	Taft EW 1952	Z	200
	ST	El Centro NS 1940	X	200
	ST	El Centro NS 1940	Z	200
	ST	Taft EW 1952	X	200
	ST	Taft EW 1952	Z	200
	BS	El Centro NS 1940	X	200
	BS	El Centro NS 1940	Z	200
	BS	Taft EW 1952	X	200
	BS	Taft EW 1952	Z	200
	BST	El Centro NS 1940	X	200
	BST	El Centro NS 1940	Z	200
	BST	Taft EW 1952	X	200
	BST	Taft EW 1952	Z	200
	S	El Centro UD 1940	Y	100
	S	Taft UD 1952	Y	100
BST	El Centro UD 1940	Y	100	
BST	Taft UD 1952	Y	100	
2	BST	El Centro NS 1940	X	200
	BST	Taft EW 1952	X	200

第2.7表 建家屋上面の最大水平応答変位

Node number	Deflection (cm)	Input wave			
		E-X	E-Z	T-X	T-Z
974	δx	0.71	0.04	1.09	0.05
	δz	0.04	0.67	0.04	0.46
971	δx	0.47	0.14	0.72	0.12
	δz	0.03	0.66	0.04	0.45
978	δx	0.71	0.05	1.10	0.06
	δz	0.06	0.61	0.05	0.43
965	δx	0.72	0.05	1.11	0.06
	δz	0.08	0.70	0.10	0.48

E-X : El Centro in X direction
 E-Z : El Centro in Z direction
 T-X : Taft in X direction
 T-Z : Taft in Z direction

第2.8表 上架台の最大応答変位

Model	Deflection (cm)	Input wave					
		E-X	E-Z	E-Y	T-X	T-Z	T-Y
S	δx	0.11	0.00	0.00	0.15	0.01	0.00
	δz	0.00	0.11	0.00	0.01	0.12	0.00
	δy	-	-	0.00			0.00
ST	δx	0.12	0.01	-	0.11	0.01	-
	δz	0.01	0.10	-	0.01	0.09	-
	δy	-	-	-	-	-	-
BS	δx	0.73	0.06	-	1.09	0.08	-
	δz	0.07	0.94	-	0.07	0.76	-
	δy	-	-	-	-	-	-
BST	δx	0.67	0.05	0.03	1.06	0.06	0.02
	δz	0.07	0.88	0.04	0.07	0.62	0.04
	δy	-	-	-	-	-	0.09

E-Y : El Centro in Y direction
T-Y : Taft in Y direction

第2.9表 上架台の一階床に対する相対変位

Model	Deflection (cm)	Input wave			
		E-X	E-Z	T-X	T-Z
BS	δx	0.29	0.03	0.46	0.05
	δz	0.05	0.50	0.04	0.40
BST	δx	0.23	0.02	0.40	0.03
	δz	0.04	0.42	0.05	0.29

第2.10表 真空容器の最大応答変位 (Aタイプ)

Model	Deflection (cm)	Input wave					
		E-X	E-Z	E-Y	T-X	T-Z	T-Y
S	δx	0.38	0.39	0.01	0.39	0.52	0.03
	δz	0.49	0.46	0.02	0.46	0.66	0.06
	δy	0.15	0.17	0.25	0.17	0.20	0.68
ST	δx	0.38	0.37	-	0.53	0.57	-
	δz	0.48	0.44	-	0.55	0.67	-
	δy	0.16	0.21	-	0.18	0.20	-
BS	δx	1.13	1.40	-	1.58	1.44	-
	δz	1.01	1.24	-	1.26	1.72	-
	δy	0.45	0.48	-	0.62	0.78	-
BST	δx	1.08	1.42	0.06	1.58	1.48	0.08
	δz	1.04	1.19	0.05	1.28	1.70	0.08
	δy	0.45	0.56	0.34	0.65	0.80	0.67

第 2.1 1 表 真空容器の最大応答変位 (Bタイプ)

Model	Deflection (cm)	Input wave					
		E-X	E-Z	E-Y	T-X	T-Z	T-Y
S	δx	0.16	0.06	0.01	0.20	0.11	0.03
	δz	0.11	0.61	0.00	0.22	0.98	0.00
	δy	0.19	0.03	0.25	0.19	0.04	0.68
ST	δx	0.17	0.07	-	0.19	0.09	-
	δz	0.09	0.47	-	0.19	0.79	-
	δy	0.19	0.04	-	0.19	0.04	-
BS	δx	0.65	0.15	-	1.08	0.18	-
	δz	0.21	0.26	-	1.60	0.22	-
	δy	0.50	0.39	-	0.68	0.58	-
BST	δx	0.62	0.14	0.04	1.10	0.14	0.05
	δz	1.60	1.69	0.17	1.69	1.46	0.16
	δy	0.50	0.42	0.34	0.70	0.58	0.67

第 2.1 2 表 真空容器の最大応答変位 (Cタイプ)

Model	Deflection (cm)	Input wave					
		E-X	E-Z	E-Y	T-X	T-Z	T-Y
S	δx	0.40	0.09	0.01	0.49	0.13	0.01
	δz	0.15	0.18	0.01	0.24	0.26	0.04
	δy	0.06	0.22	0.25	0.08	0.25	0.68
ST	δx	0.37	0.10	-	0.44	0.13	-
	δz	0.16	0.19	-	0.20	0.27	-
	δy	0.09	0.29	-	0.08	0.26	-
BS	δx	0.85	0.18	-	1.04	0.22	-
	δz	0.19	0.81	-	0.23	1.03	-
	δy	0.29	0.56	-	0.37	0.88	-
BST	δx	0.83	0.16	0.04	1.01	0.20	0.05
	δz	0.19	0.79	0.08	0.24	0.91	0.08
	δy	0.29	0.67	0.34	0.37	0.88	0.67

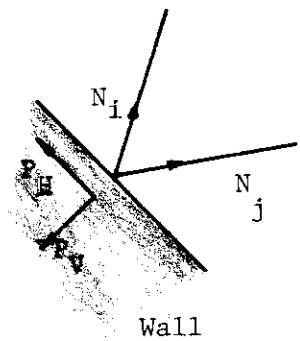
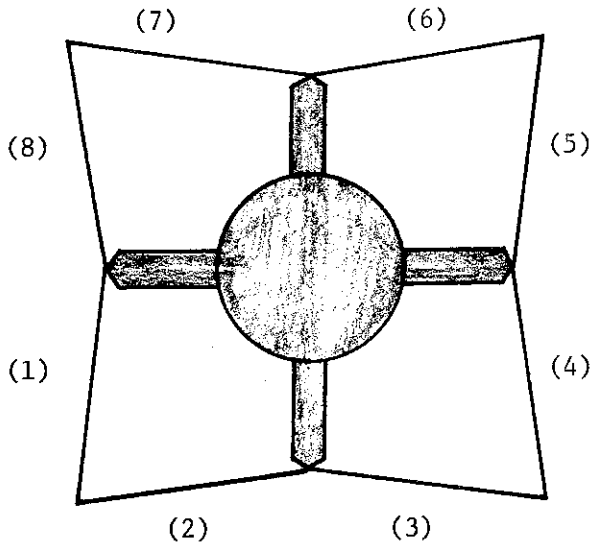
第 2.1 3 表 主要コンポーネントの最大応答変位 (ステップ 2)

Component	$(\delta_x)_{\max}$ (cm)	t_{\max} (sec)	$(\delta_y)_{\max}$ (cm)	t_{\max} (sec)
Vacuum vessel	0.74	2.04	0.54	2.98
Poloidal coil	0.68	2.04	0.20	2.98
Toroidal coil	0.69	2.04	0.17	2.52
Upper support structure	0.72	2.04	0.19	2.51
Lower support structure	0.54	2.04	0.17	2.51

第2.14表 星形トラスの最大応答応力

Model	Input wave	N/P (ton)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
ST	E-X	N	27.1	30.5	31.2	28.3	27.3	30.4	31.3	28.1
		$P_{H,V}$	30.5	48.8	31.5	50.5	30.6	48.9	31.5	50.4
	E-Z	$N_{H,V}$	27.2	23.7	24.7	28.0	27.2	23.7	24.7	28.0
		$P_{H,V}$	27.0	43.2	27.9	44.7	27.0	43.2	27.9	44.7
BST	E-X	N	73.3	56.7	48.7	66.6	50.8	50.8	57.6	45.7
		$P_{H,V}$	68.9	110.2	61.1	97.8	53.8	86.2	54.7	87.6
	E-Z	$N_{H,V}$	85.7	117.2	113.9	92.8	84.2	110.8	119.0	83.7
		$P_{H,V}$	107.5	172.1	109.5	175.3	103.3	165.4	107.4	171.9
	T-X	$N_{H,V}$	123.5	93.6	90.8	120.4	86.8	82.8	105.0	85.7
		$P_{H,V}$	115.0	184.1	111.9	179.1	89.9	143.8	101.1	161.7
	T-Z	$N_{H,V}$	65.9	87.7	76.0	63.1	64.3	81.9	79.7	58.2
		$P_{H,V}$	81.4	130.3	73.7	118.0	77.5	124.0	73.1	116.9
	E-Y	$N_{H,V}$	18.5	19.0	14.3	11.2	16.8	18.1	13.7	10.1
		$P_{H,V}$	19.9	31.8	13.5	21.6	18.5	29.6	12.6	20.2
T-Y	$N_{H,V}$	17.2	18.8	8.8	6.0	16.3	18.2	9.4	7.9	
	$P_{H,V}$	19.1	30.5	7.8	12.6	18.3	29.3	9.2	14.7	

N : Axial force N_i and N_j
 P : Reaction P_H and P_V



第 2.15 表 各コンポーネントの最大応答応力

(kg/mm²)

Component (Beam)	σ_1	σ_2	σ_3	τ
Support arm of vacuum vessel	0.2	11.0	4.9	0.6
Rib of rigid ring	0.0	0.0	0.6	0.5
Support rod of poloidal coil	0.3	1.2	20.3	0.3
Support structure of poloidal coil	0.1	2.0	0.5	0.0
Casing of toroidal coil	0.1	13.4	0.4	0.2
Toroidal coil	0.1	0.0	2.2	0.3
Fast movable limiter	0.1	0.2	0.5	0.1
Central column	0.1	2.8	0.3	0.4
Component (Shell)	σ_x	σ_y	τ	
Rigid ring	0.4	1.2	0.2	
Bellows*	0.0	1.2	4.2	

* Orthotropic plate

第 2.16 表 最大応答変位

(cm)

Component	Node number	Model	(δ_x) _{max}	(δ_z) _{max}
Upper support structure	507	BS	1.09	0.94
		BST	1.06	0.88
Support arm of vacuum vessel	487	BS	0.88	0.82
		BST	0.88	0.80
	484	BS	0.99	0.92
		BST	1.00	0.91
Support rod of poloidal coil	139	BS	1.03	0.84
		BST	1.01	0.80
	257	BS	0.92	0.78
		BST	0.91	0.75
Fast movable limiter	305	BS	1.27	1.07
		BST	1.19	0.99

第2.17表 最大応答応力

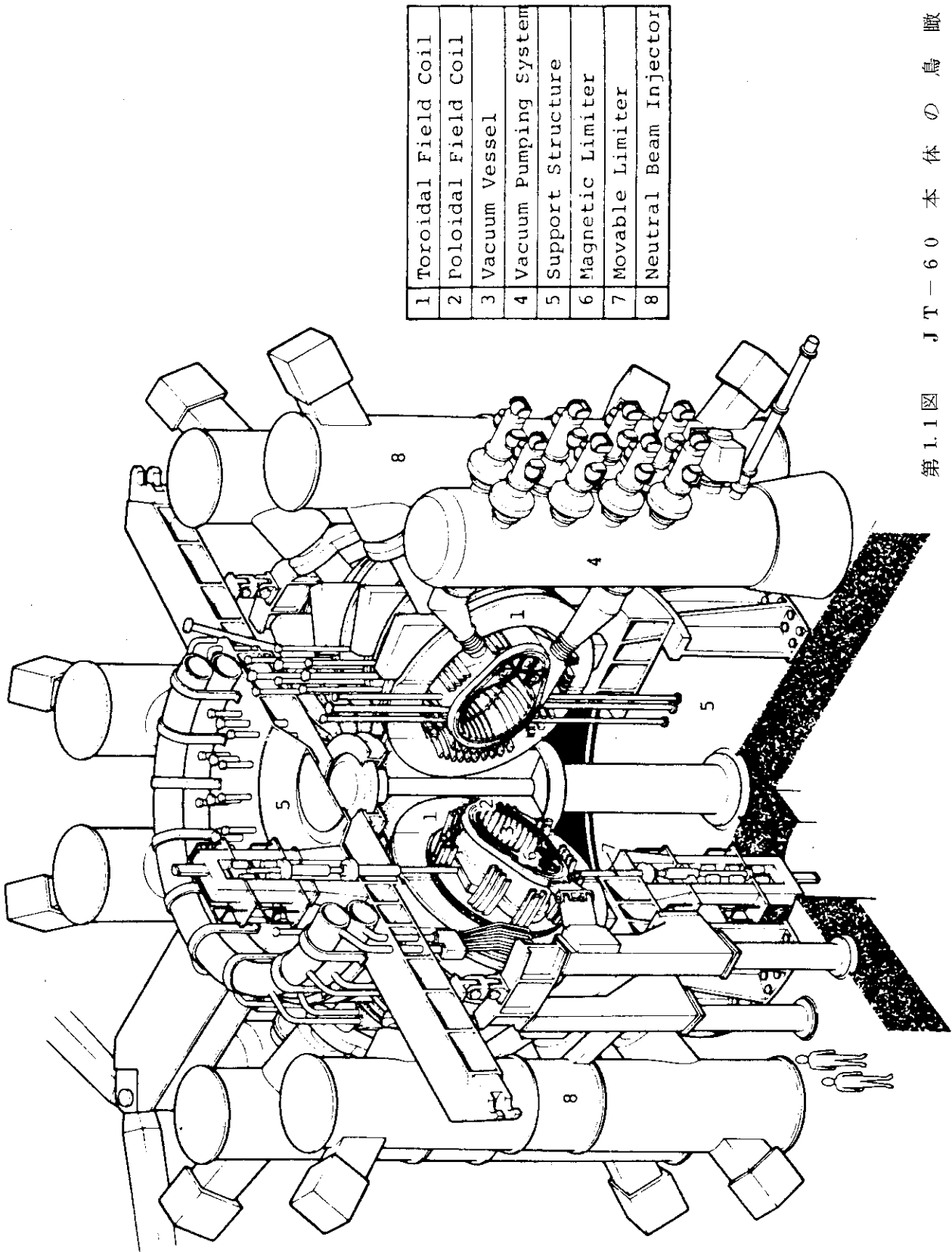
(ton·cm)

Component	Element number	Model	T_{\max}	$(M_1)_{\max}$	$(M_2)_{\max}$
Upper support structure	655	BS	1.84	3570	0.00
		BST	2.83	2555	0.00
Support arm of vacuum vessel	722	BS	1620	6300	10200
		BST	1547	6170	9360
	730	BS	1250	5980	8460
		BST	1280	5850	8857
Support rod of poloidal coil	162	BS	6.92	109	191
		BST	2.96	47.0	461
	173	BS	6.61	193	2155
		BST	2.98	155	1954
Fast movable limiter	414	BS	7.92	163	43.6
		BST	65.0	1653	188

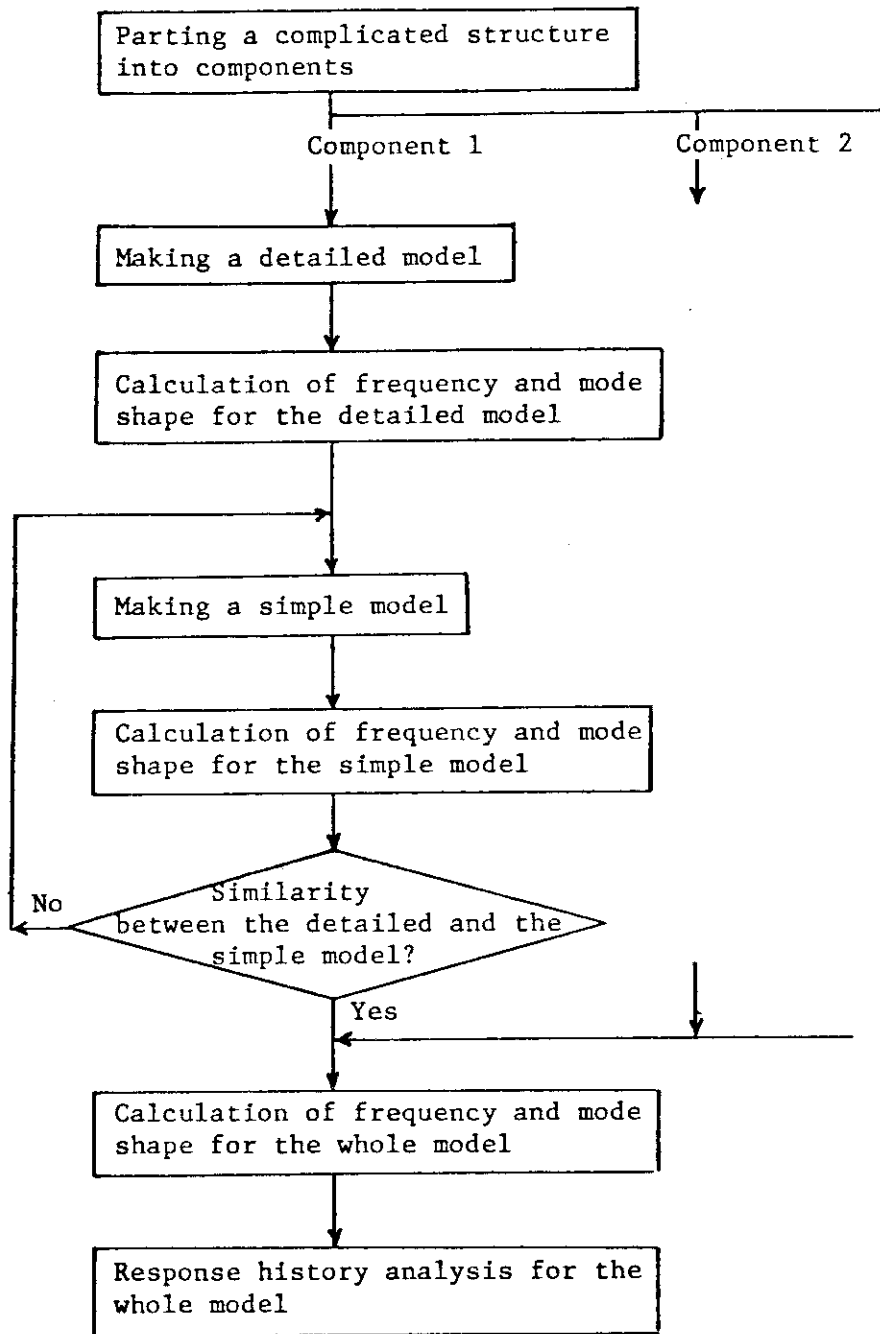
第2.18表 厚肉リングの水平面内最大変位

(cm)

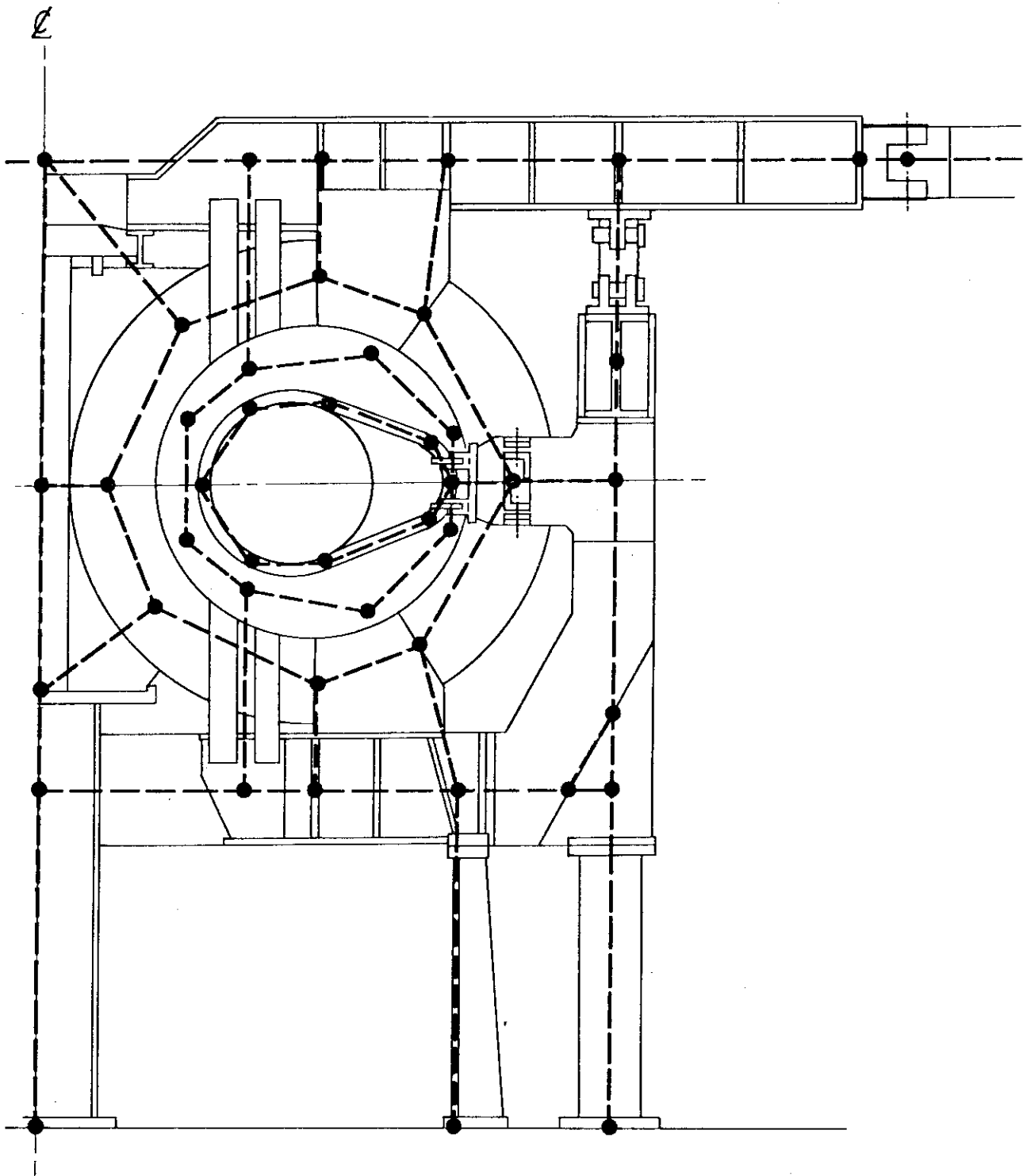
Type of vacuum vessel	Direction of input wave	δ_x	δ_z	δ_x^*	δ_z^*	δ_R	δ_θ	δ_r
A	X	1.58	1.28	0.91	0.06	1.39	1.27	0.26
	Z	1.48	1.70	0.05	0.47	1.89	1.99	0.31
B	X	1.10	1.69	0.91	0.06	1.64	1.63	0.19
	Z	0.14	1.46	0.05	0.47	0.99	0.99	0.09
C	X	1.01	0.24	0.91	0.06	0.20	0.18	0.10
	Z	0.20	0.91	0.05	0.47	0.46	0.35	0.31



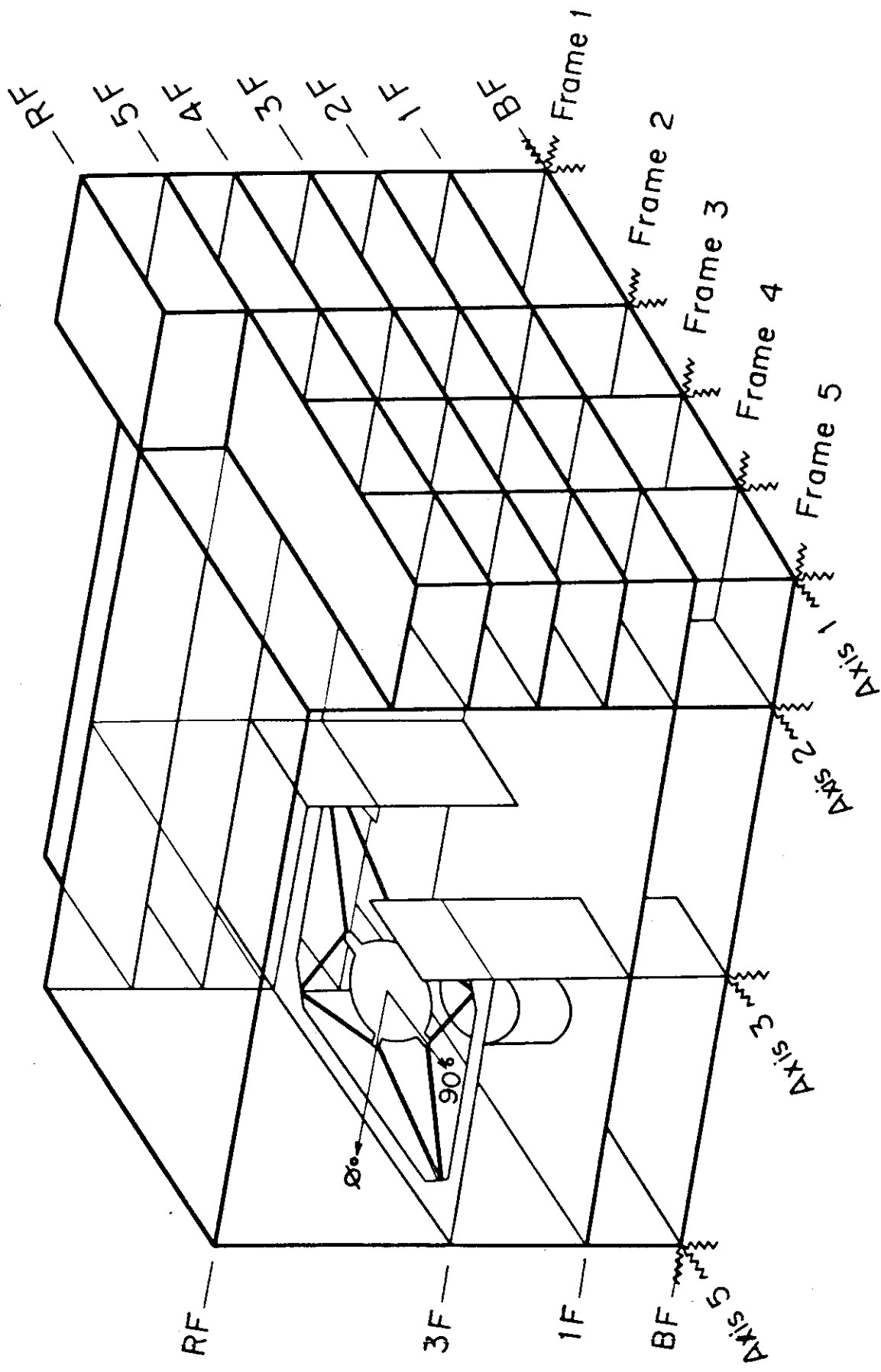
第1.1図 JT-60 本体の鳥瞰図



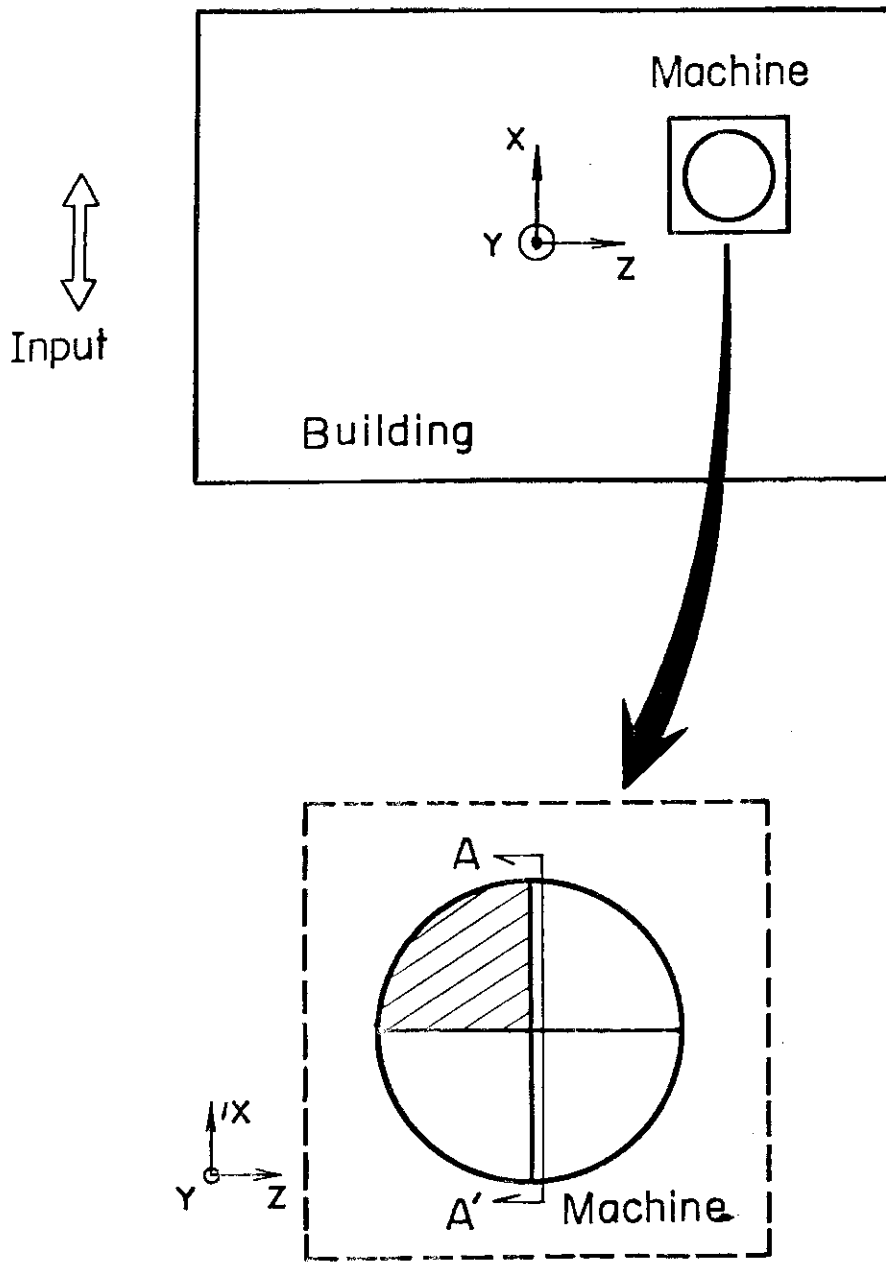
第 1.2 図 解析手順



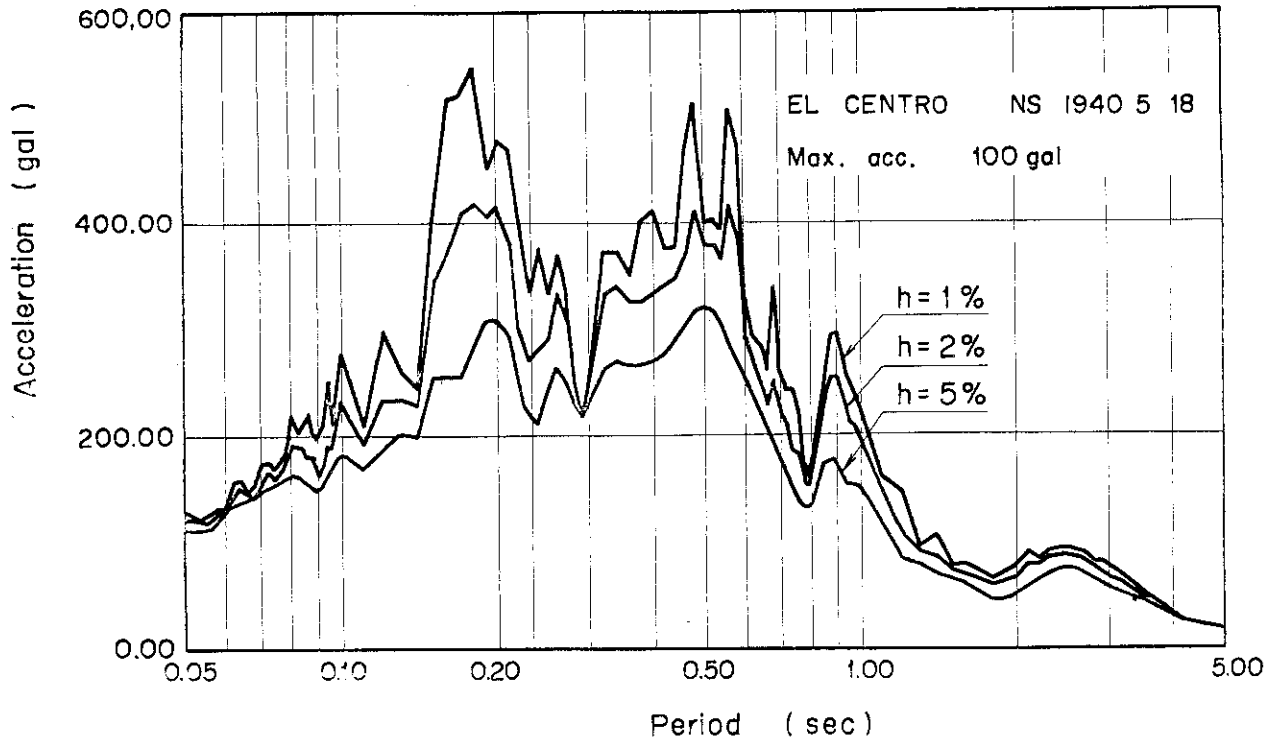
第2.1図 装置全体モデルの模式図



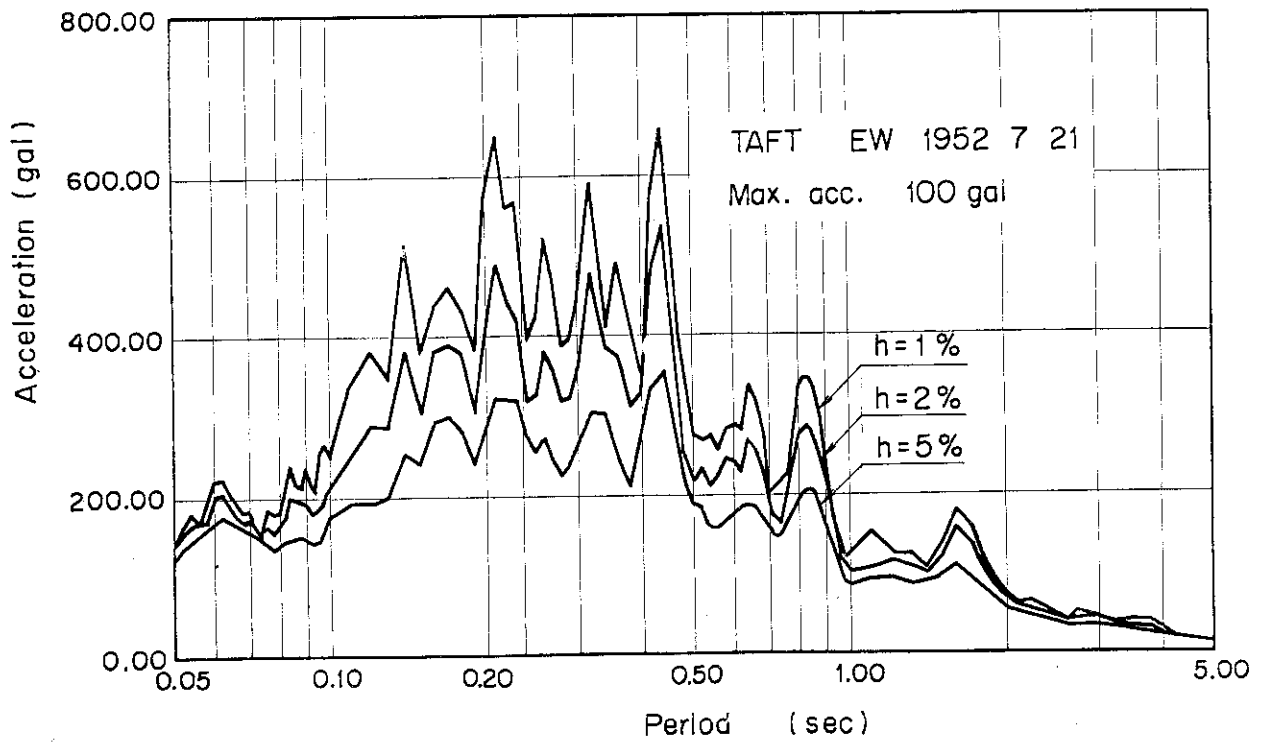
第2.2図 建家を含む装置全体モデルの模式図



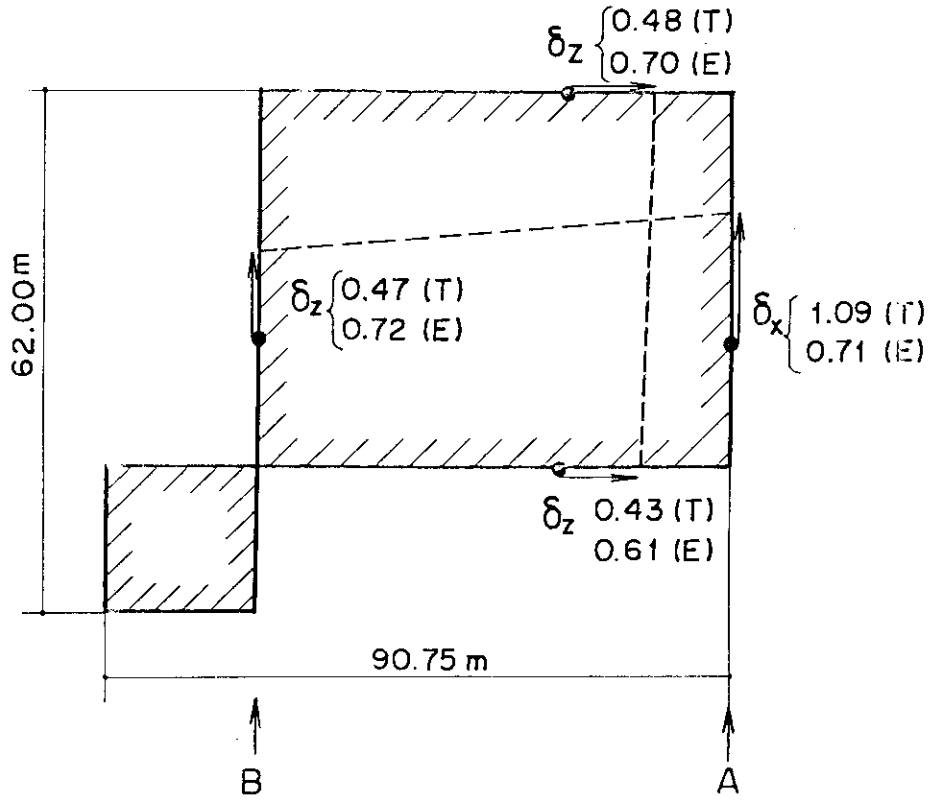
第 2.3 図 ステップ 2 における計算対象範囲



第 2.4 図 加速度応答スペクトル (EL CENTRO 波)

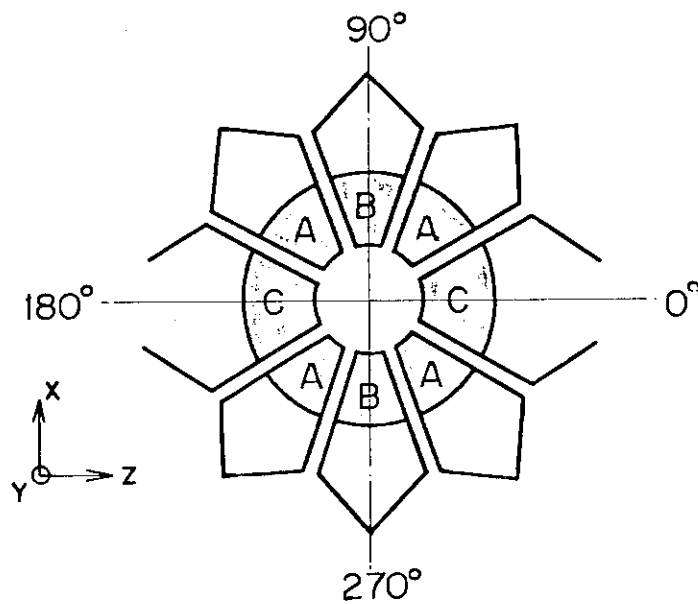


第 2.5 図 加速度応答スペクトル (TAFT 波)

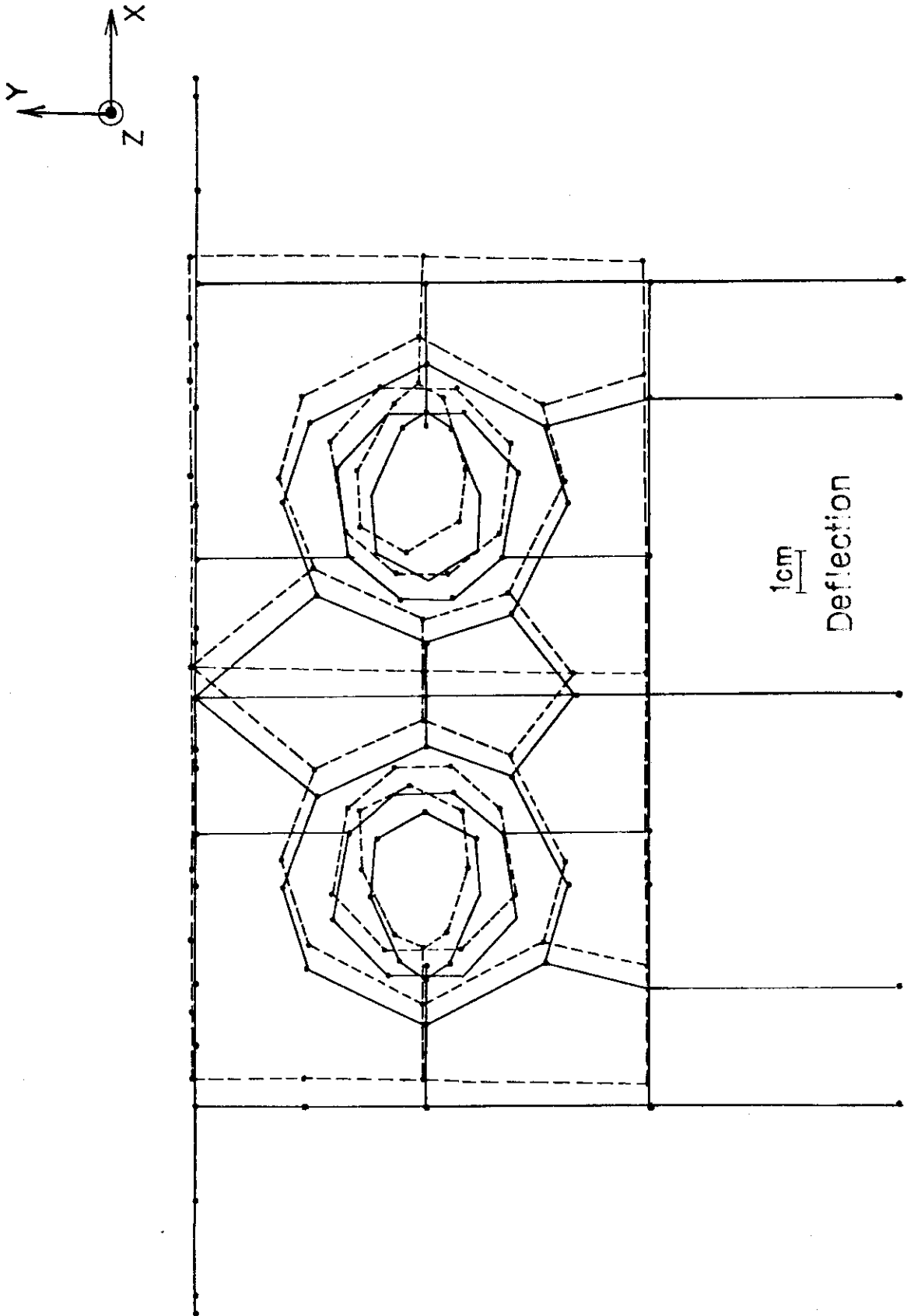


δ ; Deflection (cm)
 T ; Taft
 E ; El Centro

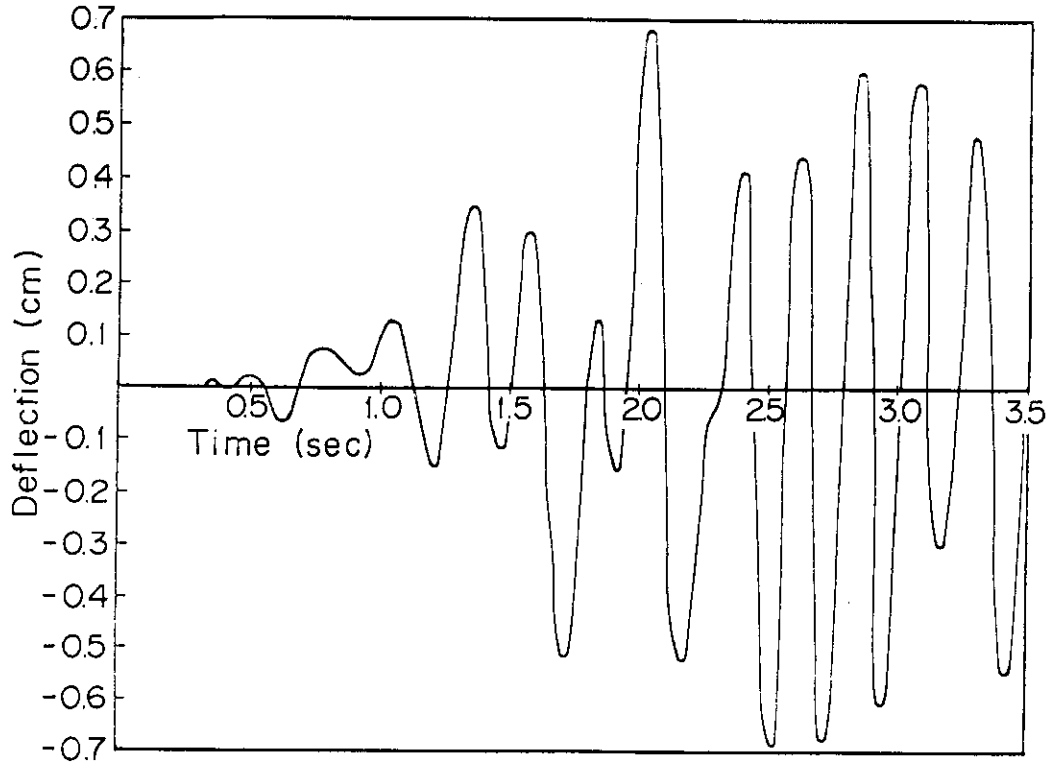
第 2.6 図 建家屋上面の最大応答変位



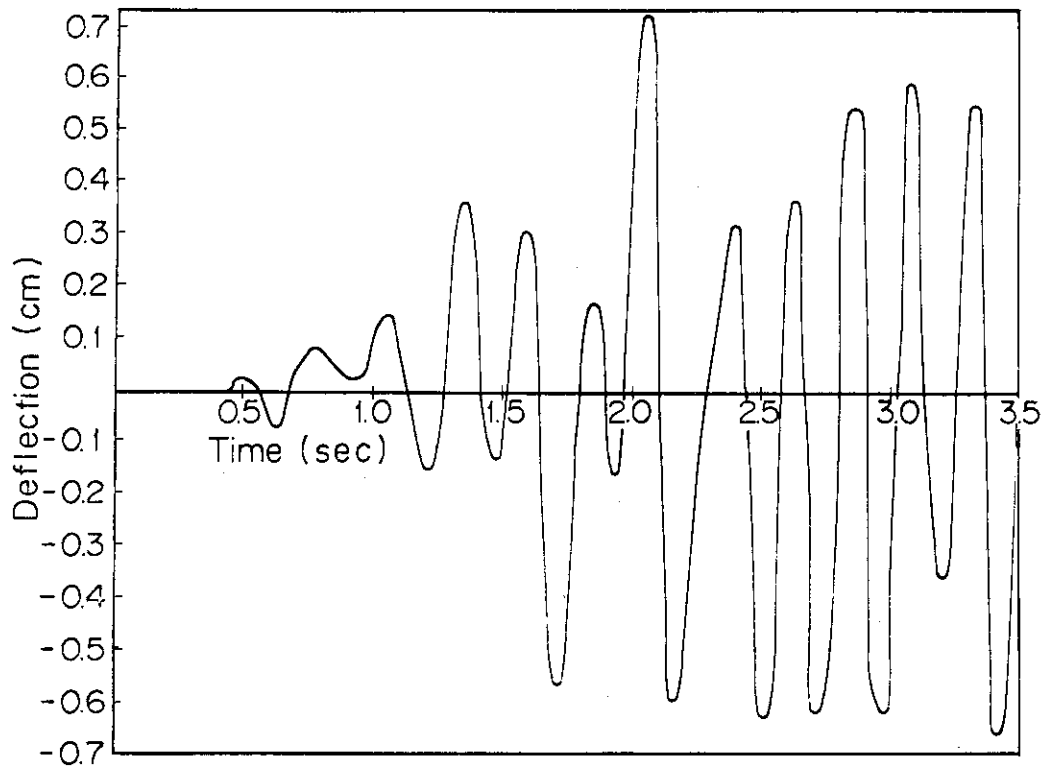
第 2.7 図 真空容器の種類



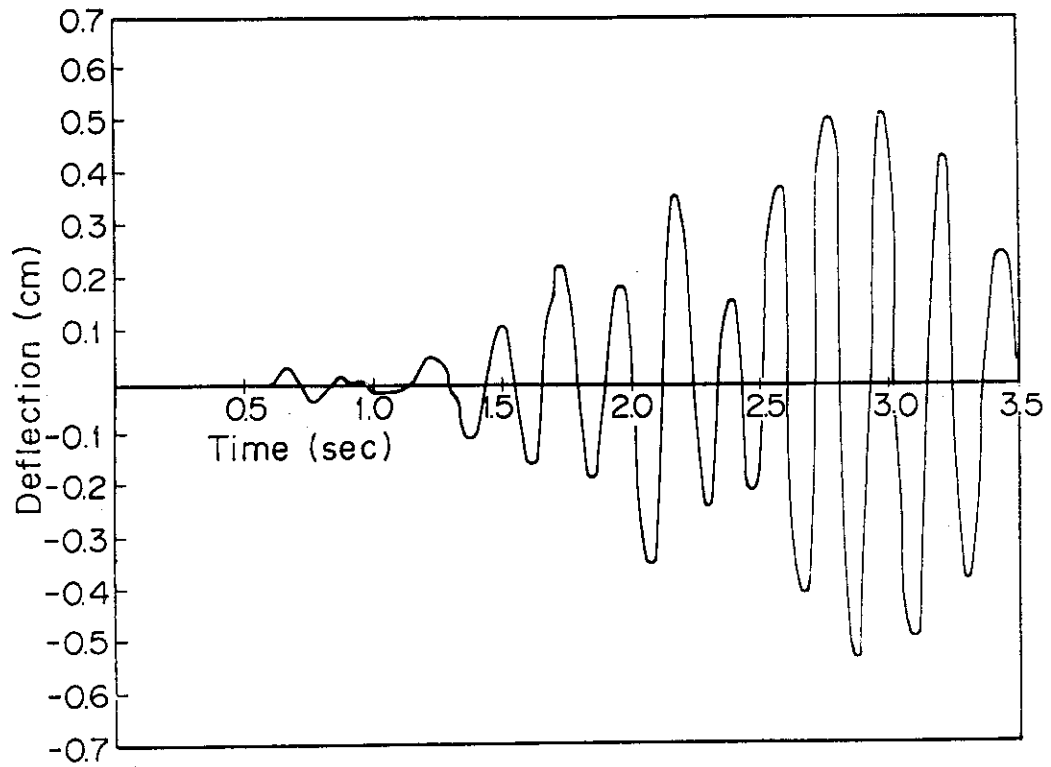
第 2.8 図 装置 X 方向断面上の各節点の最大応答変位 (ステップ 2)



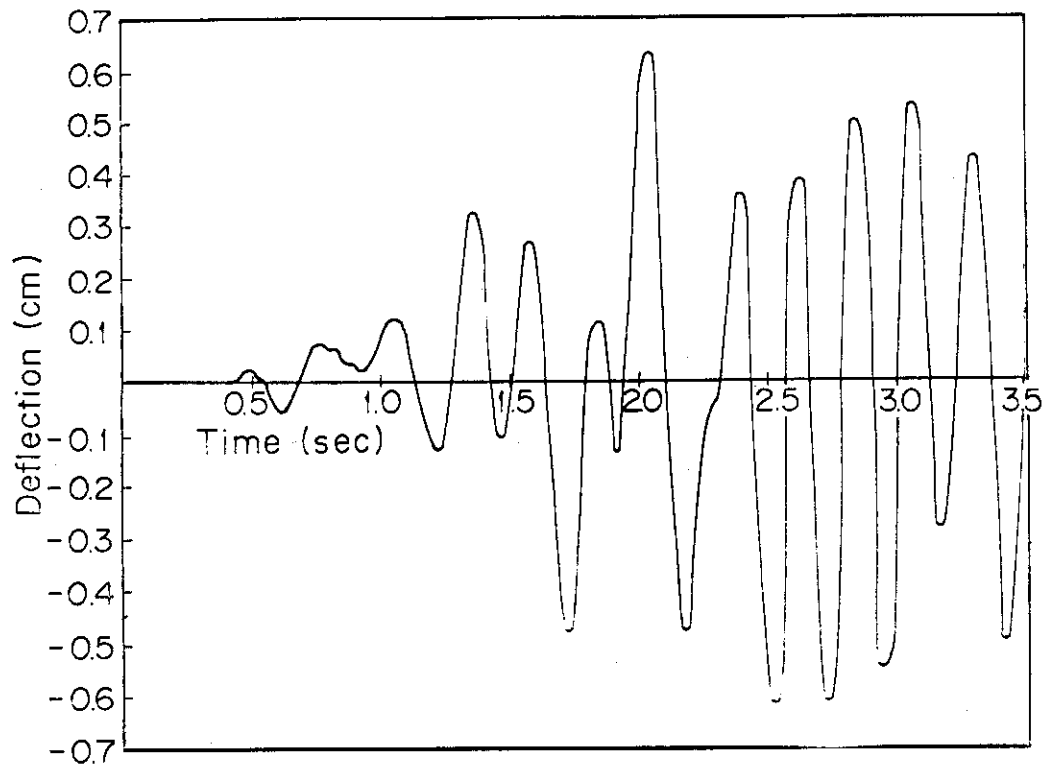
第 2.9 図 上架台星形トラス取り付け部の X 方向時刻歴変位応答



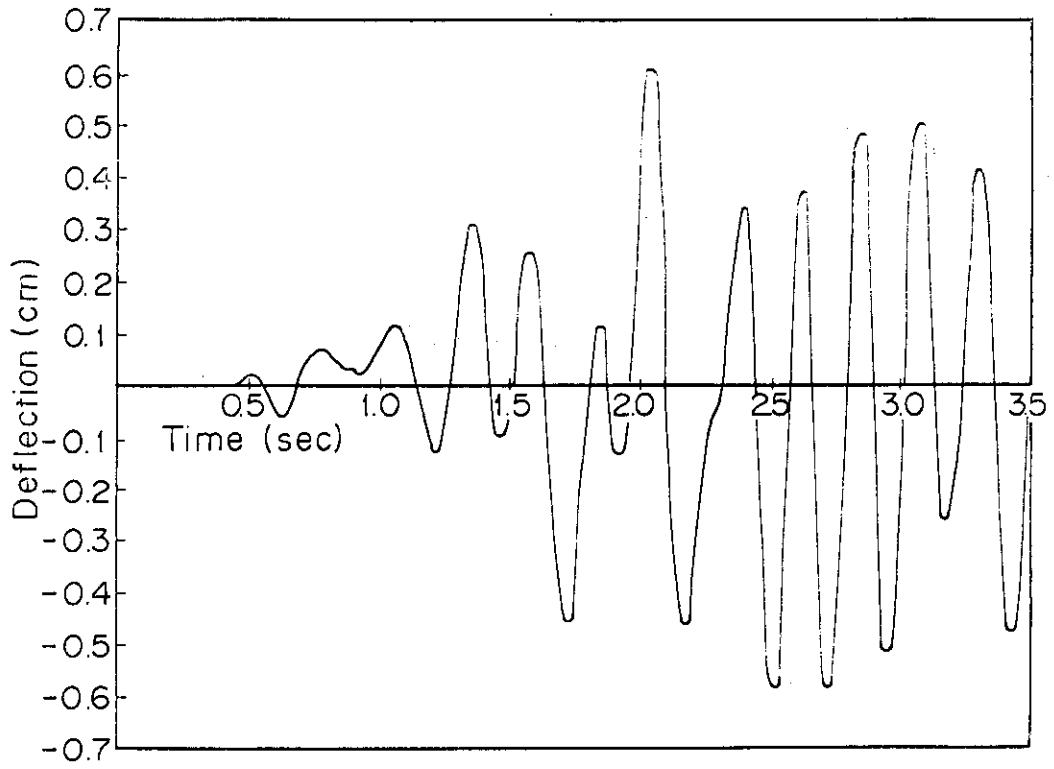
第 2.10 図 真空容器の X 方向時刻歴変位応答



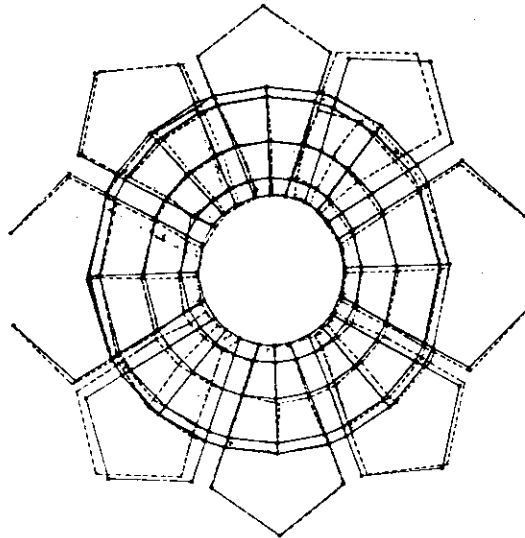
第 2.1.1 図 真空容器の Y 方向時刻歴変位応答



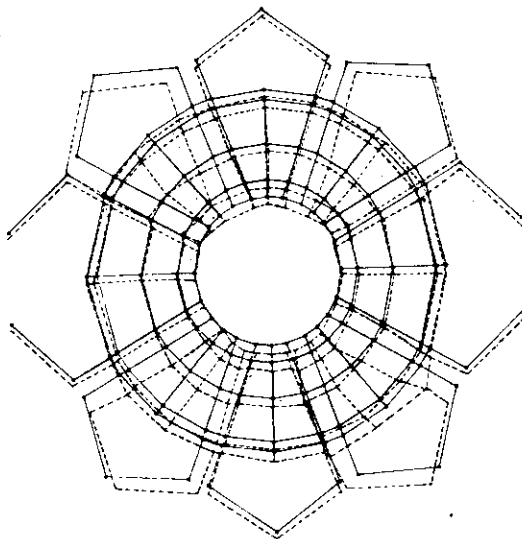
第 2.1.2 図 ポロイダル磁場コイルの X 方向時刻歴変位応答



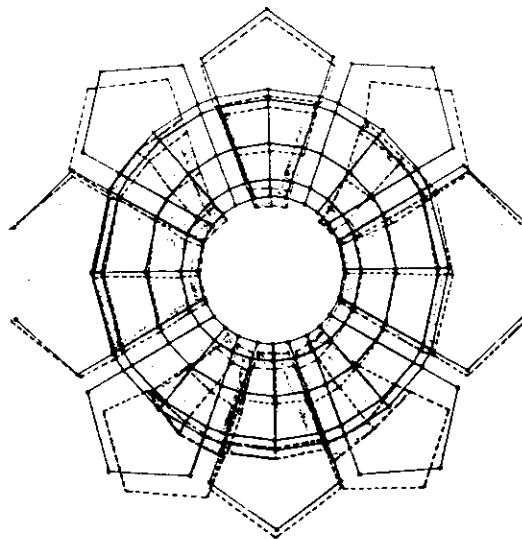
第 2.1.3 図 トロイダル磁場コイルの X 方向時刻歴変位応答



t=3.37 sec

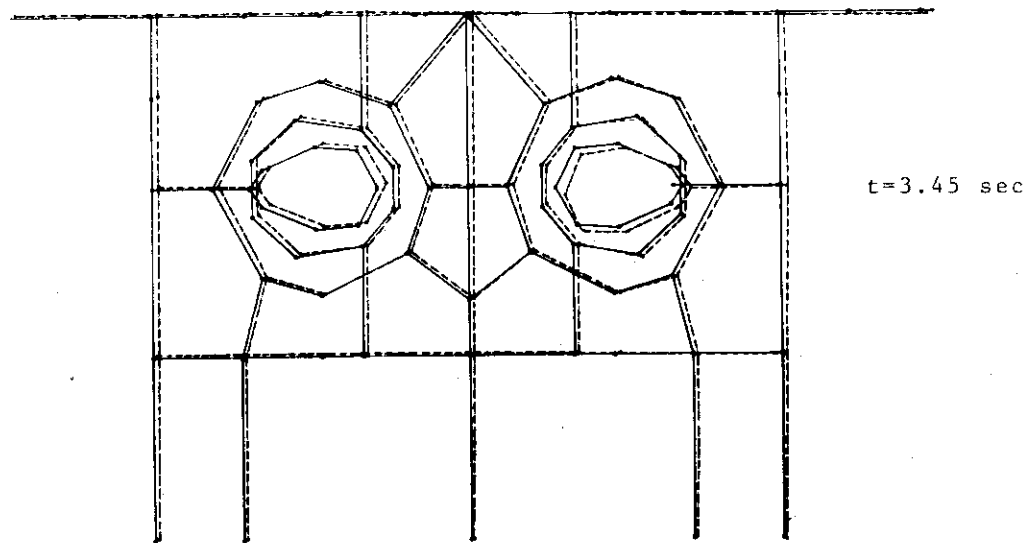
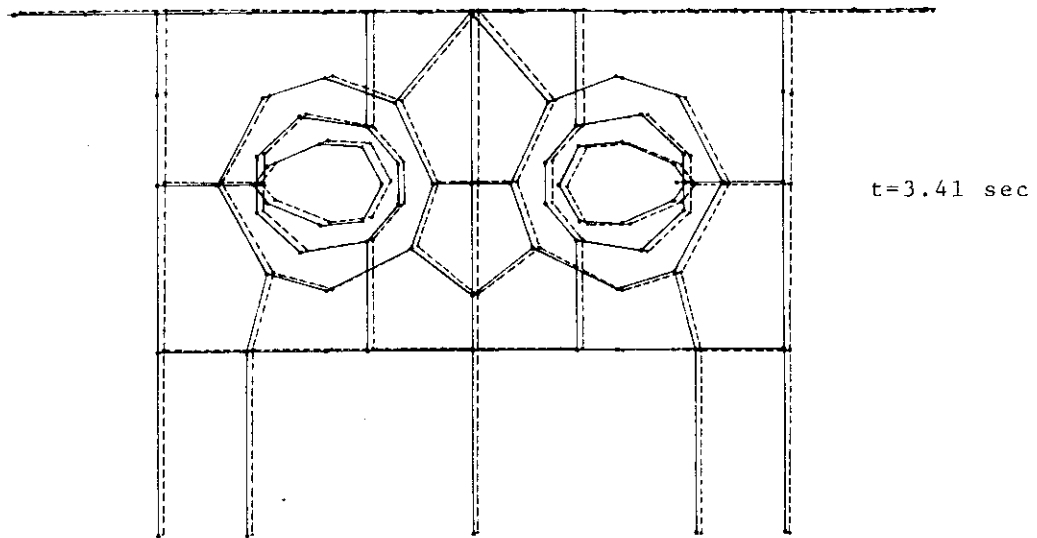
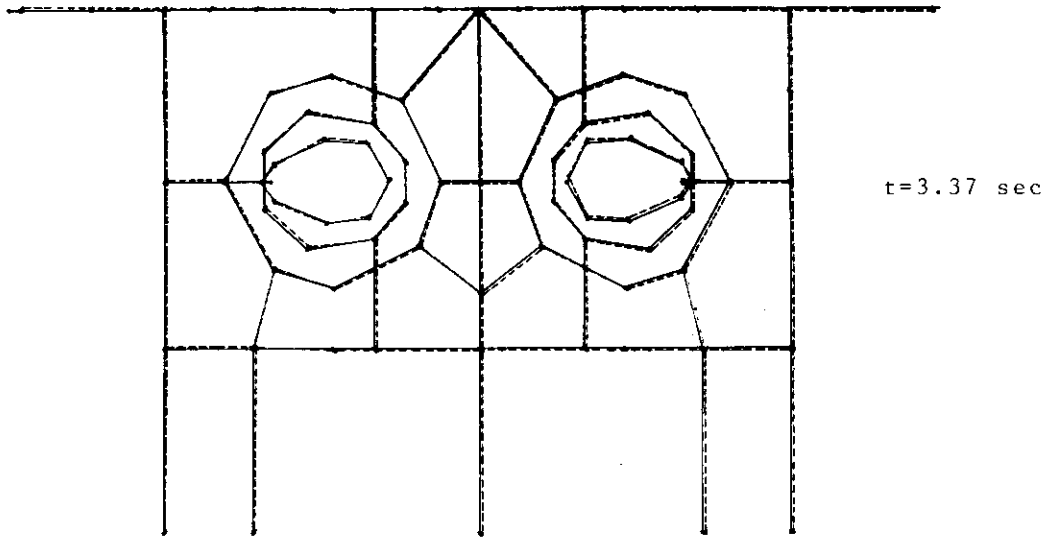


t=3.41 sec

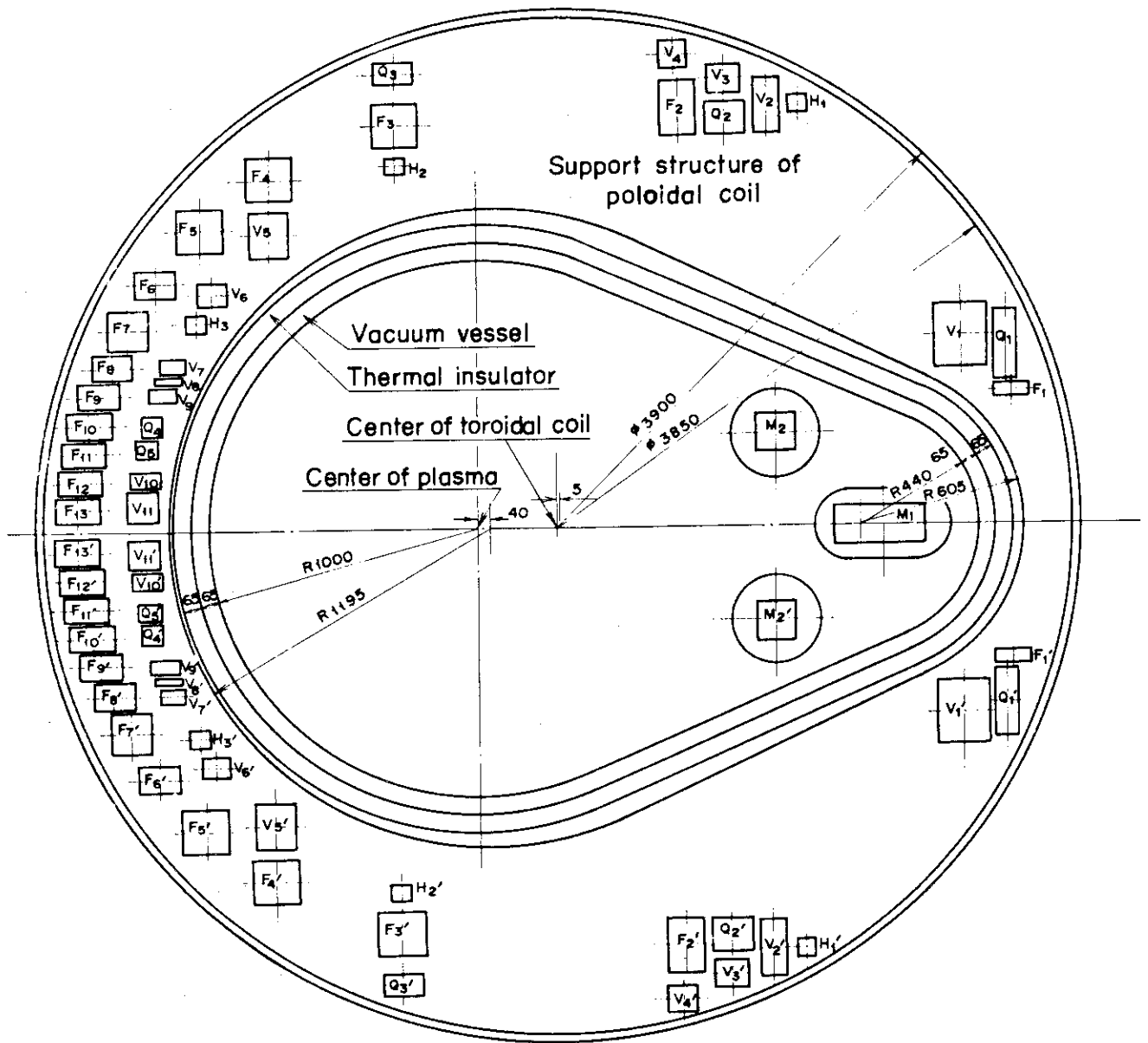


t=3.45 sec

第 2.14 図 変位応答の時間変化 (平面図)



第 2.1 5 図 変位応答の時間変化 (断面図)



第 2.16 図 トロイダル磁場コイルと真空容器との間の空間