

JAERI-M  
83-212

ヘリカルコイル形熱交換器の耐震解析  
—モデル作成と固有値解析—

1983年12月

谷田部広志\*・西口 磯春

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

ヘリカルコイル形熱交換器の耐震解析  
—モデル作成と固有値解析—

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部  
谷田部 広志<sup>\*</sup>・西口 磯春

(1983年11月11日受理)

多目的高温ガス実験炉の高温機器の1つである中間熱交換器は、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する重要な機器である。本報告書には、中間熱交換器の地震時健全性を確認するために行っている耐震解析のうち、解析手法および振動特性に関する検討結果をまとめたものである。

多層多列のヘリカルコイル状伝熱管群を内部に含む複雑な構造物である中間熱交換器を各構造要素に分割し、3次元有限要素により詳細モデルを作成して固有値解析を行った。次に、この結果に基づいて工学的に妥当な簡略化された全体モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、伝熱管群及びセンターパイプが同位相で振動し、その1次固有周期は0.4 Hz であることが明かになった。

---

\* バブコック日立(株)

Seismic Analysis of Helical Coil Type Heat Exchanger

— Modeling and Eigenvalue Analysis —

Hiroshi YATABE\* and Isoharu NISHIGUCHI

Department of Power Reactor Projects, JAERI

(Received November 11, 1983)

The Intermediate Heat Exchanger (IHX) which forms the reactor coolant pressure boundary is one of the most important components of the Multi-purpose Experimental Very High Temperature Gas-cooled Reactor (VHTR). This paper presents the result of the finite element modeling and the eigenvalue analysis of the IHX from our investigation of the seismic analyses of it in order to confirm its integrity in earthquakes.

For the modeling, the structure of the IHX is separated into a helical tube bundle, inner and outer vessels and a centerpipe, and the eigenvalue analysis was carried out for each structure with the detailed three-dimensional finite element model. Then the simplified model of the whole structure of the IHX was constructed with the result of eigenvalue analysis. The results of the analysis with the simplified model show that the helical tube bundle and the centerpipe have the first natural frequency of 0.4 Hz in the same phase.

Keywords : Seismic Analysis, Helical Coil, Heat Exchanger, Eigenvalue Analysis, FEM, IHX, VHTR, Natural Frequency, Modal Shape, Finite Element Model

\* BABCOCK HITACHI K.K.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 中間熱交換器構造概要及び振動解析手法 .....	3
2.1 中間熱交換器構造概要 .....	3
2.2 振動解析手法 .....	3
3. 内部構造物詳細モデルの作成 .....	10
3.1 上部及び下部連絡管部の詳細部分モデル .....	10
3.2 ヘリカルコイル伝熱管群及びサポート部の詳細部分モデル .....	11
3.3 センターパイプ及び管板部の詳細部分モデル .....	11
3.4 内部構造物詳細モデルおよびその固有値解析 .....	12
4. 簡略モデルの作成と固有値解析 .....	26
4.1 内部構造物の簡略モデル .....	26
4.2 全体構造物簡略モデルの作成 .....	27
4.3 全体構造物簡略モデルの固有値解析 .....	27
5. まとめ .....	52
謝 辞 .....	52
参考文献 .....	52
Appendix - 1 管板部等の等価はりへの置換 .....	54

## Contents

1. Introduction .....	1
2. General description of the structure of the IHX and analysis procedure .....	3
2.1 General description of the structure of the IHX .....	3
2.2 Seismic analysis procedure .....	3
3. Detailed model of the inner structure .....	10
3.1 Detailed model of the upper and the lower connecting tubes .....	10
3.2 Detailed model of the helical tube bundle and its supports .....	11
3.3 Detailed model of the center pipe and tube sheets .....	11
3.4 Detailed model of the inner structure and its eigenvalue analysis .....	12
4. Simplified model and eigenvalue analysis .....	26
4.1 Simplified model of the inner structure .....	26
4.2 Simplified model of the whole structure .....	27
4.3 Eigenvalue analysis of the simplified model of the whole structure .....	27
5. Conclusions .....	52
Acknowledgements .....	52
References .....	52
Appendix-1 Replacement of the tube sheet and support lugs by equivalent beams .....	54

## 1. 緒 言

多目的高温ガス実験炉の中間熱交換器（Intermediate Heat Exchanger）の伝熱管群は、約950°Cの高温ヘリウムガスの熱交換に使用される。このために中間熱交換器では熱サイクルによる熱膨張収縮を考慮し、伝熱管群やセンターパイプを上部から吊り下げる構造としているが、このような構造の場合、地震時健全性について十分な配慮を加える必要がある。<sup>(注)</sup>

機器系の振動解析法としては、有限要素法が有力であるが、Fig. 1.1に示す中間熱交換器のように、多層多列のヘリカルコイル状伝熱管群を含む複雑な構造物の振動挙動を解析する場合、すべての構造部材を忠実に有限要素でモデル化することは実際的ではない。従って、ある程度の簡略化が必要となるが、モデルの設定方法によっては、着目すべき局所的な振動特性が正確に把握できない可能性が生じる。

そこで、構造物をいくつかの構造要素に分割し、個々の構造要素について工学的に妥当な簡略モデルを作成した上で、それらを組合せた全体モデルを作成するという方法が考えられる。この方法では、各構造要素レベルのモデル化に対する検討とともに、各構造要素間の結合部のモデル化にも十分注意を払う必要がある。さらに、中間熱交換器では、熱サイクルによる熱膨張収縮を拘束しない目的でギャップを設定してあるが、ギャップを有する構造に対する取扱いに関する検討を加えなければならない。

本報告は、実験炉の中間熱交換器のモデル化と振動特性についてまとめたものであるが、最終的には類似の構造を有する他の機器系に対しても適用可能な解析手法を確立することを目的の1つとしている。そのため、ギャップの取扱いは重要な検討課題であるが、この問題については現在準備中の時刻歴応答解析と平行して検討を加えていく予定である。

なお、本報告の有限要素解析はすべて、汎用構造解析プログラムS A P V<sup>1)</sup>を使用している。

---

注) 耐震区分上、中間熱交換器圧力容器（外胴）及び伝熱管はA s クラスであり、いずれも動的解析により地震発生時応力を求めて評価することが要求されている。

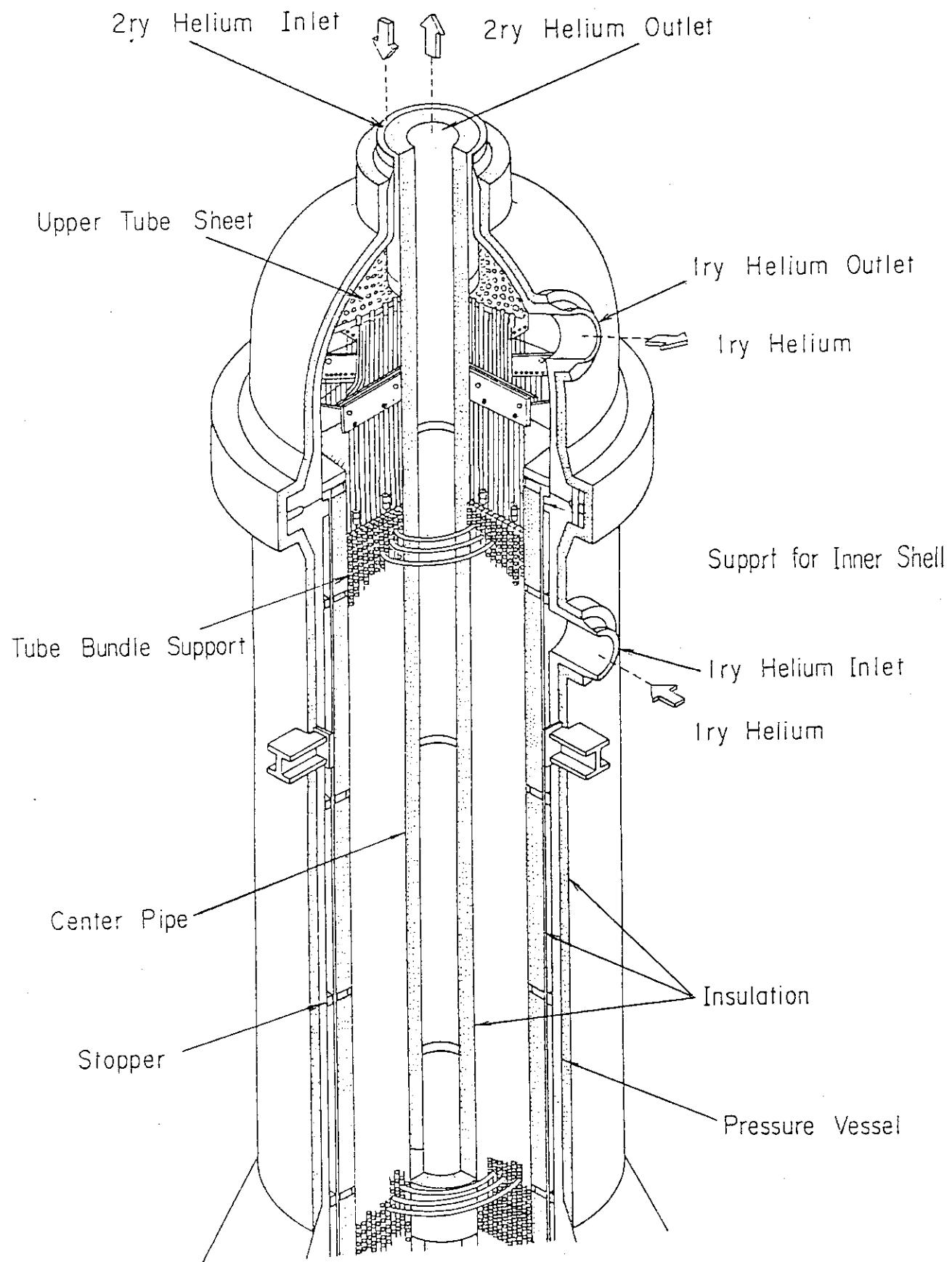


Fig. 1.1 Upper structure of A-loop IHX

## 2. 中間熱交換器構造概要及び振動解析手法

### 2.1 中間熱交換器構造概要

Fig. 2. 1 に示すように多目的高温ガス実験炉はほぼ対称な A, B 2 つのループから構成されており、中間熱交換器は各ループにそれぞれ一基ずつ設置される。詳細設計(I)における両ループの中間熱交換器構造説明図を Fig. 2. 2 及び Fig. 2. 3 に、各主要目を Table 2. 1 に示す。<sup>2)</sup>

中間熱交換器は、A, B 両ループとともに縦置胴管型熱交換器である。伝熱管はヘリカルコイル式となっており胴側を 1 次ヘリウムガス、管側を 2 次ヘリウムガスが流れる。胴は外胴及び内胴の 2 重胴構造で、内、外胴の間には冷却のために、熱交換後の低温 1 次ヘリウムガスが流れる。

伝熱管群や高温 2 次ヘリウムガスの通路となるセンターパイプは、すべて上部から吊り下げており、下方に向って自由に熱膨張する構造になっている。ヘリカルコイル伝熱管群は、管群支持プレートにより支持され、防振のために内胴内側にストッパーが設置されている。同様にセンターパイプの中間部も伝熱管群支持プレートを介して内胴内側のストッパーにより固定される。

センターパイプとマニホールド型高温管板は、一体構造となっており、高温管板と伝熱管下部連絡管の伸び差は連絡管の曲げ変形により吸収される。

中間熱交換器は、Fig. 2. 4 に示されるように、胴部のサポートスカートを介して原子炉格納容器内の中間熱交換器室床面に設置される。

### 2.2 振動解析方法

複雑な構造物である中間熱交換器に対しすべて詳細な有限要素モデルを適用することは、計算コストの点などで問題が多く、特に実際の地震波を入力とする時刻歴応答解析においては多大な計算時間を必要とするため、現実的ではない。このために従来は、構造物を剛性の等価な hari と質点でモデル化したいわゆる「バネ・マスモデル」がよく使われており、軽水炉等の機器の解析例も多い。しかしながら、この簡略モデルの場合、モデルの設定方法によっては問題とすべき局所的な構造要素の振動挙動を正確に求められない場合もある。そこで、本解析では以下に示す手順でモデル化を進めることにした。

- i) 中間熱交換器の内部構造をいくつかの構造構成要素の集合体とみなし、個々の構造要素に対して詳細部分モデルを作成する。
- ii) 詳細部分モデルを組合せることにより内部構造の詳細モデルを作成する。
- iii) 内部構造の個々の構造要素を、バネ・マス系で表わした内部構造簡略モデルを作成する。この時、各構造要素の結合部に対しては、必要に応じて有限要素解析を行い、結合部の剛性等を算出する。

- iv) 内部構造の詳細及び簡略モデルの固有値解析を行い変形モード及びそれに対応した固有振動数を比較することにより簡略モデルの妥当性を確認する。この場合、必要に応じて簡略モデルの剛性等を修正する。
- v) 内部構造の簡略モデルに内・外胴容器のバネ・マスモデルを結合し、全体簡略モデルを作成する。
- vi) 全体簡略モデルに対し、地震時における中間熱交換器設置床応答値を入力値として時刻歴応答解析を行う。
- vii) 下部連絡管など、局所的な振動挙動が問題となる構成要素に対しては全体簡略モデルの時刻歴応答解析により得られた構造要素結合部の変位を部分詳細モデルの入力条件として解析を実施し、応力評価等を行う。

上に述べた解析のフローチャートを Fig. 2.5 に示す。

前節でも述べたが、中間熱交換器のセンターパイプ及び伝熱管群の防振用にストッパーが設置されているが、熱膨張を考慮し、各伝熱管群支持プレート間あるいは最外層の支持プレートと内胴内側の断熱材ライナとの間にはギャップが設けられている。時刻歴応答解析を実施する場合には、このギャップを考慮したモデルにより解析する必要があるが、本報告は振動特性、即ち、固有値解析までの結果について示す。

Table 2.1 Main specifications of IHX

	A loop	B loop
type	helical coil	helical coil
heating area (m <sup>2</sup> )	1190	1495
heat tube ; size (mm) ; number	$\phi 31.8 \times 4t$ 270	$\phi 25.4 \times 4t$ 474
number of layers of coils	13	17
material	Hastelloy XR	Hastelloy XR

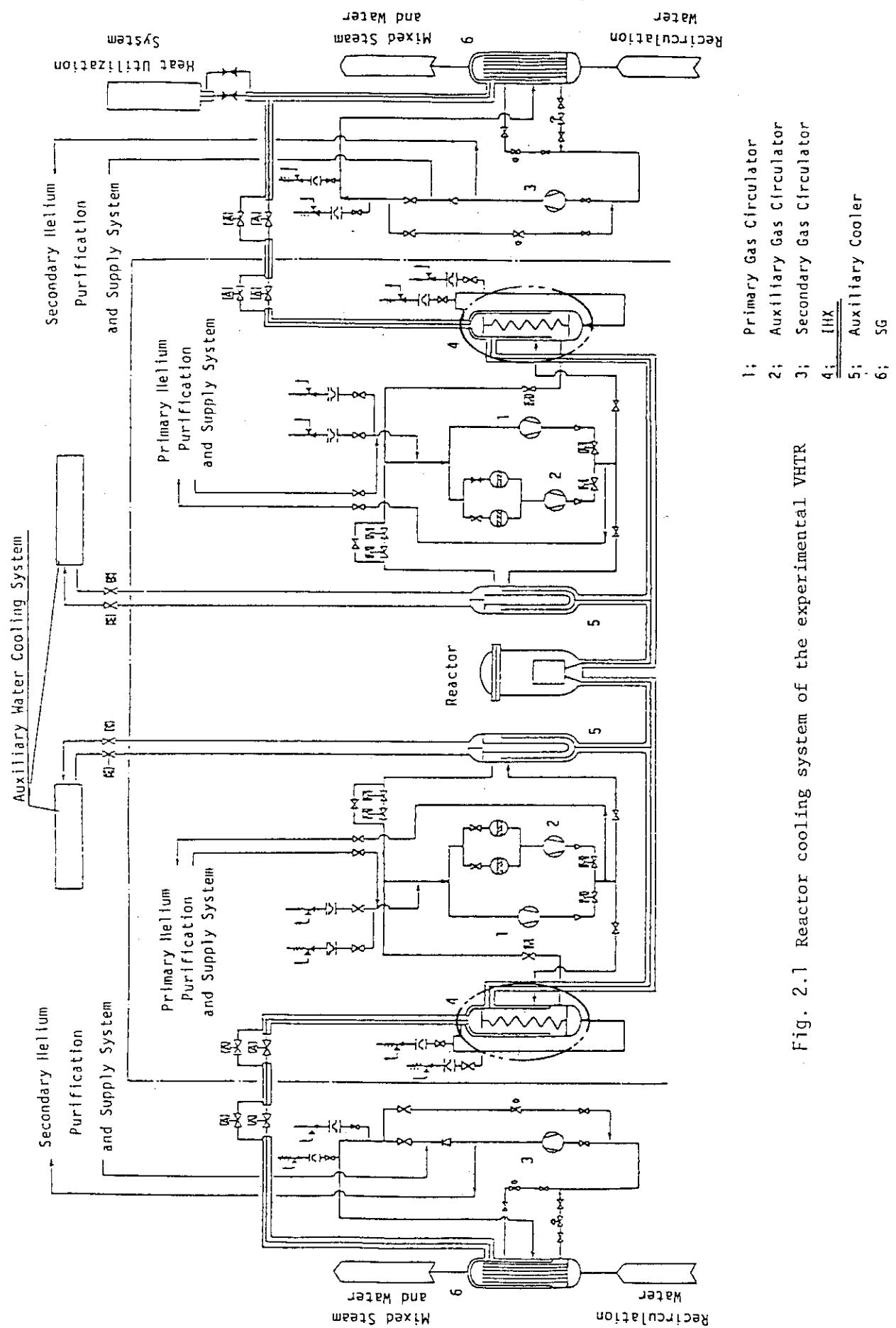


Fig. 2.1 Reactor cooling system of the experimental VHTR

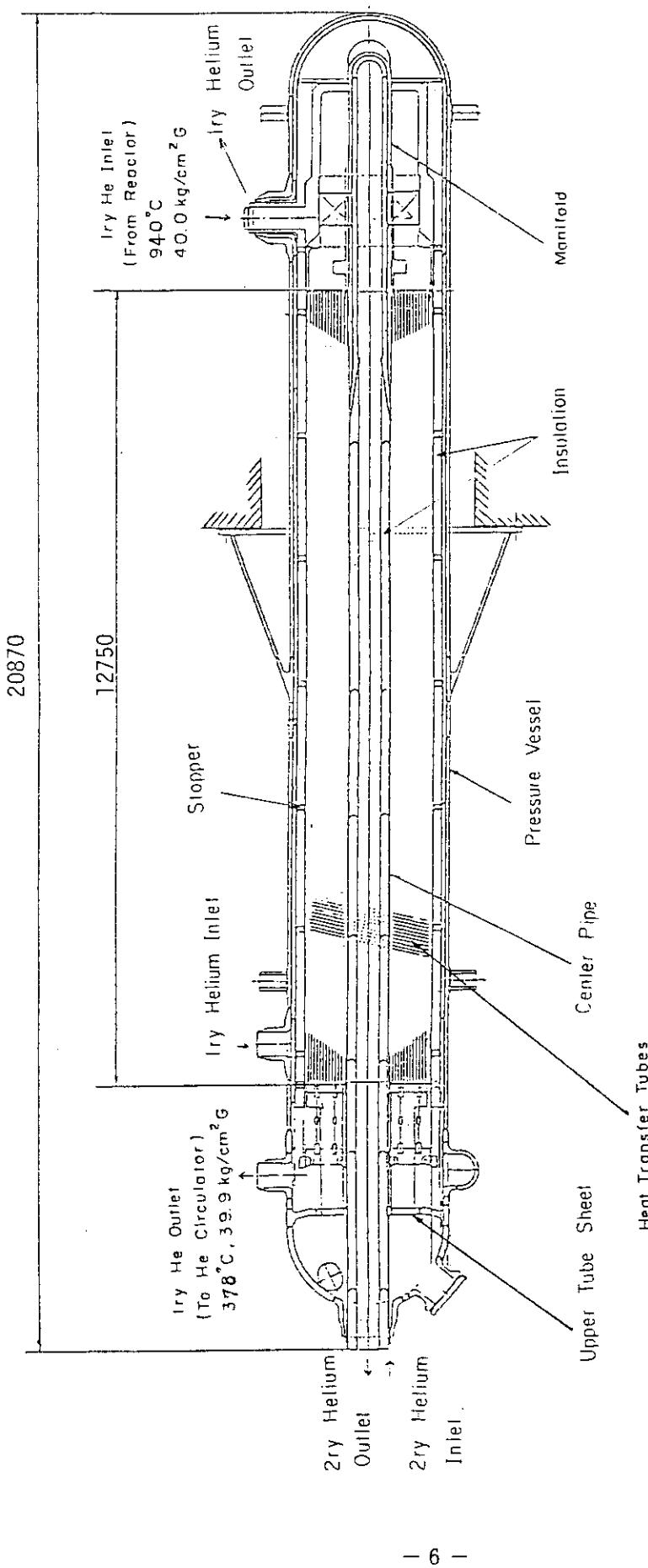


Fig.2.2 Intermediate Heat Exchanger (A-loop)

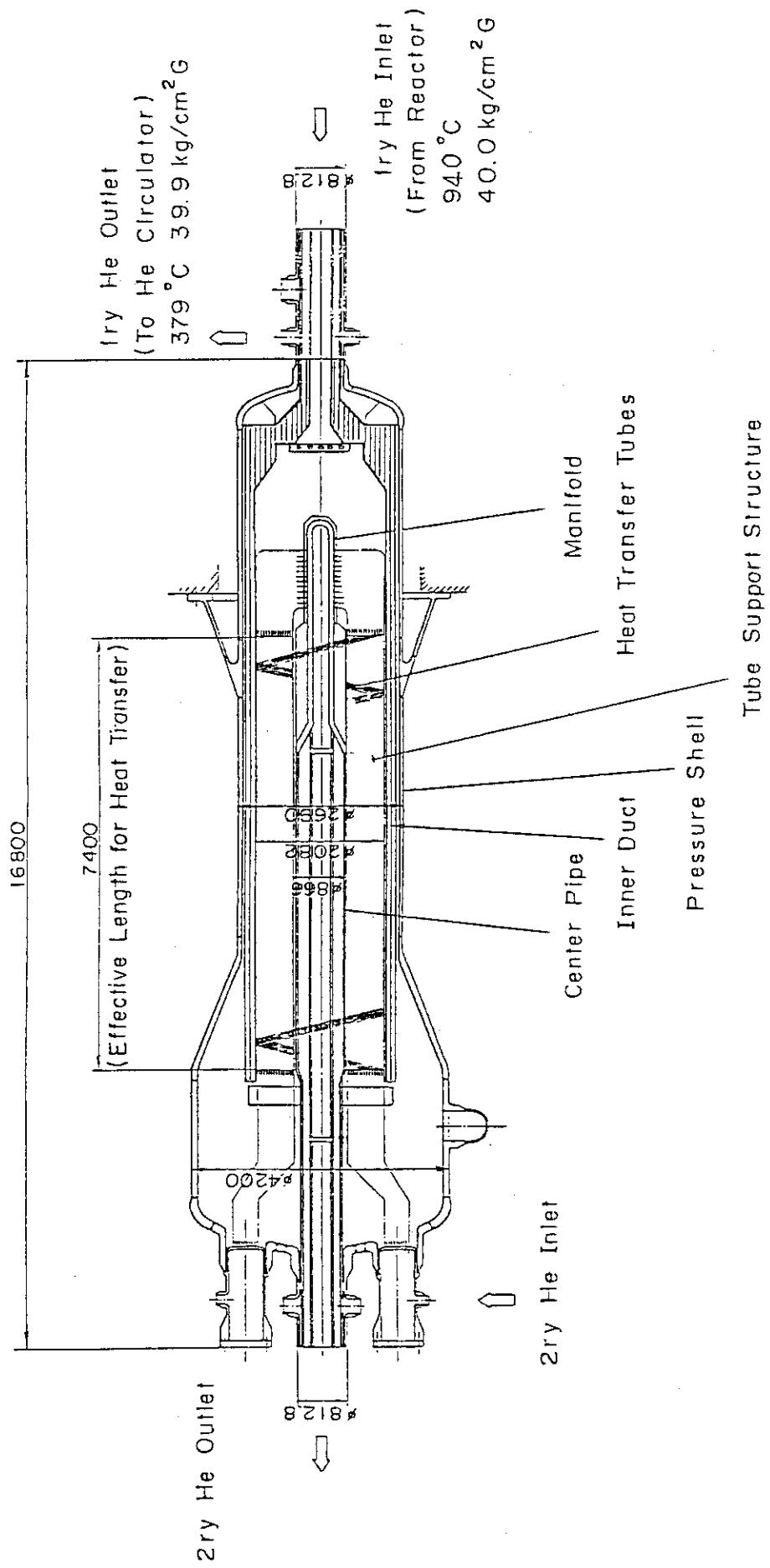


Fig. 2.3 Intermediate Heat Exchanger (B-loop)

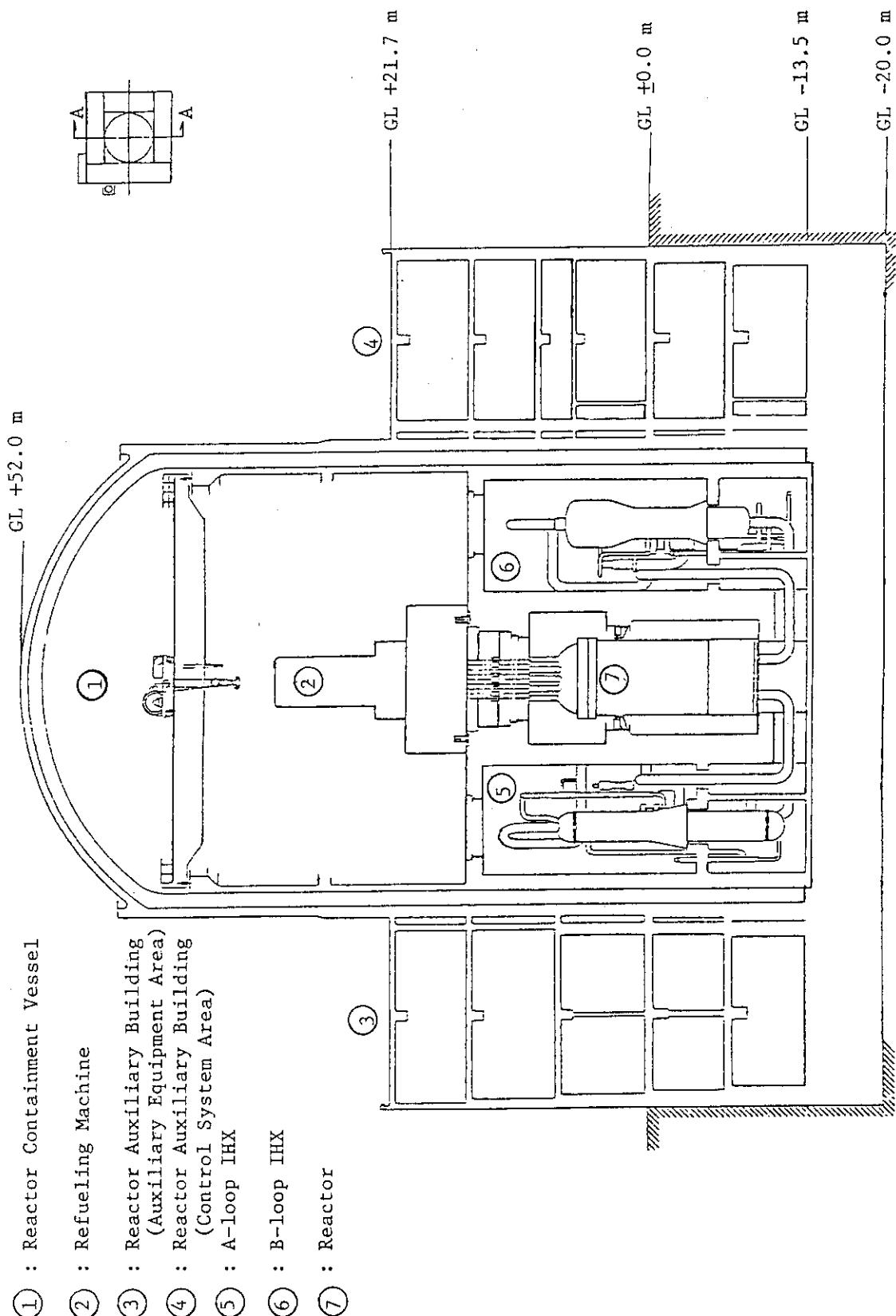


Fig. 2.4 Reactor building of the experimental VHTR (A-A section)

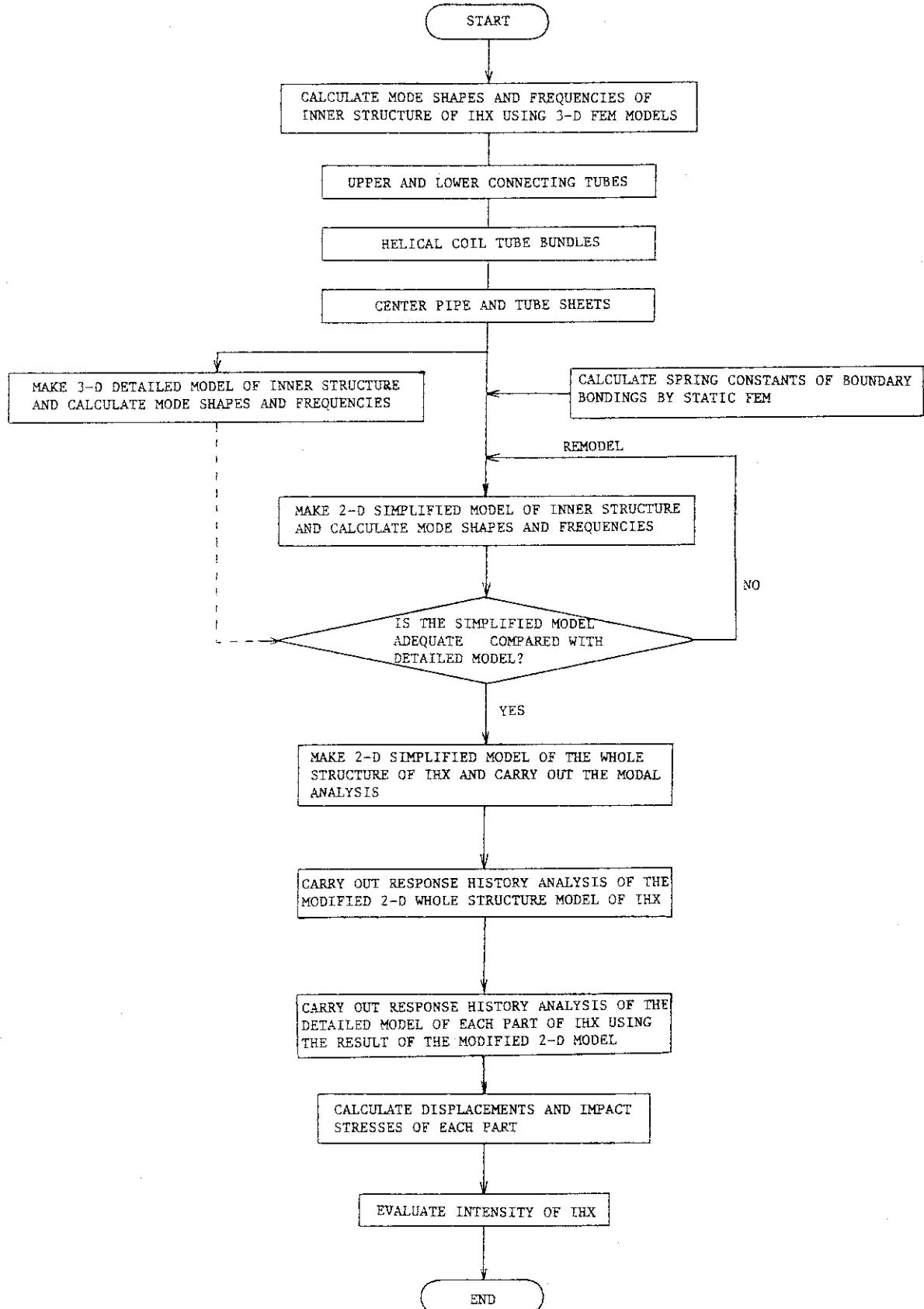


Fig. 2.5 Flow chart of seismic analysis of the experimental VHTR Intermediate Heat Exchanger (IHX)

### 3. 内部構造物詳細モデルの作成

Fig. 2.5 のフローチャートに従い、中間熱交換器の内部構造を部分構造要素に分割して詳細部分モデルを作成する。このモデルに対し、固有値解析を行い、さらにこれらを結合して内部構造物詳細モデルを作成する。

まず初めに、中間熱交換器の内部構造要素である

- i) 上部及び下部連絡管部
- ii) ヘリカルコイル伝熱管群及びサポート部
- iii) センターパイプ及び管板部

の有限要素モデルについて述べる。次に、これらの解析結果等をもとにして作成した内部構造物詳細モデルについて説明する。なお、ここでの解析は、A ループの中間熱交換器を対象としている。

#### 3.1 上部及び下部連絡管部の詳細部分モデル

上部連絡管はヘリカルコイル部より立ち上がり、上部低温管板に至る部分である。伝熱管内部を低温の2次ヘリウム、胴側を低温の1次ヘリウムが流れるため、通常運転時においては、400 °C 以上になることはない。熱膨張による変形は下方に自由に伸縮することにより吸収する構造となっており、比較的曲管部の少ない形状となっている。

一方、下部連絡管は高温の下部マニホールド管板より立ち上がりヘリカルコイル部へ至る部分で、900 °C 以上の高温となる。また、センターパイプと伝熱管群に生じる熱膨張差を曲げ変形により吸収するために、上部連絡管に比較して曲管部の多い形状となっている。

それぞれの連絡管と接続しているヘリカルコイル部での伝熱管支持条件は、実際には伝熱管軸方向のみ自由という条件であるが、解析に用いた有限要素プログラム SAP V ではこのような境界条件を設定することが困難である。そこで、連絡管に接続するヘリカルコイル部のモデル化は以下に述べるような方法で行った。

- i) 連絡管に接続するヘリカルコイル部を3ターンだけ接続する。
- ii) ヘリカルコイル伝熱管の支持条件として、剛性の大きな短いはりを接続し、結合部の境界条件として、ヘリカルコイル水平方向の回転自由のピン結合とする。

また、管板部では、管板の剛性が伝熱管の剛性と比較して十分大きいので、管板部に相当する位置で完全固定とする。

有限要素としては3次元の直線及び曲線パイプ要素、はり要素を用いた。

Fig. 3.1 は、連絡管長が最も長く、固有振動数が最も低くなるヘリカルコイル最外層に接続する上部連絡管及び下部連絡管の3次元詳細部分モデルを示したものである。

最外層上部連絡管に対する固有値解析結果を、Table 3.1 に、1次から4次までの変形図を Fig. 3.2 に示す。また最外層下部連絡管に対する固有値解析結果を、Table 3.2 に、1次から

4次までの変形図をFig. 3.3に示す。解析結果に示されるように、最外層上部連絡管の1次モード固有周波数は約35Hzであり、最外層下部連絡管の1次モード固有周波数は約17Hzである。

### 3.2 ヘリカルコイル伝熱管群及びサポート部の詳細部分モデル

Fig. 3.4に、Aループ中間熱交換器の伝熱管支持構造図を示す。<sup>5)</sup>ヘリカルコイル伝熱管は、同一のコイル径の管群毎に円周方向8箇所に等間隔に配置された伝熱管支持プレートにより支持される。また、ヘリカルコイル伝熱管のコイル半径方向の動きを自由にするために、支持プレートの上端はいわゆるカーテンレール方式である。参考のためにFig. 3.5にBループ中間熱交換器の伝熱管支持構造図を示した。図に示されるように、支持プレートの構造自体はAループとほぼ同様であるが、その配置と枚数が異なっている。

以上述べた様に、例えばAループにおけるヘリカルコイル伝熱管群は、コイル半径方向に13層、軸方向に255段のリング状に支持プレートと複合構造物を構成しており、すべての伝熱管を詳細にモデル化することは、非現実的である。そこでまず、代表的な3本、即ち、最内層、中間層及び最外層の伝熱管を抽出し、パイプ要素とはり要素を用いてモデル化し、伝熱管群としての振動特性を把握することにした。モデル化されたヘリカルコイル伝熱管をFig. 3.6に示す。

最内層、中間層及び最外層ヘリカルコイル伝熱管の固有値解析結果をそれぞれTable 3.3、Table 3.4及びTable 3.5に示す。また、1次モードから3次モードまでの変形図をFig. 3.7に示す。

これらの変形図に示されるように、伝熱管群としての振動挙動は、上下の連絡管及びサポートロッドの剛性によって支配されることが明かになった。これは、伝熱管支持プレートのセンターパイプ長手方向の剛性が、同方向のヘリカルコイル伝熱管の剛性に比較して十分大きいことによる。

### 3.3 センターパイプ及び管板部の詳細部分モデル

センターパイプは上部より吊り下げられた構造で、下端にはマニホールド管板が一体となっている。センターパイプ内部は、マニホールド部を除いて断熱材でおおわれており、マニホールド部は外側を断熱材でおおわれている。また、上部には伝熱管群支持プレートを支持するためのサポートラグが取付けられており、下部のマニホールド管板では、下部連絡管群と接合している。

本解析においては、センターパイプ、上部管板、下部マニホールド管板を3次元8節点固体要素に分割してモデル化した。センターパイプの断熱材及び断熱材ライナーの剛性は、センターパイプの剛性に比較して無視できると考え、モデル化に当ってはセンターパイプへの付加質量としてのみ考慮した。

### 3.4 内部構造物詳細モデルおよびその固有値解析

前節までに述べた構造要素モデルをもとに、以下に述べるような内部構造物詳細モデルを作成した。

ヘリカルコイル伝熱管群のセンターパイプ長手方向の剛性は、同方向の支持プレートの剛性より十分小さいのでヘリカルコイル伝熱管群は、支持プレートへの付加重量として取扱う。ただし、支持プレートはヘリカルコイル伝熱管群によってセンターパイプ中心軸に対する半径方向の動きを拘束されるので円周方向に等間隔に配置された支持プレートを質量のない剛体リングで結合する。ところで、Fig. 3.4 で示したように、実際の構造では、支持プレートはセンターパイプ中心軸の半径方向に 13 層分存在するが、モデル化においては、この 13 本の支持プレートを半径方向に剛に結合された 1 枚板状として断面 2 次モーメントを算出して 1 本のはりで表わす。

以上により、ヘリカルコイル伝熱管群及び支持プレートは、合計 8 本の中間層に位置するはりと剛体リングによりモデル化されることになる。

次に連絡管部のモデル化について説明する。実際の構造では、270 本の伝熱管が上部及び下部において、それぞれ上部低温管板及び下部マニホールド管板に接続している。本解析においては、Fig. 3.8 に示すように、8 本の支持プレートを拘束している最下段の剛体リングと、下部マニホールド管板部を結ぶ 8 本の中間層伝熱管（パイプ要素）で下部連絡管を模擬する。ここで、8 本のパイプ要素の剛性は、270 本の伝熱管の剛性と等価になるように（ここでは、ヤング率を 270/8 倍して）与えた。上部連絡管についても同様にして、最上段の剛体リングと上部低温管板を結ぶ 8 本のパイプ要素でモデル化している。

以上によりモデル化されたセンターパイプ及び接合する構造物のモデル図を Fig. 3.9 に示す。また、各構造部材の断面性能について Table 3.6 に示す。境界条件としては、センターパイプ最上部、上部低温管板最外周及び支持プレートサポートラグ端部を完全固定とし、伝熱管支持プレートサポートロッドの両端をピン結合とした。

Fig. 3.10 に 1 次から 5 次までの各モードにおける変形図を示す。実際の計算結果では、同一周波数を持ち、変形方向が互いに 90 度回転したモードが得られたが、これは、モデルが物理的に完全に軸対称であるために出現したモードで、同一のモードと見なした。

1 次モードの固有周波数は約 0.41 Hz であり、センターパイプと伝熱管群が同位相で振動するモード、2 次モードは、固有周波数約 1.5 Hz、センターパイプと伝熱管群が逆位相で振動するモード、3 次モードは、固有周波数約 2.4 Hz、伝熱管群はほぼ停止し、センターパイプが振動するモード、4 次モードは、固有周波数約 7.4 Hz、センターパイプ固有の 2 次モードと、支持プレート固有の 1 次モードが出現しており、5 次モードは、固有周波数約 9.0 Hz、センターパイプ固有の 2 次モードが出現している。

Table 3.1 Natural frequencies of the upper connecting tube

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	217.33	34.59	0.0289
2	279.26	44.45	0.0225
3	608.02	96.77	0.0103
4	1533.8	244.1	0.0041

Table 3.2 Natural frequencies of the lower connecting tube

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	109.82	17.48	0.0572
2	316.86	50.43	0.0198
3	503.60	80.15	0.0124
4	713.52	113.6	0.0088
5	1346.8	214.4	0.0047

Table 3.3 Natural frequencies of the innermost helical tube with support plates

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	20.719	3.298	0.3025
2	22.194	3.532	0.2308
3	62.523	9.951	0.1005

Table 3.4 Natural frequencies of the midium helical tube with support plates

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	20.073	3.195	0.3130
2	21.943	3.492	0.2863
3	42.880	6.825	0.1465

Table 3.5 Natural frequencies of the outermost helical tube with support plates

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	14.793	2.354	0.4247
2	15.551	2.475	0.4040
3	49.109	7.816	0.1279

Table 3.6 Sectional properties of the components of the inner structure of IHX

No	Component	Modelling	Sectional figure	Material	Bending moment of inertia ( $\text{cm}^4$ )	Effective torsional moment of inertia ( $\text{cm}^4$ )	Effective weight density ( $\text{Kg/cm}^3$ )	Gross sectional area ( $\text{cm}^2$ )
1	Center pipe	actual figure	$\text{o/d}:70 \text{ cm}$ $t : 3 \text{ cm}$ pipe	Hastelloy-XR	—	—	$9.81 \times 10^{-3}$	631.46
2	The lower part of center pipe	actual figure	$\text{o/d}:52 \text{ cm}$ $t : 60 \text{ cm}$ pipe	Hastelloy-XR	—	—	$9.93 \times 10^{-3}$	867.08
3	Manifold type tube sheet	equivalent solid	ligament efficiency =0.72	Hastelloy-XR	—	—	$9.68 \times 10^{-3}$	624.32
4	Upper tube sheet	equivalent solid	ligament efficiency =0.68	Hastelloy-XR	—	—	$8.23 \times 10^{-3}$	—
5	Support plates of helical tube bundles	equivalent beam	box type $5 \times 5 \text{ cm}$ $t : 0.8 \text{ cm}$	Hastelloy-XR	$I_2=5.21 \times 10^2$ $I_3=6.18 \times 10^4$	$2.310 \times 10^3$	$3.636 \times 10^{-2}$	174.72
6	Support rods	equivalent beam	$\text{o/d}:2.4 \text{ cm}$ circular section	$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steel	$I_2=1.63$	3.2572	$1.65 \times 10^{-2}$	9.047
7	Support lug	equivalent beam	width: 8 cm height: 25 cm rectangular section	$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steel	$I_2=1.667 \times 10^1$ $I_3=2.604 \times 10^3$	$3.165 \times 10^1$	$8.23 \times 10^{-3}$	50.0
8	The upper and the lower connecting tube	equivalent pipe	$\text{o/d}:3.18 \text{ cm}$ $t : 0.4 \text{ cm}$ pipe	Hastelloy-XR	—	—	unit length $9.70 \times 10^{-1}$ $\text{kg/cm}$	—
9	Rigid body ring	pipe	$\text{o/d}:3.18 \text{ cm}$ $t : 0.4 \text{ cm}$ pipe	—	—	—	—	—

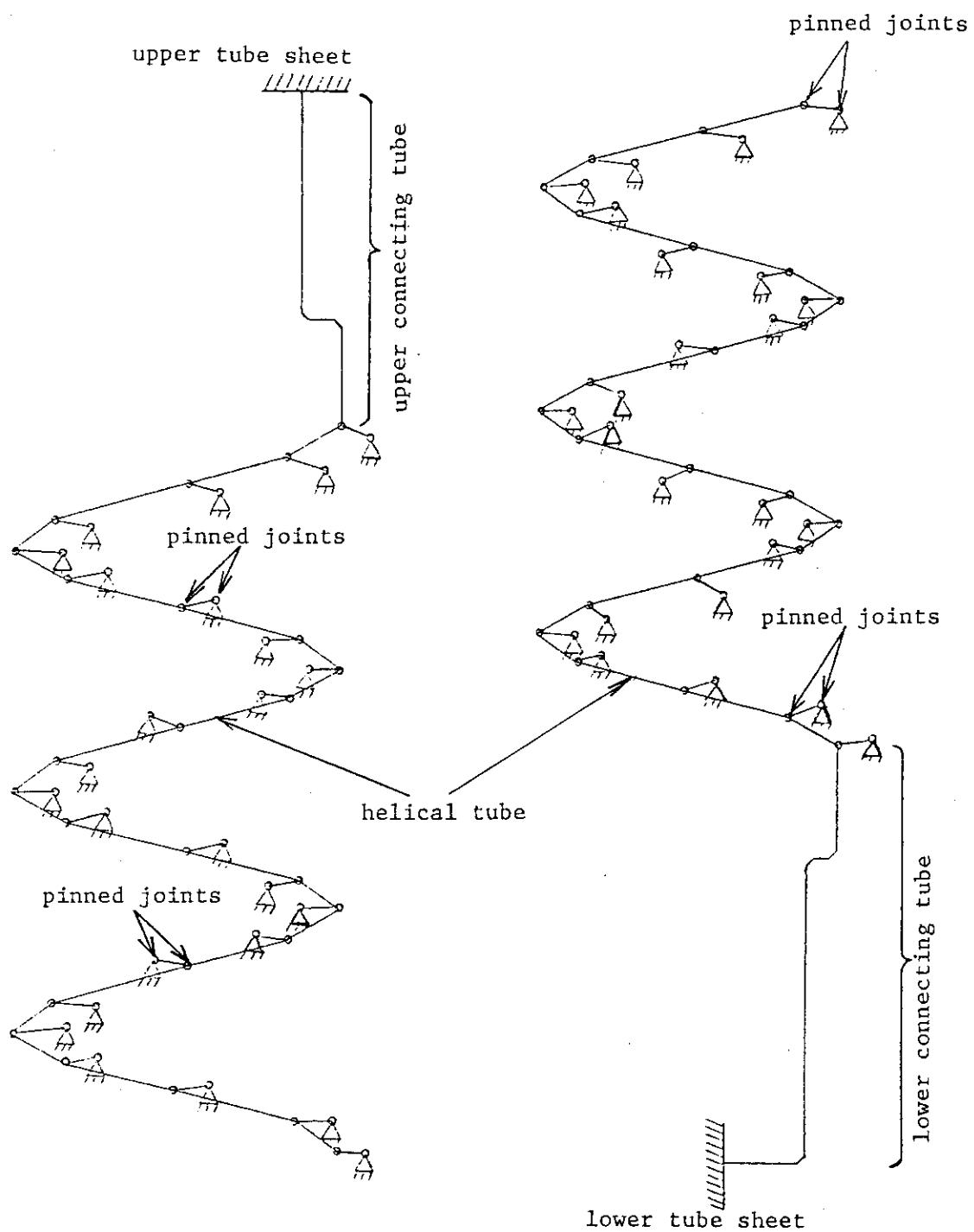


Fig. 3.1 Analytical model of the upper and the lower connecting tubes

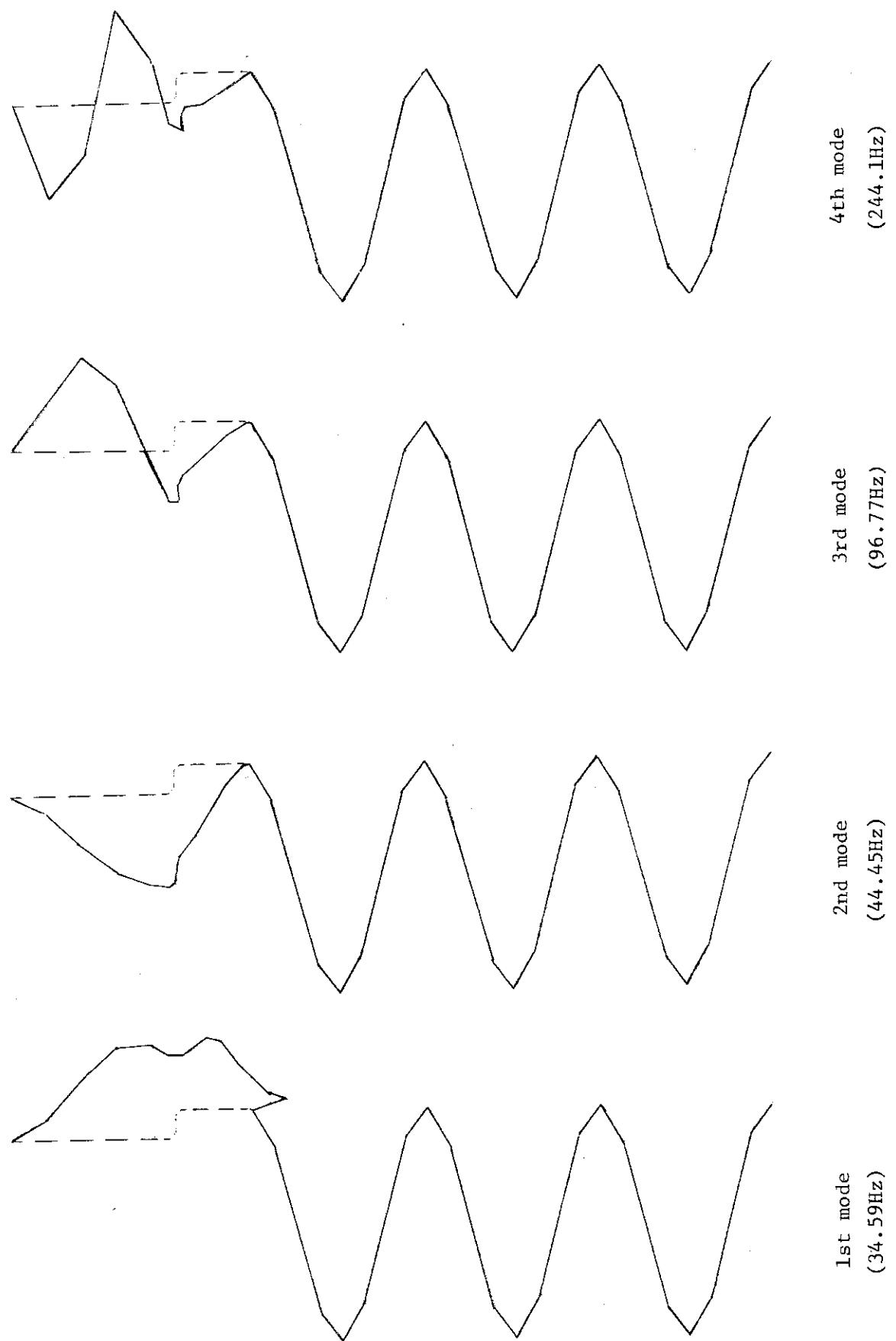


Fig. 3.2 Mode shapes of the upper connecting tube

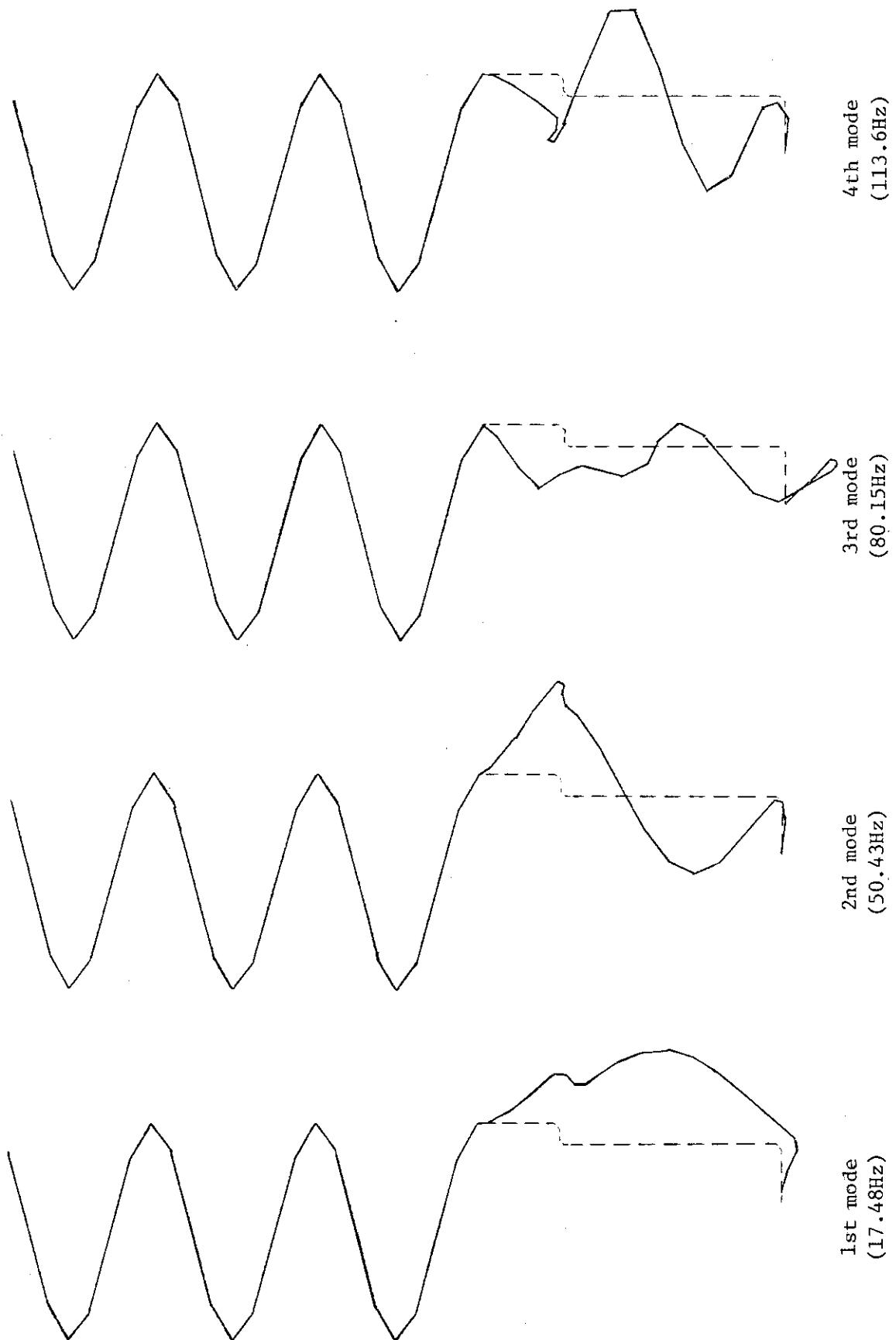


Fig. 3.3 Mode shapes of the lower connecting tube

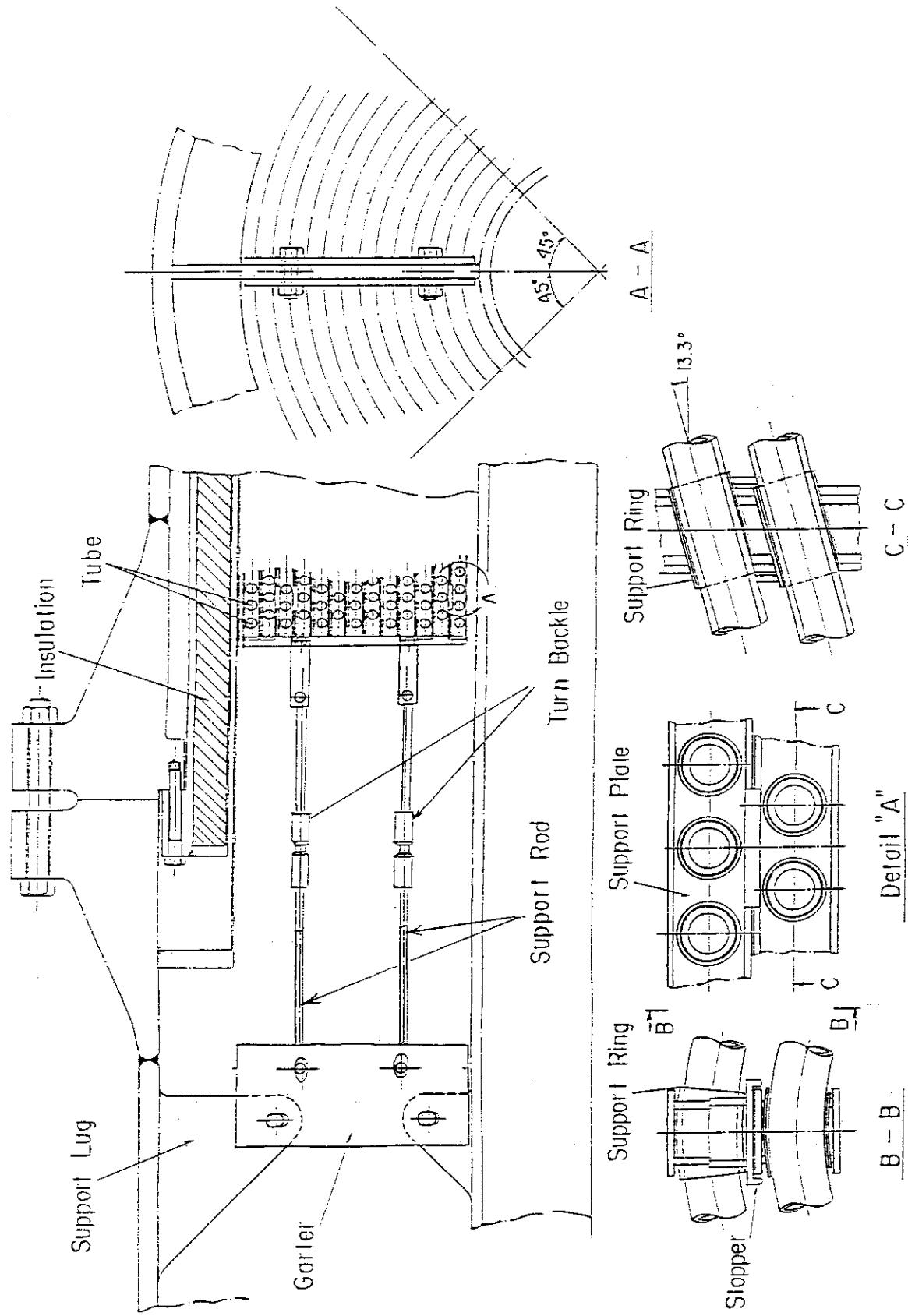


Fig. 3.4 Tube support structure of A-loop THX

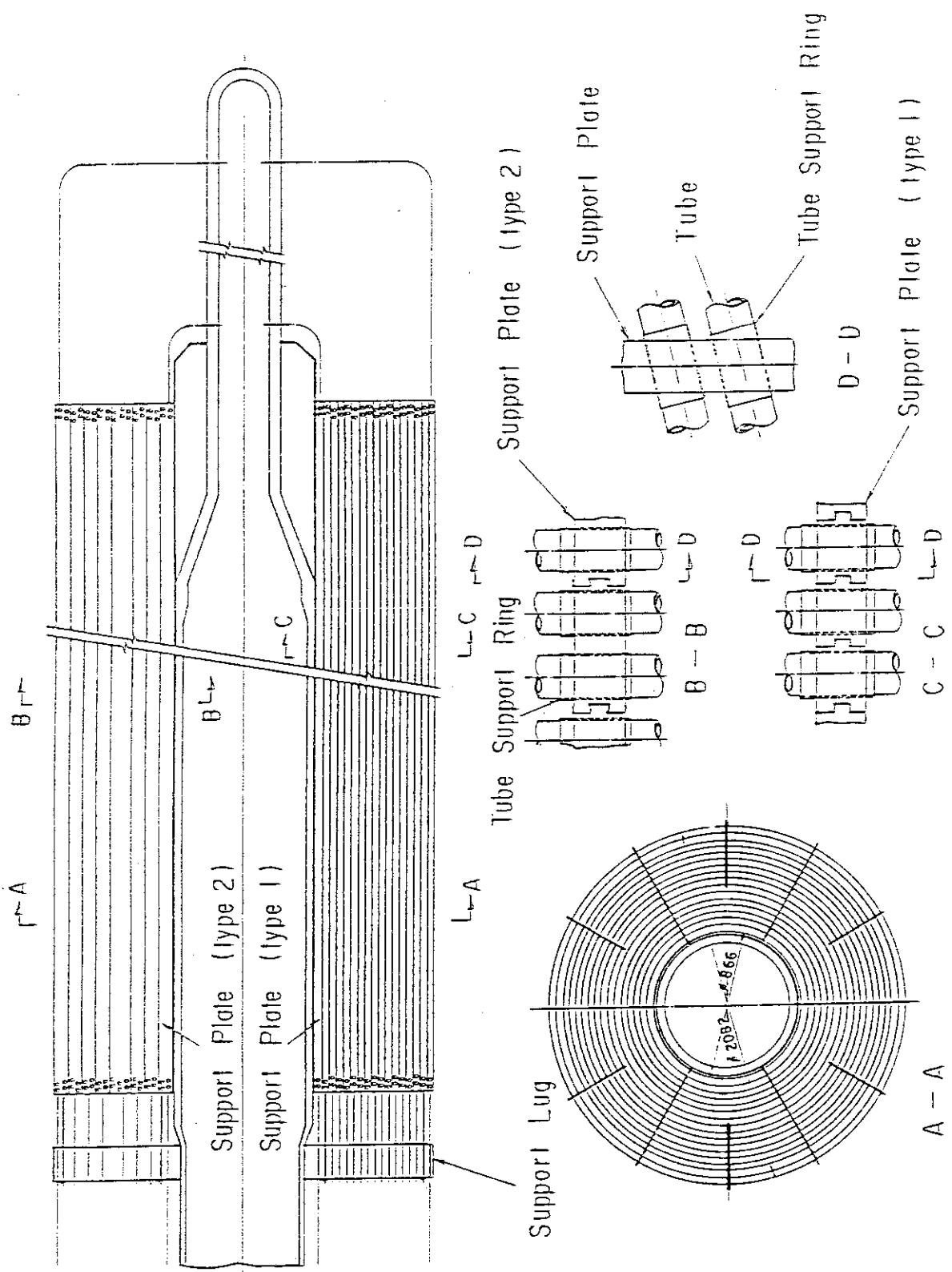


Fig. 3.5 Tube support structure of B-loop IHX

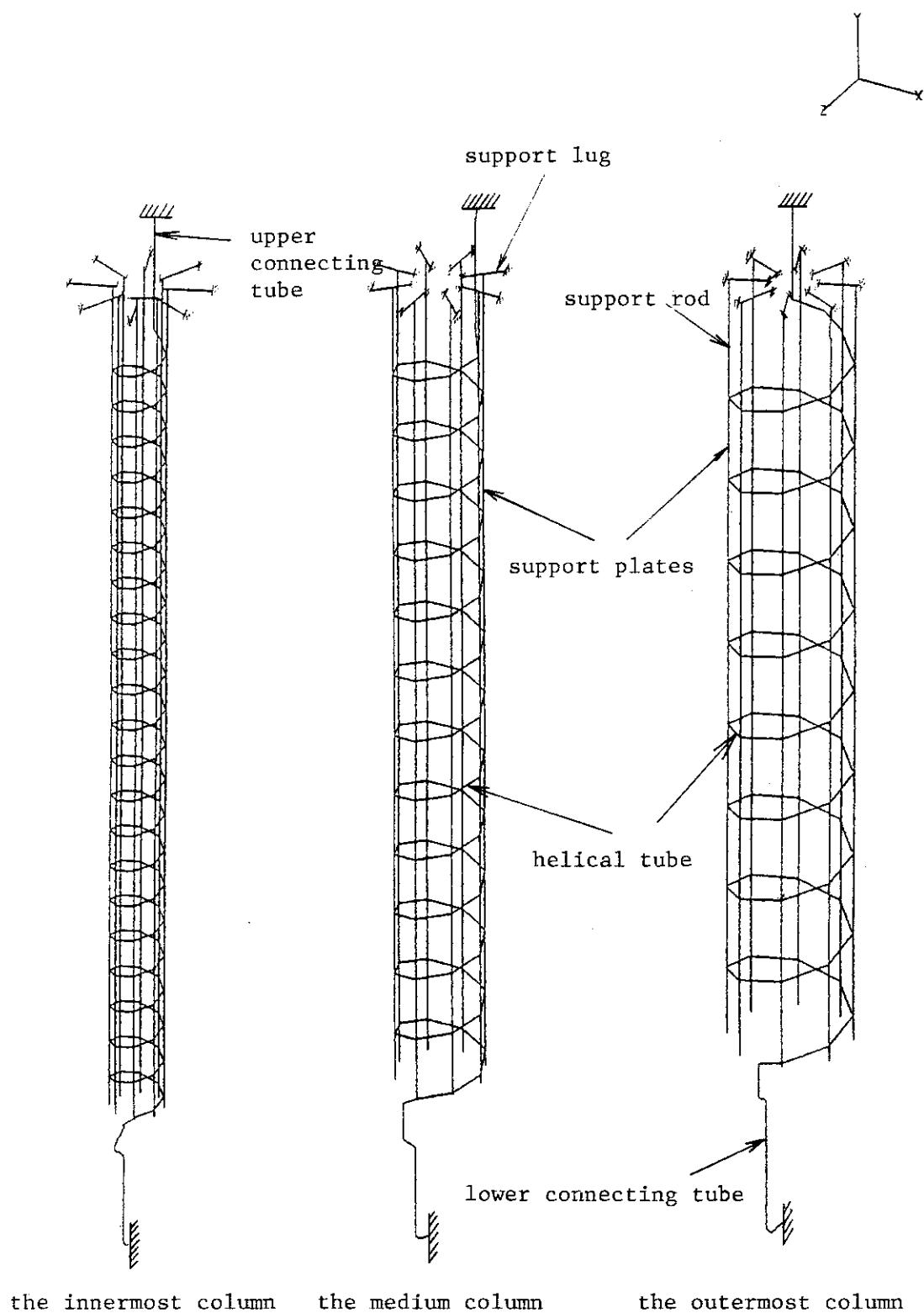


Fig. 3.6 Analytical model of the helical tube with support plates

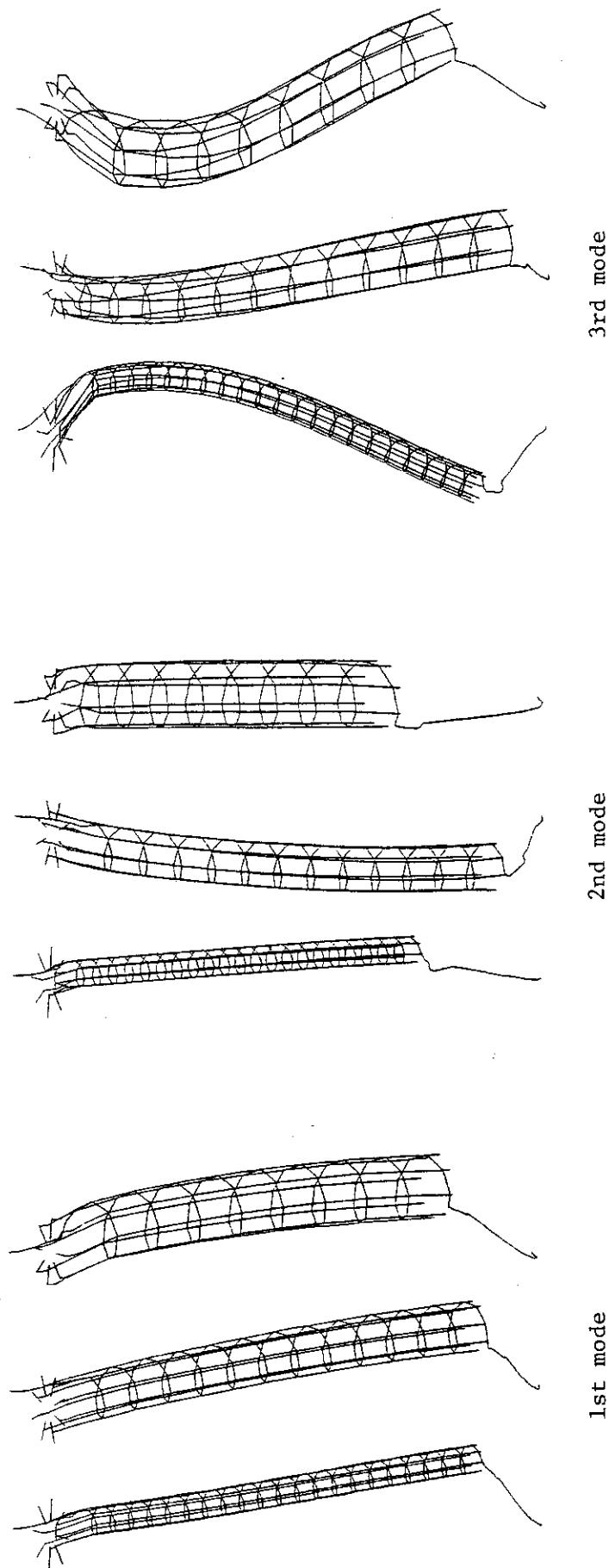


Fig. 3.7 Mode shapes of the helical tube with support plates; comparison of the each column

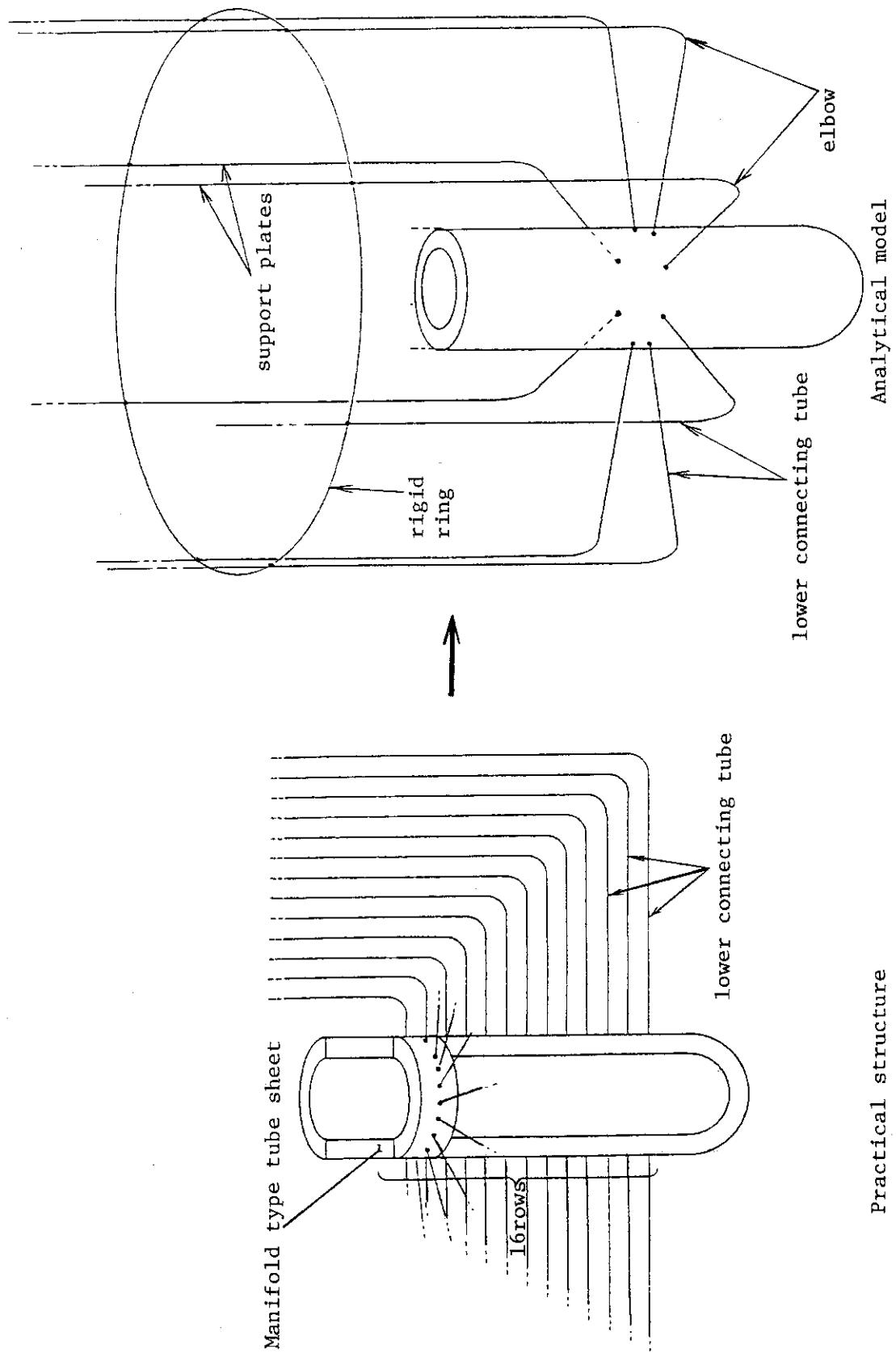


Fig. 3.8 Analytical model of the lower connecting tube

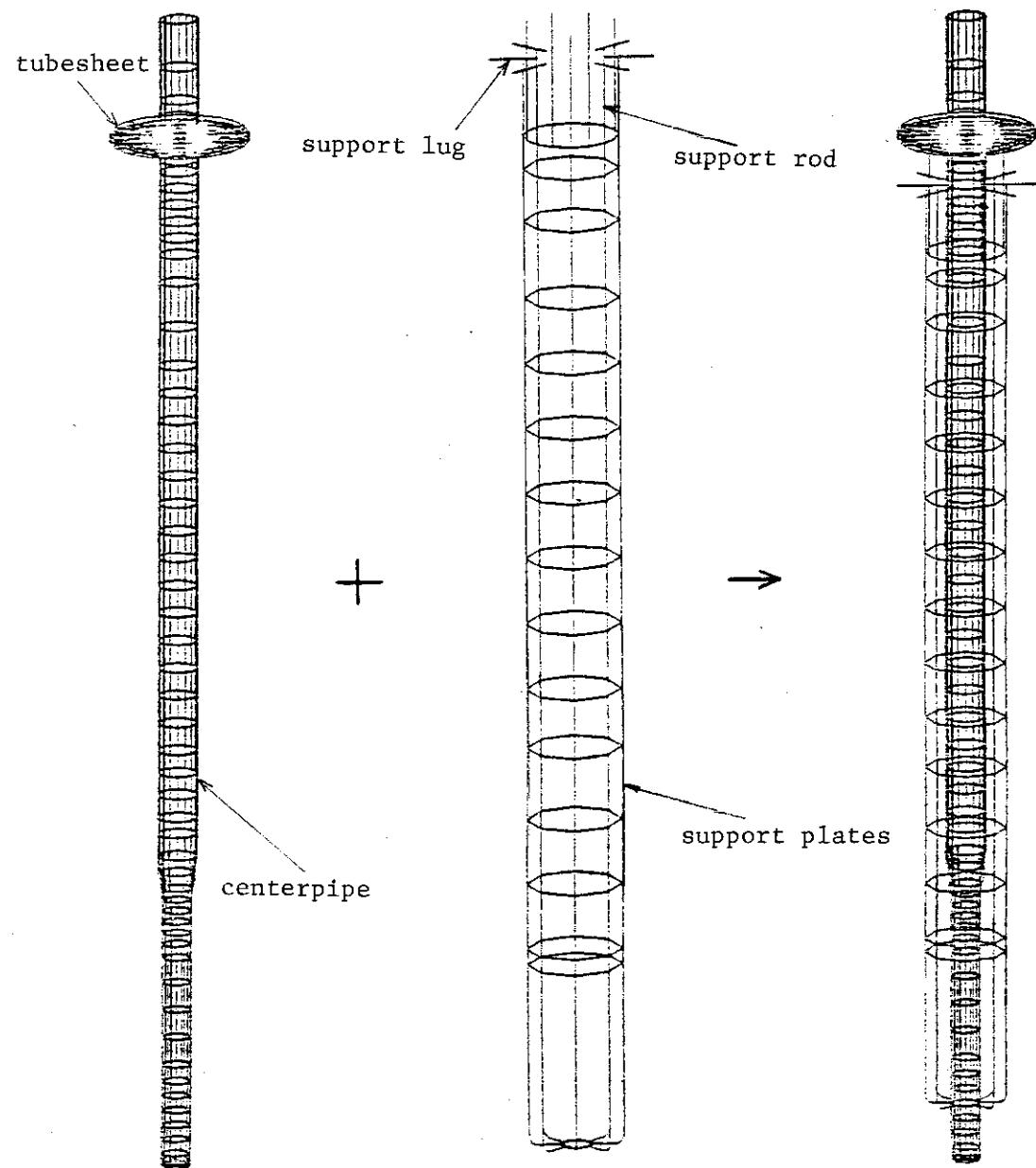


Fig. 3.9 Model of centerpipe, tubesheet, tube bundles and connecting tubes

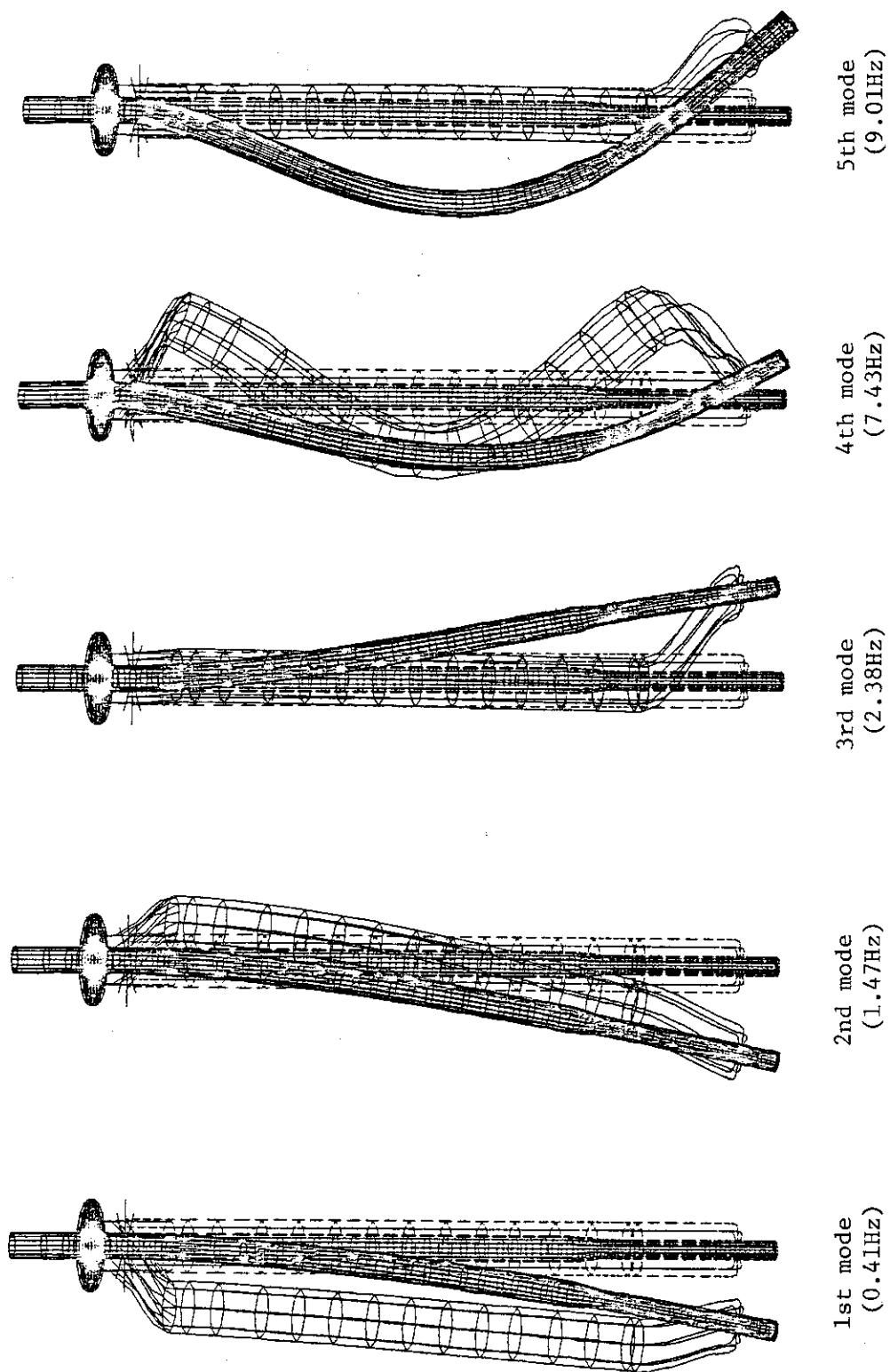


Fig. 3.10 Mode shapes of the detailed model of the inner structure of IHX

## 4. 簡略モデルの作成と固有値解析

本章では、内部構造物のバネ・マス簡略モデルを作成して詳細モデルとの比較検討を行い、さらに全体構造物簡略モデルを作成する。

### 4.1 内部構造物の簡略モデル

#### (1) 構造要素のモデル化

簡略モデルは、各構造部材を剛性の等価なはり要素、またはパイプ要素及び集中質点で置換した2次元モデルである。内部構造物の各構造要素の具体的なモデル化方法について以下に示す。

##### ①センターパイプ

円管断面形状として断面2次モーメント等を算出する。断熱材及び断熱材ライナーは付加重量として各質点に与える。

##### ②マニホールド管板

円管断面形状として断面2次モーメント等を算出する。ただし、伝熱管の接続する穴の面積分の補正を加える。

##### ③上部及び下部連絡管

円形断面形状としてヤング率を270倍して与える。重量についても同様に与える。ヘリカルコイル中間層に接続する連絡管で代表する。

##### ④ヘリカルコイル伝熱管群

剛性は無視し、支持プレートへの付加重量としてのみ考慮する。

##### ⑤伝熱管群支持プレート

箱型断面形状として13層を1枚板で剛に結合されているとして算出する。モデルの2次元化に伴い、8方向のうち4本分を与える。

##### ⑥上部低温管板及びサポートラグ

静的解析により求めた荷重と変位の関係により、剛性の等価なはりまたはばねに置換える。

#### (2) 結合部のモデル化

Fig. 2.2に示したように、中間熱交換器上部の低温管板及びサポートラグは、センターパイプ、伝熱管群などの内部構造物と内・外胴を結合している。これらの結合部については、軸変形を考慮したはり要素で置換した。前述のように、この場合の等価なはり要素の剛性は静的有限要素法による解析から定めた。Fig. 4.1に上部低温管板モデル図を、Fig. 4.2にメッシュ分割図をそれぞれ示す。また、Fig. 4.3にサポートラグのモデル図を、Fig. 4.4にメッシュ分割図をそれぞれ示す。モデルは、内側に剛体リングを設け、この剛体リングに自重または強制変位を与えた時の変位と力の関係から等価なはりのヤング率及び断面2次モーメント等を求めている。なお、具体的な算出方法については Appendix - 1 に示す。

Fig. 4.5からFig. 4.8までに、それぞれの変形図を示した。

以上の方針により得られた内部構造物の簡略モデル図をFig. 4. 9に、その要素分割図をFig. 4. 10に示す。また、内部構造物の節点データをTable 4. 1に、各要素の要素データをTable 4. 2に示す。

### (3) 内部構造物簡略モデルの固有値解析

前述で作成した内部構造物簡略モデルの固有値解析を行い、第3章において実施した内部構造詳細モデルの固有値解析との比較検討を行った上で、変形モードとそれに対応する固有周波数ができるだけ一致するように簡略モデルの剛性等を修正した。剛性修正の主な箇所を以下に示す。

①サポートロッドは、上下ともにピン結合となっているが、簡略化モデルでは完全固定としたため、平面保持を考慮しないで求めた断面2次モーメントの8本分を与えていたが、これを4本分とした。

②上部及び下部連絡管の剛性はヤング率を270倍して与えていたが、固有周期と変形モードが一致するまでパラメータとして変化させ、最終的には、当初の0.45倍の値を採用した。

Table 4. 3に内部構造物の詳細モデルの固有値解析結果をTable 4. 4に簡略モデルの固有値解析結果をそれぞれ示す。また、Fig. 4. 11及びFig. 4. 12に1次から4次までの各モードにおける変形図を、Fig. 4. 13に固有周期の比較をそれぞれ示した。これらの図表にも示されるように2つのモデルの固有値解析結果は良く一致しており、簡略モデルの妥当性が確認された。

## 4. 2 全体構造物簡略モデルの作成

内部構造物簡略モデルをもとに、全体構造物簡略モデルを作成する。内胴、外胴及びサポートスカート部は剛性の等価なはり要素で模擬し、また、内、外胴に接続される配管類及び上部、下部の防振ラグは、バネ要素によりモデル化した。全体構造簡略モデル図をFig. 4. 14に、要素分割図をFig. 4. 15に示す。内部構造物を除く各要素の断面性能をTable 4. 5に、各節点位置、集中質量をTable 4. 6にそれぞれ示す。尚、接続される配管類のばね定数は、多目的高温ガス実験炉詳細設計(I)における1次系配管の防振器のばね定数とし、外胴に接続される防振器については、その形状からばね定数を定めた。

## 4. 3 全体構造物簡略モデルの固有値解析

Table 4. 7に1次から10次までの各モードにおける固有周波数を示す。また、Fig. 4. 16に、1次から5次までの各モードにおける変形図を示す。1次モードの固有周波数は約0.42Hzであり、内、外胴の剛性が十分大きいことから、内部構造物だけの解析とほぼ一致している。尚、この1次モードは、センターパイプと伝熱管群が同位相で振動するモードである。

Table 4.1 Node weight and X,Y-distances of the simplified model of the inner structure of IHX

	Node number	X-distance (cm)	Y-distance (cm)	Node weight (Kg) $\times 10^3$	Node mass (Kg·sec <sup>2</sup> /cm)	Material
center pipe and manifold type tube sheet	1	0.0	70.	0.369	0.376	Hastelloy-XR Kaowool
	2		122.	0.454	0.463	
	3		176.1	1.711	1.745	
	4		380.	0.629	0.641	
	5		455.	0.881	0.898	
	6		480.	—	—	
	7		560.	0.584	0.596	
	8		640.	1.487	1.516	
	9		680.	—	—	
	10		880.	1.239	1.263	
	11		1080.	1.239	1.263	
	12		1280.	1.239	1.263	
	13		1480.	1.239	1.263	
	14		1680.	0.310	0.316	
	15		1730.	0.186	0.190	
	16		1760.	0.558	0.569	
	17		1850.	0.844	0.861	
	18		1940.	1.070	1.091	
	19		2070.	0.539	0.550	
	20		2157.	—	—	

Table 4.1 Node weight and X,Y-distances of the simplified model of the inner structure of IHX (continued)

	Node number	X-distance (cm)	Y-distance (cm)	Node weight (Kg) $\times 10^3$	Node mass (Kg·sec <sup>2</sup> /cm)	Material
upper connecting tube	21	30.	176.1	0.585	0.597	Hastelloy-XR
	22	57.5	176.1	0.585	0.597	
	23	70.	188.6	0.585	0.597	
	24	70.	380.	0.627	0.639	
	25	70.	455.	5.336	5.441	
support plates and helical tube bundles	26	70.	480.	—	—	Hastelloy-XR
	27		560.	6.099	6.219	
	28		680.	10.165	10.365	
	29		880.	10.165	10.365	
	30		1080.	10.165	10.365	
	31		1280.	10.165	10.365	
	32		1480.	10.165	10.365	
	33		1680.	0.310	0.316	
support rods	34	70.	1730.	0.035	0.036	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel
	35	70.	1790.	0.035	0.036	
*	36	70.	1830.	0.570	0.581	Hastelloy-XR
**	37	70.	1850.	0.573	0.584	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel
***	38	70.	1940.	5.300	5.404	Hastelloy-XR
fixed point	39	124.	1850.			
	40	124.	1940.			
	41	200.	1000.			

\*: upper connecting tube

\*\*: support lug

\*\*\*: lower tube sheet

Table 4.2 Sectional properties of each element of the simplified model of the inner structure of IHX

	node number i ~ j	length (cm)	cross sectional area (cm <sup>2</sup> )	bending moment of inertia (cm <sup>4</sup> )	Young's modulus (Kg/cm <sup>2</sup> )
center pipe and manifold type tube sheet	1 ~ 2	52.	867.1	$2.293 \times 10^5$	
	2 ~ 3	54.1	624.3	$1.57 \times 10^5$	
	3 ~ 4	203.9	867.1	$2.293 \times 10^5$	
	4 ~ 5	75.	867.1	$2.293 \times 10^5$	
	5 ~ 6	25.	749.3	$2.918 \times 10^5$	
	6 ~ 7	80.			
	7 ~ 8	80.			
	8 ~ 9	40.			
	9 ~ 10	200.			
	10~11	200.			
	11~12	200.			
	12~13	200.	631.5	$3.543 \times 10^5$	$1.77 \times 10^6$
	13~14	200.			
	14~15	50.			
	15~16	30.			
	16~17	90.			
	17~18	90.			
	18~19	130.			
	19~20	87.			
upper tube sheet	18~38	70.	100.	$1.728 \times 10^4$	$9.49 \times 10^7$
	38~40	54.			

Table 4.2 Sectional properties of each element of simplified model of the inner structure of IHX (continued)

	node number i ~ j	length (cm)	cross sectional area (cm <sup>2</sup> )	bending moment of inertia (cm <sup>4</sup> )	Young's modulus (Kg/cm <sup>2</sup> )
Support lug	17~37	70.	100.	2.314x10 <sup>4</sup>	6.48x10 <sup>7</sup>
	37~39	54.			
Support rods	34~35	60.	72.382	13.03	1.77x10 <sup>6</sup>
	35~37				
Support plates of helical tube bundles	25~26	25.	1.398x10 <sup>3</sup>	2.472x10 <sup>5</sup>	1.77x10 <sup>6</sup>
	26~27	80.			
	27~28	120.			
	28~29	200.			
	29~30	200.			
	30~31	200.			
	31~32	200.			
	32~33	200.			
	33~34	50.			
lower connecting tube	3~21	30.	191.4	2.151x10 <sup>8</sup>	2.151x10 <sup>8</sup>
	21~22	27.5			
	22~23	19.63			
	23~24	191.4			
	24~25	75.			
upper connecting tube	34~36	100.	110.	2.151x10 <sup>8</sup>	2.151x10 <sup>8</sup>
	36~38	110.			

Table 4.3 Natural frequencies of the detailed model of the inner structure of IHX

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	2.579	0.410	2.437
2	9.271	1.476	0.678
3	14.95	2.380	0.420
4	46.70	7.433	0.135
5	56.58	9.005	0.111

Table 4.4 Natural frequencies of the simplified model of the inner structure of IHX

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	2.620	0.417	2.398
2	9.492	1.511	0.662
3	12.42	1.977	0.506
4	48.75	7.759	0.129
5	57.40	9.136	0.109

Table 4.5 Sectional properties of each element of the simplified model of the whole structure of IHX

	node number i ~ j	length (cm)	cross sectional area (cm <sup>2</sup> )	bending moment of inertia (cm <sup>4</sup> )	Young's modulus (Kg/cm <sup>2</sup> )
inner vessel	40~41	70.			
	41~42	96.			
	42~43	169.			
	43~44	45.			
	44~45	75.			
	45~46	25.			
	46~47	80.			
	47~48	120.	1.445x10 <sup>3</sup>	9.556x10 <sup>6</sup>	1.84x10 <sup>6</sup>
	48~49	200.			
	49~50	200.			
	50~51	200.			
	51~52	200.			
	52~53	200.			
	53~54	50.			
	54~55	30.			
*	55~72	13.	1.0x10 <sup>3</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>
pressure vessel	56~57	70.			
	57~58	96.	4.788x10 <sup>3</sup>	3.861x10 <sup>7</sup>	1.84x10 <sup>6</sup>
	58~59	169.			
	59~60	45.			

\* : rigid beam

Note : Refer to table 4.1 about node number 1 to 39.

Table 4.5 Sectional properties of each element of the simplified model of the whole structure of IHX (continued)

	node number i ~ j	length (cm)	cross sectional area (cm <sup>2</sup> )	bending moment of inertia (cm <sup>4</sup> )	Young's modulus (Kg/cm <sup>2</sup> )
pressure vessel	60~61	75.	4.788x10 <sup>3</sup>	3.861x10 <sup>7</sup>	1.84x10 <sup>6</sup>
	61~62	25.			
	62~63	80.			
	63~64	120.			
	64~65	200.			
	65~66	200.			
	66~67	200.			
	67~68	200.			
	68~69	80.			
	69~70	107.			
	70~71	13.			
	71~72	80.			
	72~73	90.			
	73~74	27.			
	74~75	63.			
	75~76	130.			
support skirt *	66~80	73.	1.0x10 <sup>3</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>	1.84x10 <sup>6</sup>
	79~80	243.	4.788x10 <sup>3</sup>	3.861x10 <sup>7</sup>	

Table 4.6 Node weight and X,Y-distances of the simplified model of the whole structure of IHX

	Node number	X-distance (cm)	Y-distance (cm)	Node weight (Kg) $\times 10^3$	Node mass (Kg·sec <sup>2</sup> /cm)	Material
inner vessel	40	114.	0.0	2.210	2.254	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel, Kaowool, Hastelloy-XR
	41		70.0	1.510	1.545	
	42		166.	3.377	3.444	
	43		335.	1.185	1.208	
	44		380.	1.659	1.692	
	45		455.	0.0	0.0	
	46		480.	1.264	1.289	
	47		560.	3.160	3.222	
	48		680.	3.160	3.222	
	49		880.	3.160	3.222	
	50		1080.	3.160	3.222	
	51		1280.	3.160	3.222	
	52		1480.	0.790	0.806	
	53		1680.	0.474	0.483	
pressur vessel	54		1730.	—	—	
	55		1760.	7.700	7.852	
	56	127.	0.	3.604	3.675	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel
	57		70.	6.344	6.469	
	58		166.	3.391	3.458	
	59		335.	2.815	2.871	

Note: Refer to table 4.2 about node number 1 to 39.

Table 4.6 Node weight and X,Y-distances of the simplified model of the whole structure of IHX (continued)

	Node number	X-distance (cm)	Y-distance (cm)	Node weight (Kg) $\times 10^3$	Node mass (Kg·sec <sup>2</sup> /cm)	Material
pressure vessel	60	127.	380.	3.941	4.019	
	61		455.	—	—	
	62		480.	3.003	3.062	
	63		560.	7.508	7.656	
	64		680.	7.508	7.656	
	65		880.	7.508	7.656	
	66		1080.	7.508	7.656	
	67		1280.	3.003	3.062	
	68		1480.	4.505	4.593	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel
	69		1560.	0.220	0.224	
	70		1667.	3.003	3.062	
	71		1680.	3.378	3.445	
	72		1760.	3.378	3.445	
	73		1850.	0.220	0.224	
	74		1877.	7.950	8.017	
	75		1940.	1.700	1.734	
	76		2070.	13.34	13.603	
fixed points	77	200.	166.	—	—	
	78		335.	—	—	
	79		837.	—	—	
*	80	200.	1080.	—	—	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel

\* : support skirt

Table 4.7 Natural frequencies of the simplified model  
of the whole structure of IHX

Mode number	Circular frequency (rad/sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	2.619	0.417	2.399
2	9.487	1.510	0.662
3	12.42	1.976	0.506
4	48.75	7.759	0.129
5	57.34	9.126	0.110
6	119.2	18.97	0.053
7	146.9	23.37	0.043
8	151.9	24.18	0.041
9	157.3	25.03	0.040
10	168.0	26.69	0.037

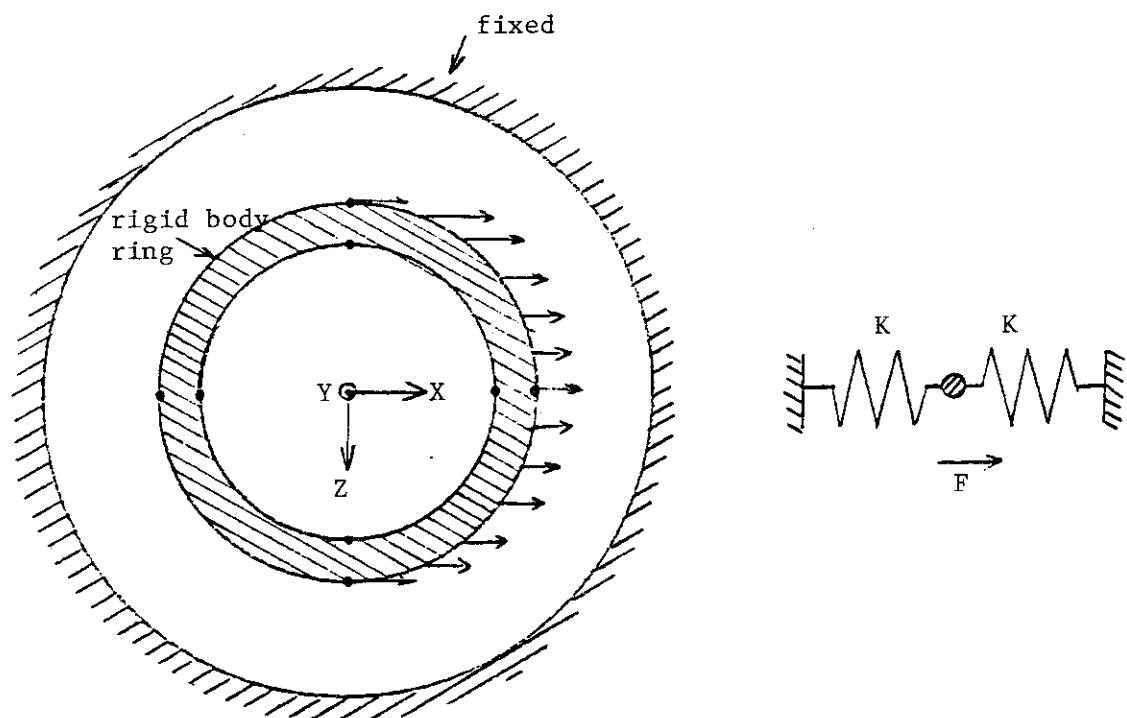


Fig. 4.1 Boundary condition of the upper tube sheet under static load

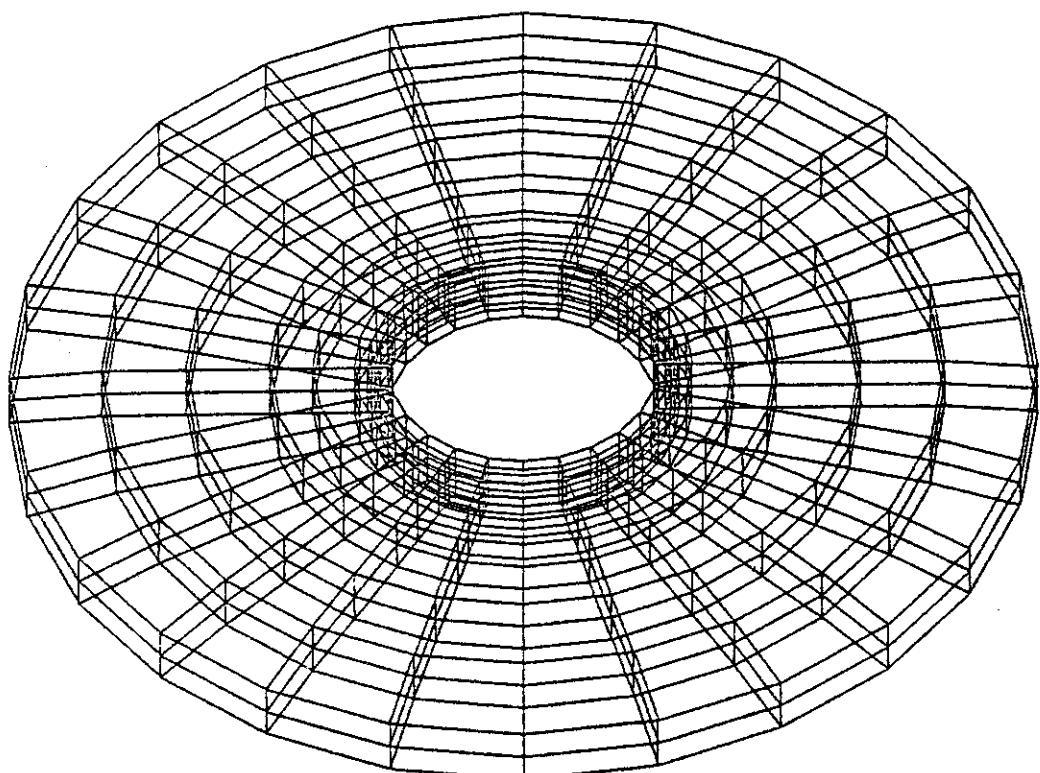


Fig. 4.2 Finite element mesh of the upper tube sheet

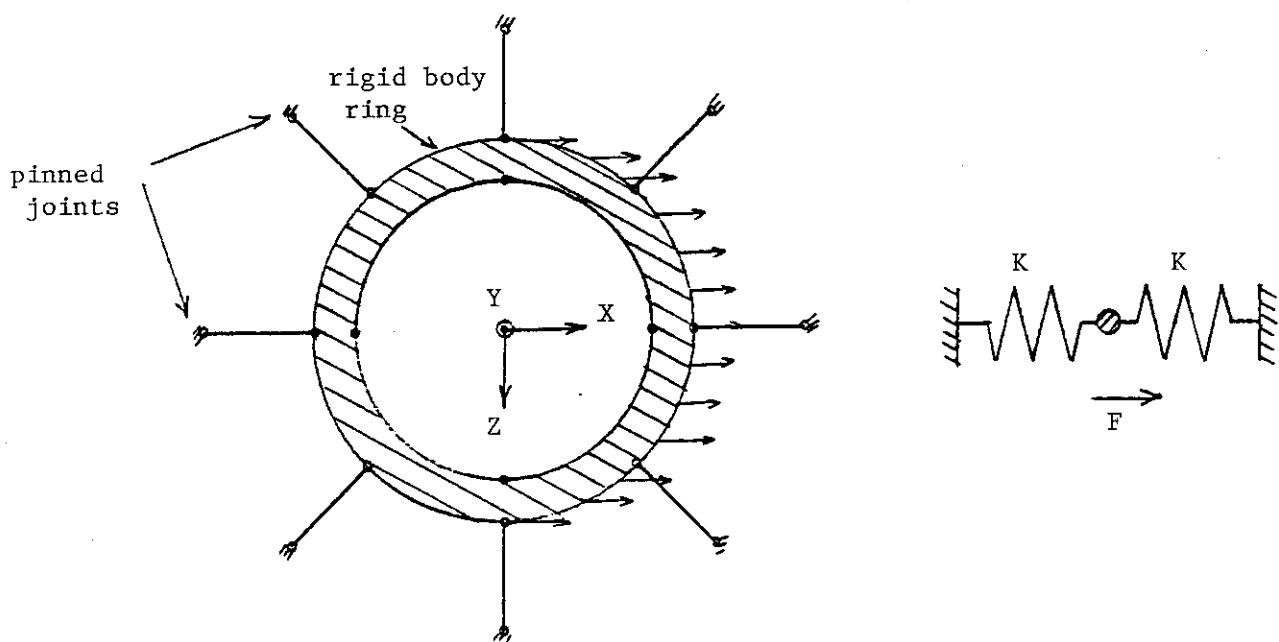


Fig. 4.3 Boundary condition of the support lug of the tube bundle under static load

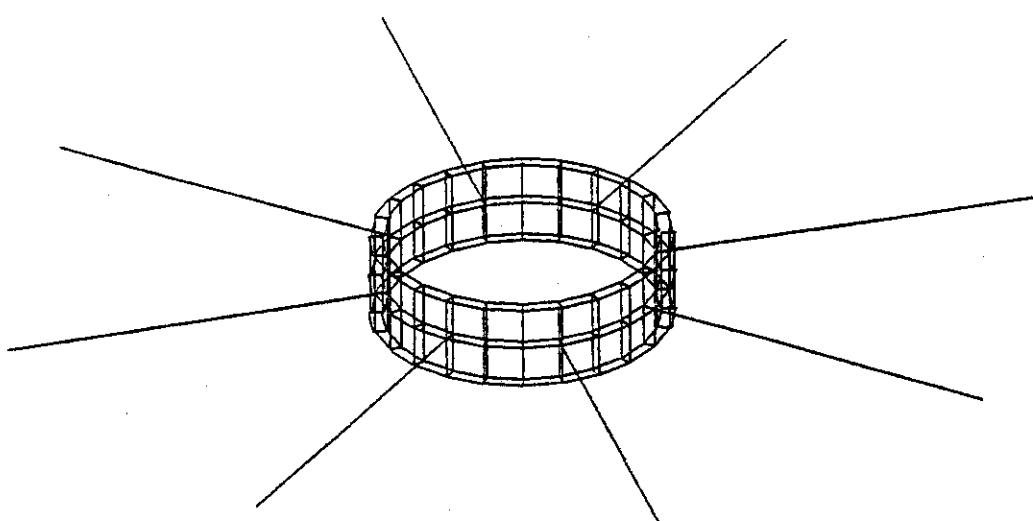


Fig. 4.4 Finite element mesh of the support lug of the tube bundle

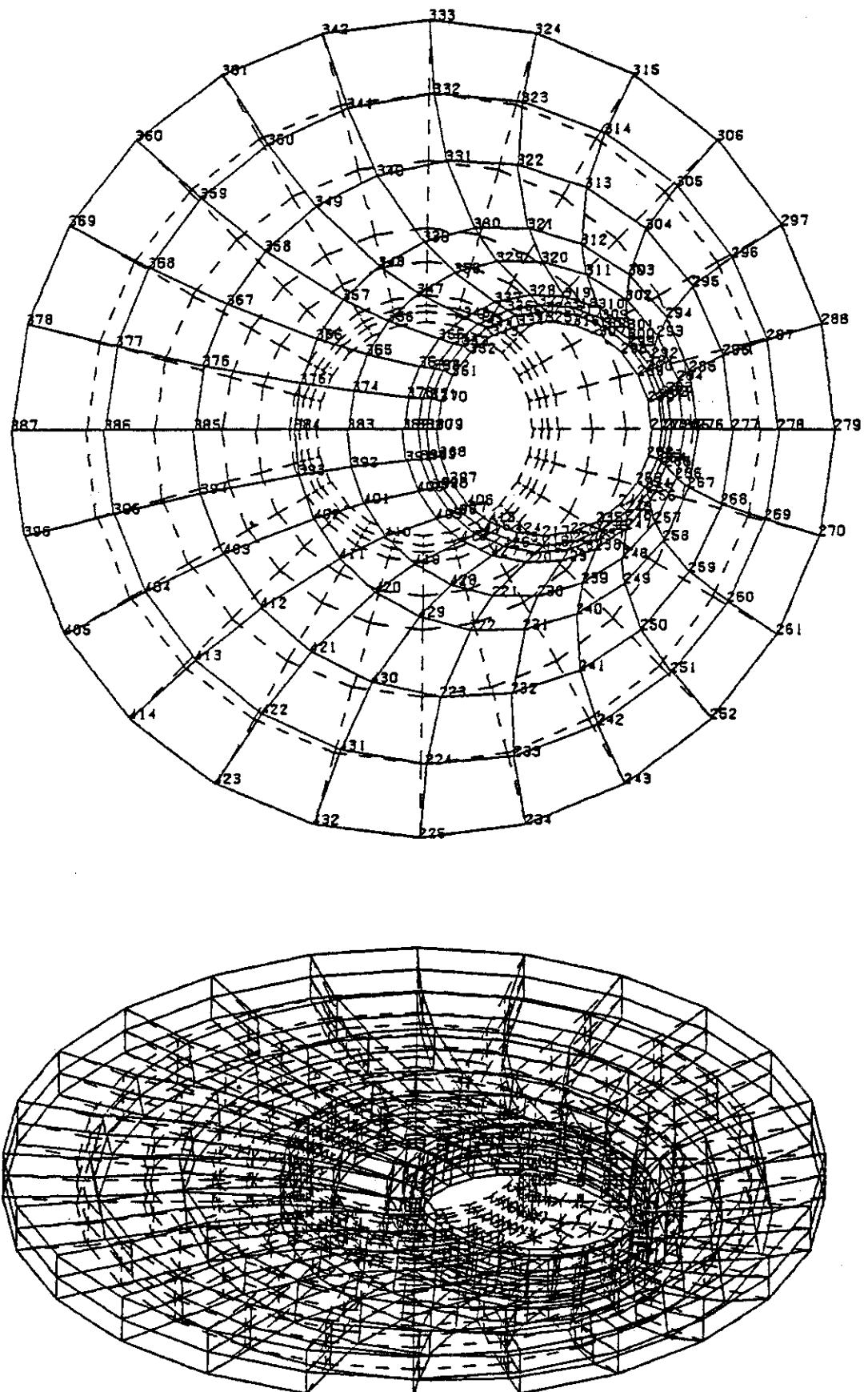


Fig. 4.5 Deformed shape of the upper tube sheet under static load

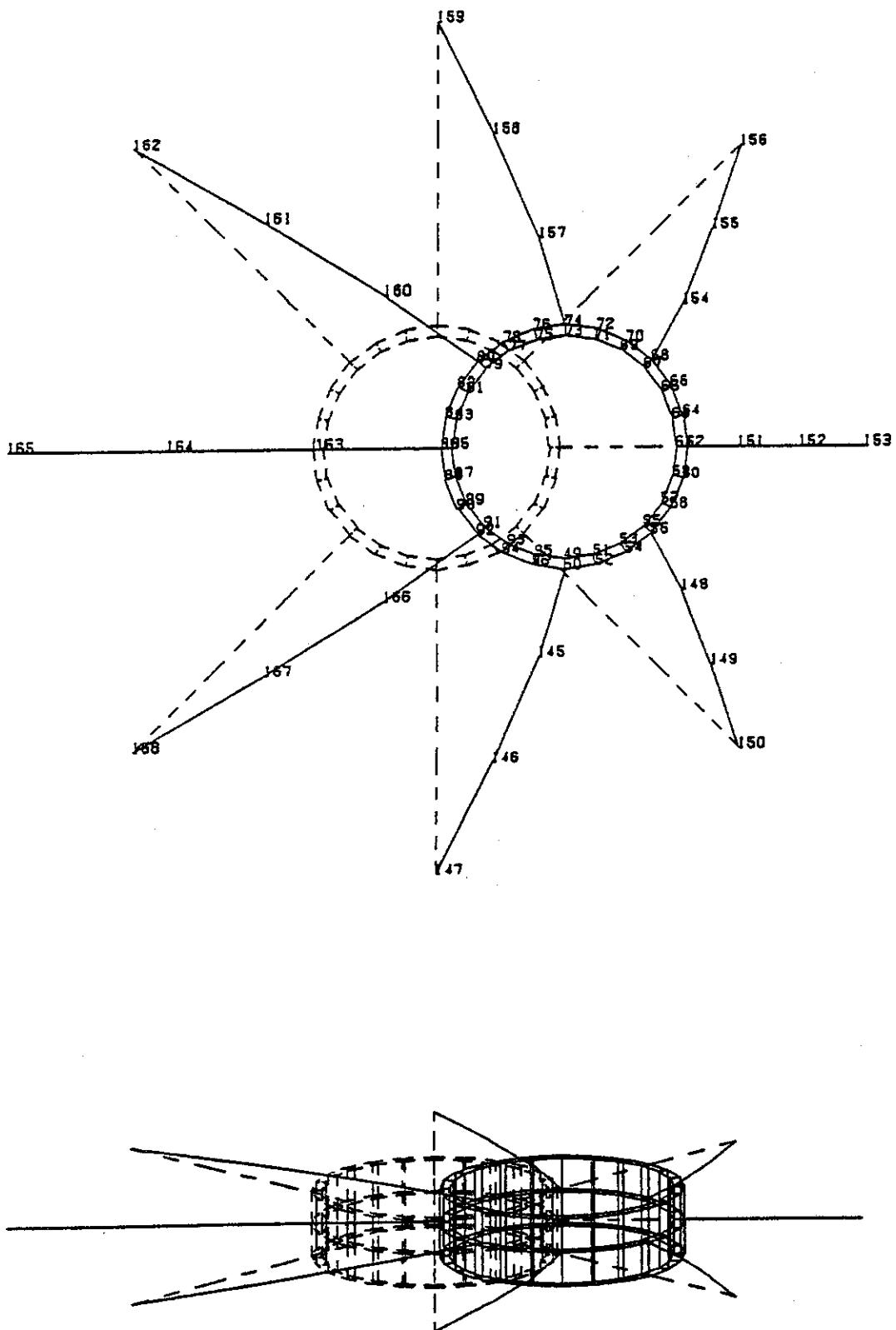


Fig. 4.6 Deformed shape of the support lug of the tube bundle under static load

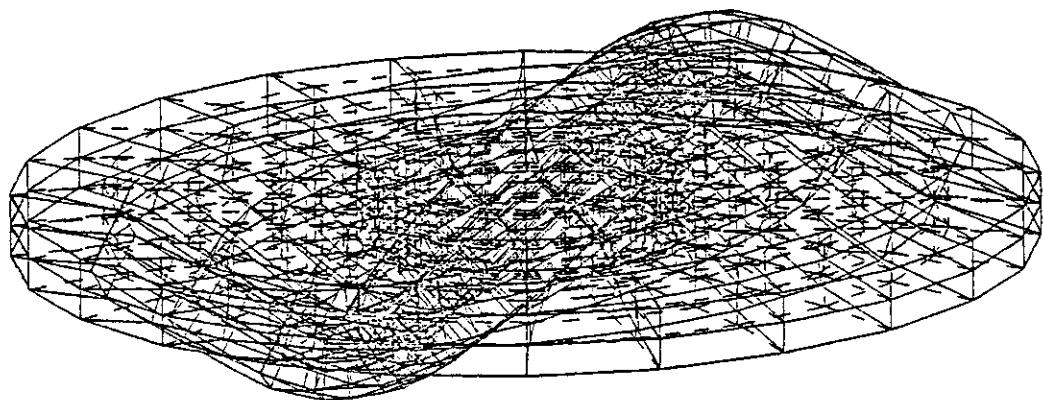


Fig. 4.7 Deformed shape of the upper tube sheet under static load (moment)

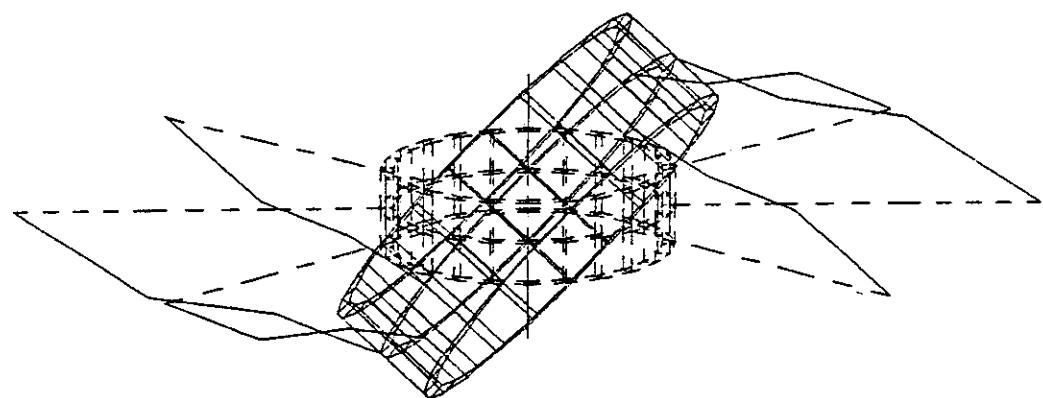


Fig. 4.8 Deformed shape of the support lug of the tube bundle under static load (moment)

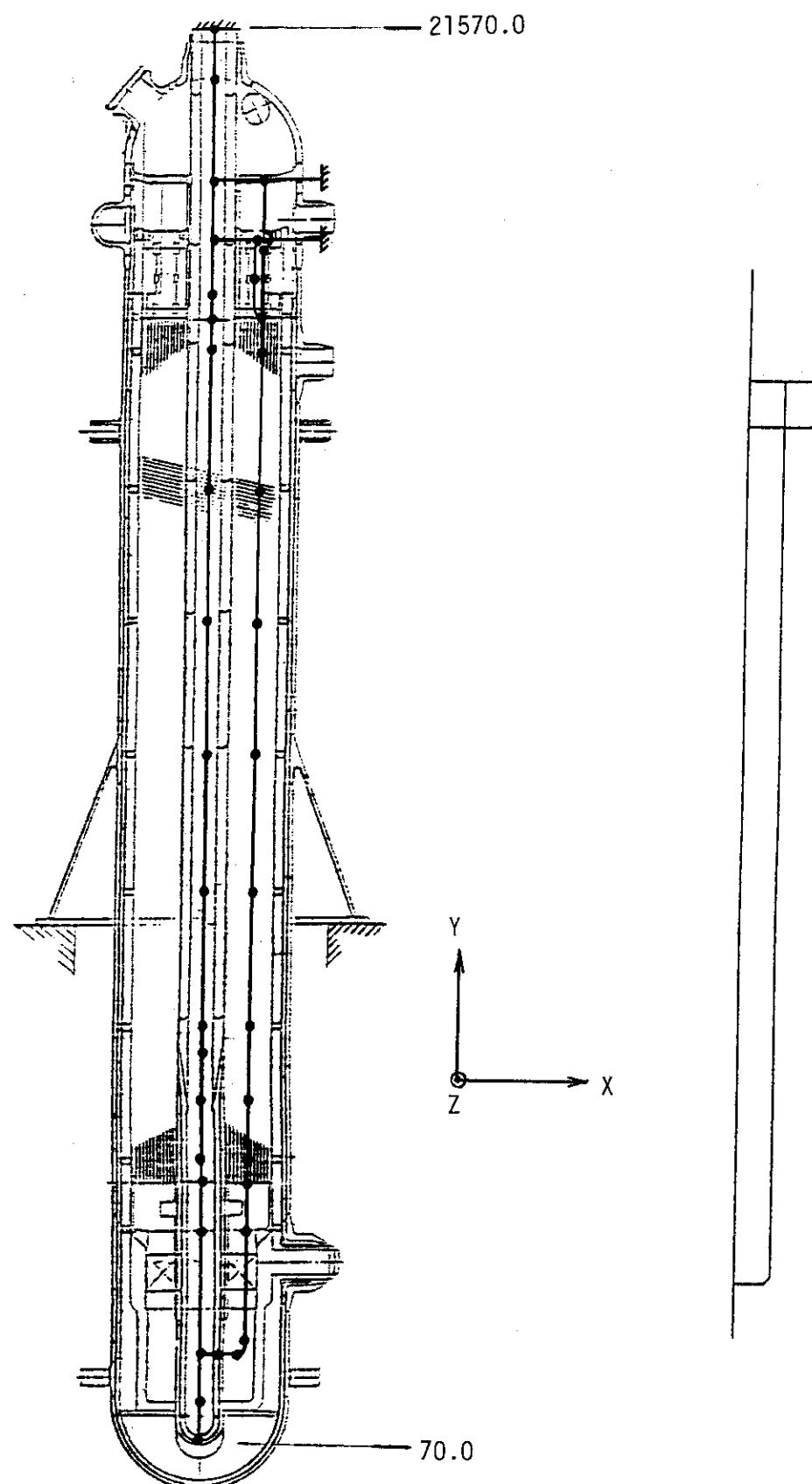


Fig. 4.9 The simplified model of the inner structure of IHX

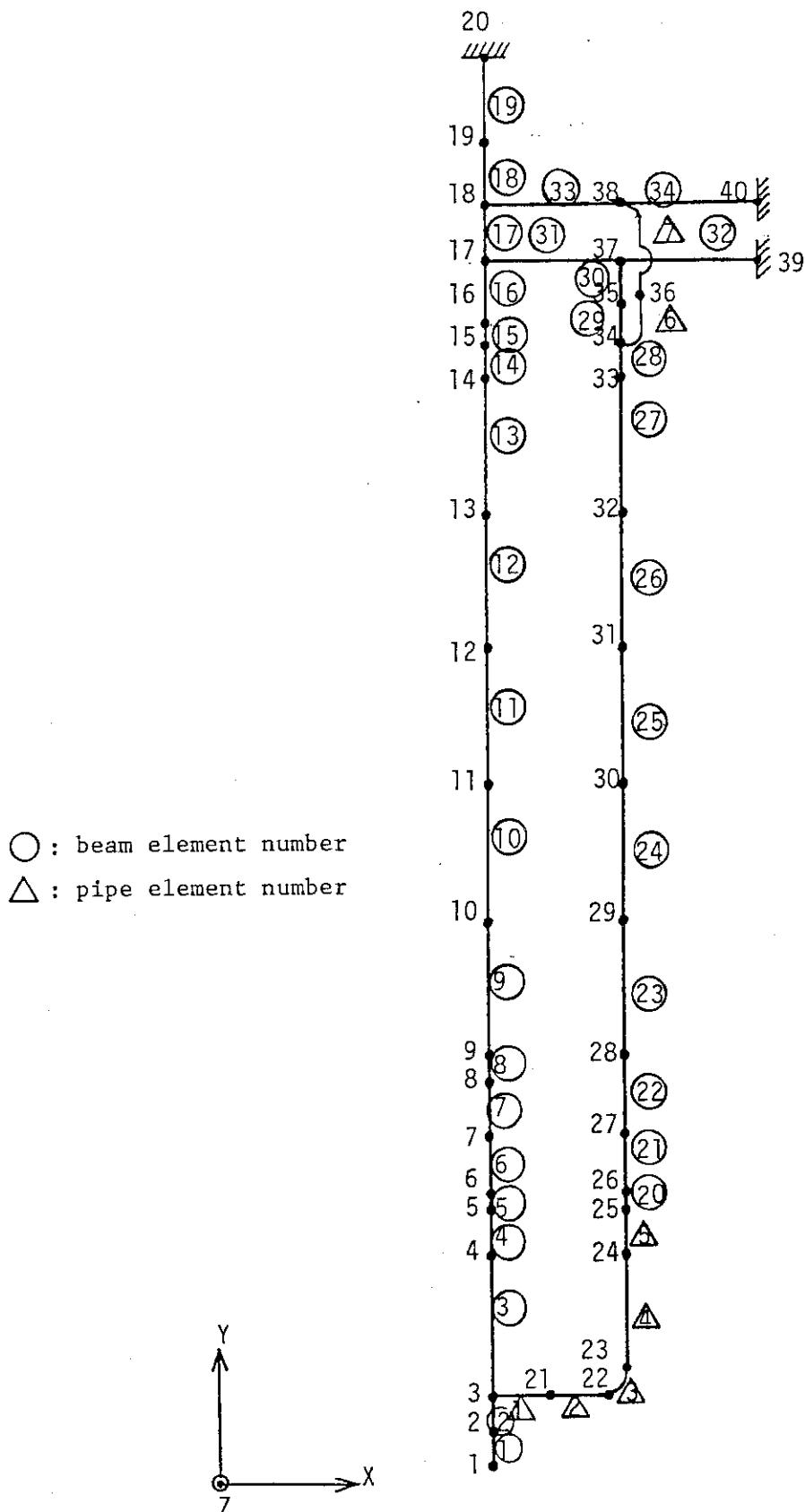


Fig. 4.10 Finite element mesh of the inner structure of IHX  
 (simplified model)

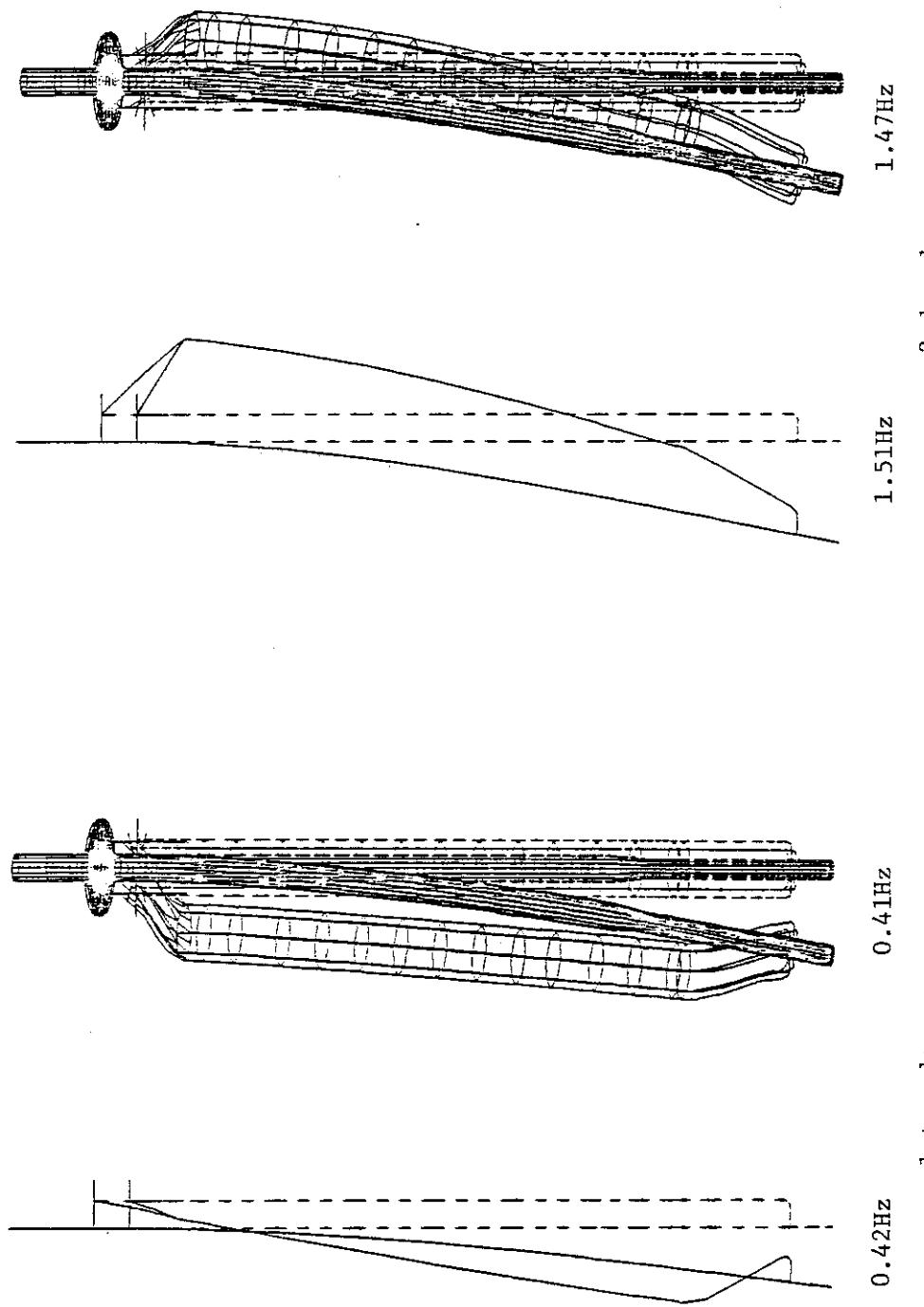


Fig. 4.11 Comparison of the mode shape of the detailed model with that of the simplified model

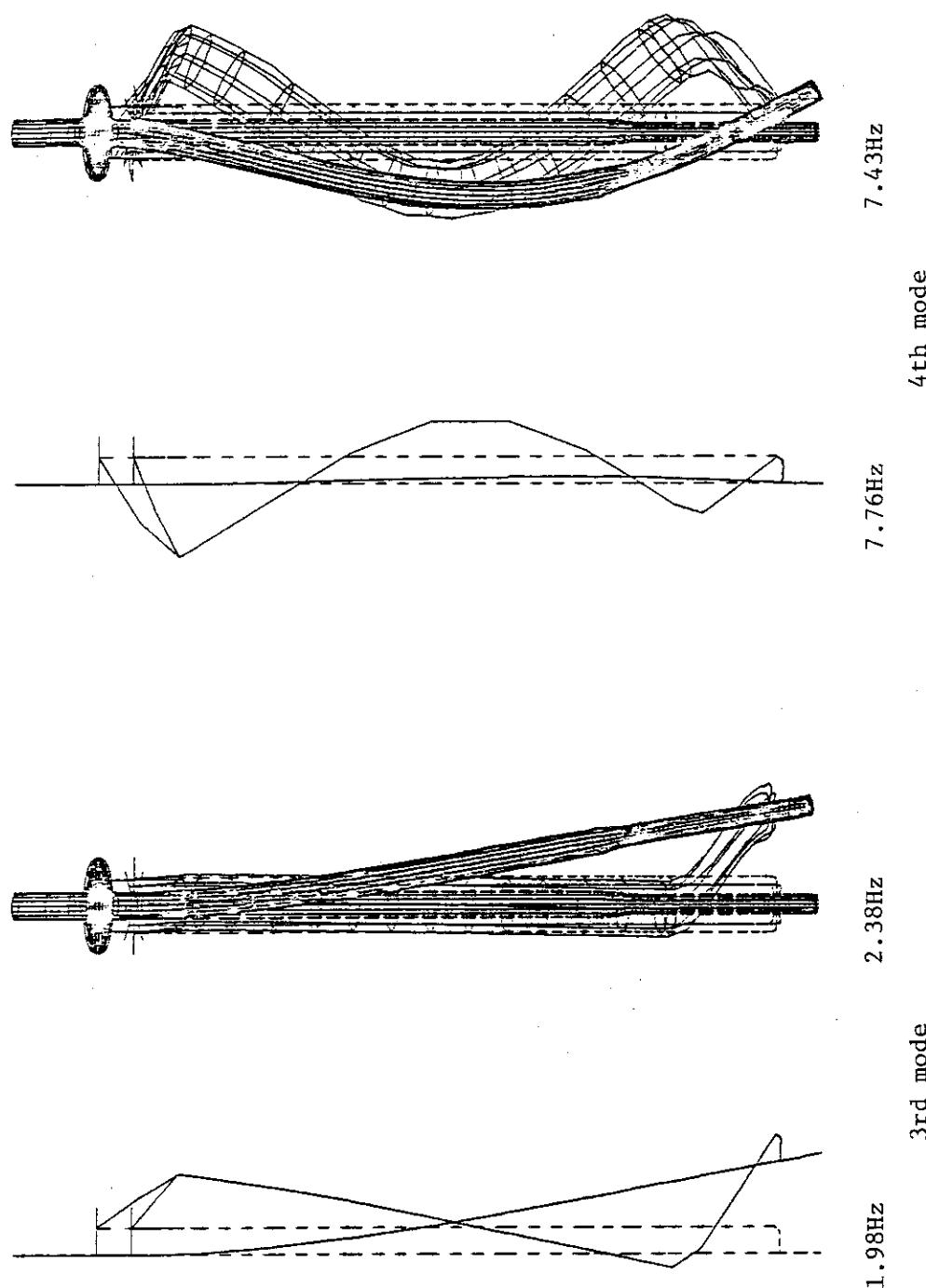


Fig. 4.11 Comparison of the mode shape of the detailed model with that of the simplified model (continued)

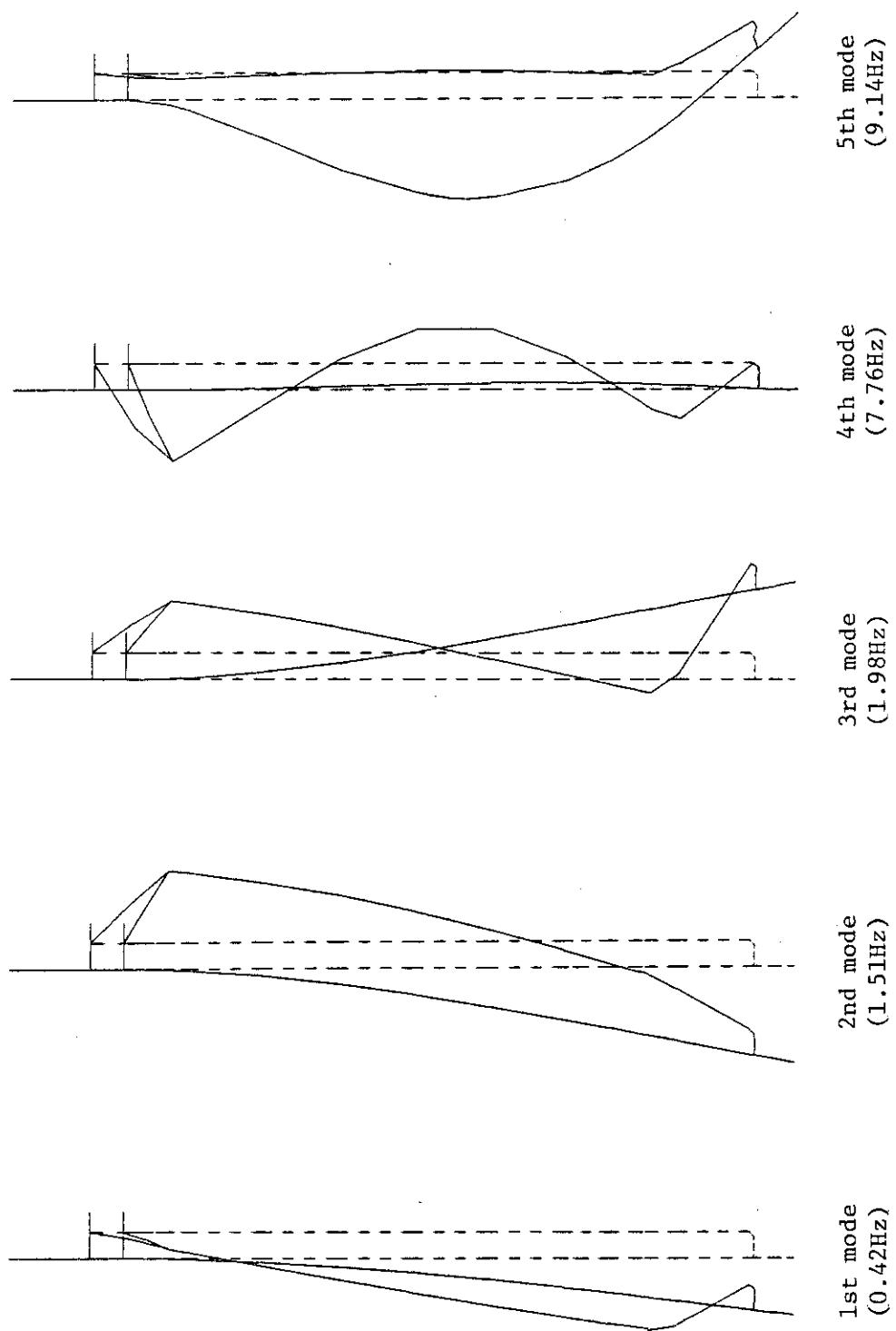


Fig. 4.12 Mode shapes of the simplified model of the inner structure of IHX

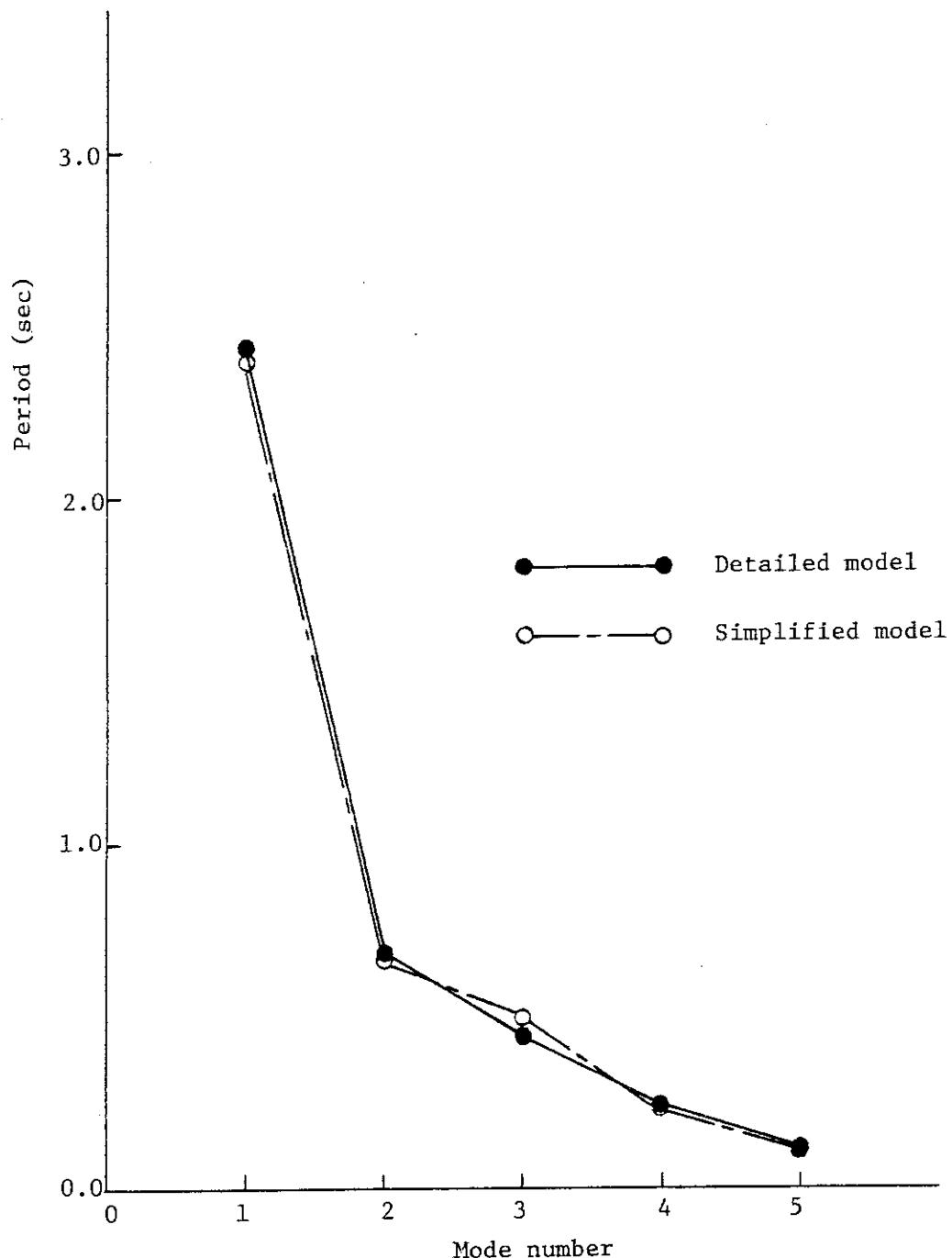


Fig. 4.13 Comparison of the detailed model with the simplified model

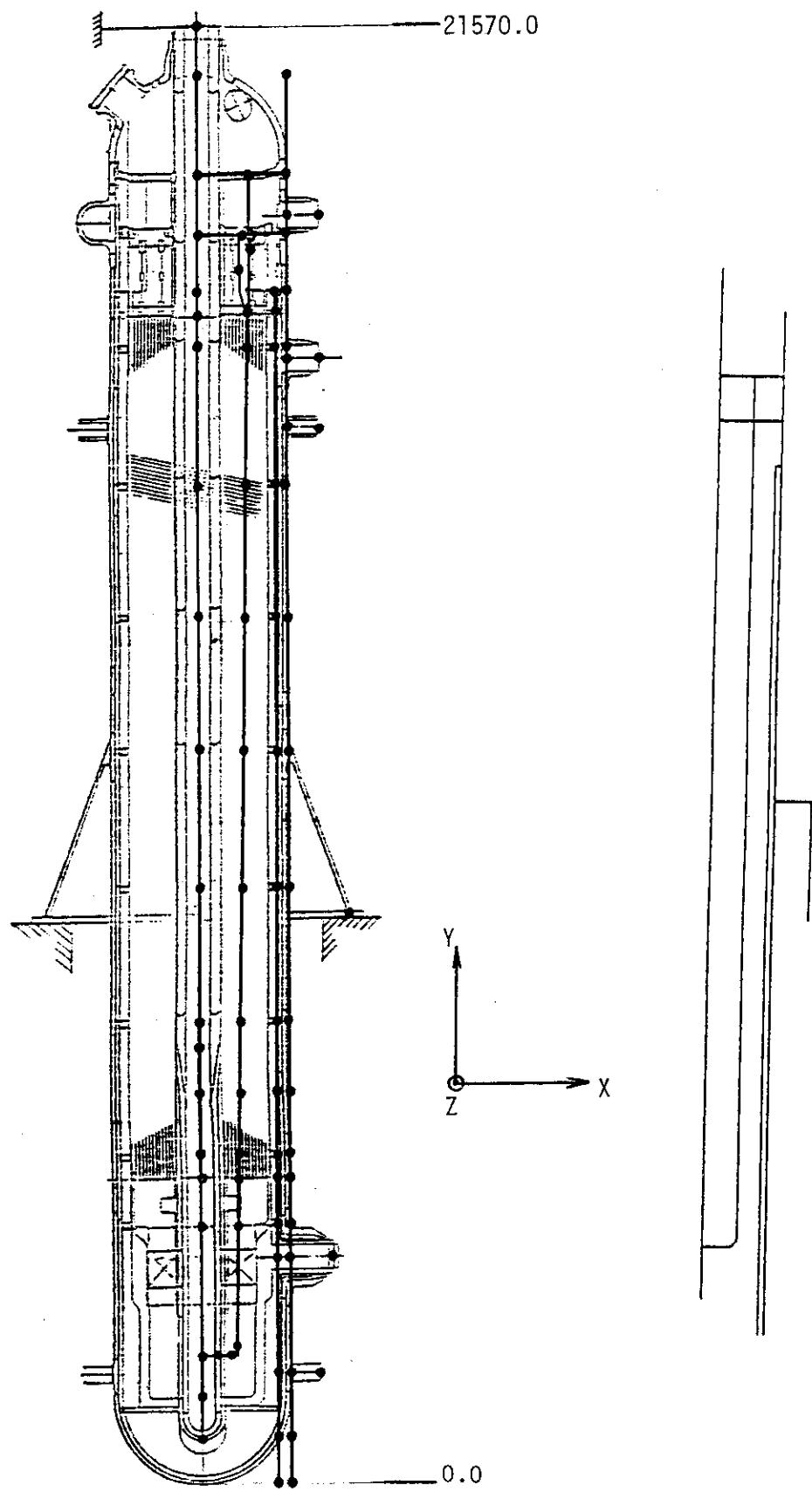


Fig. 4.14 The simplified model of the whole structure of IHX

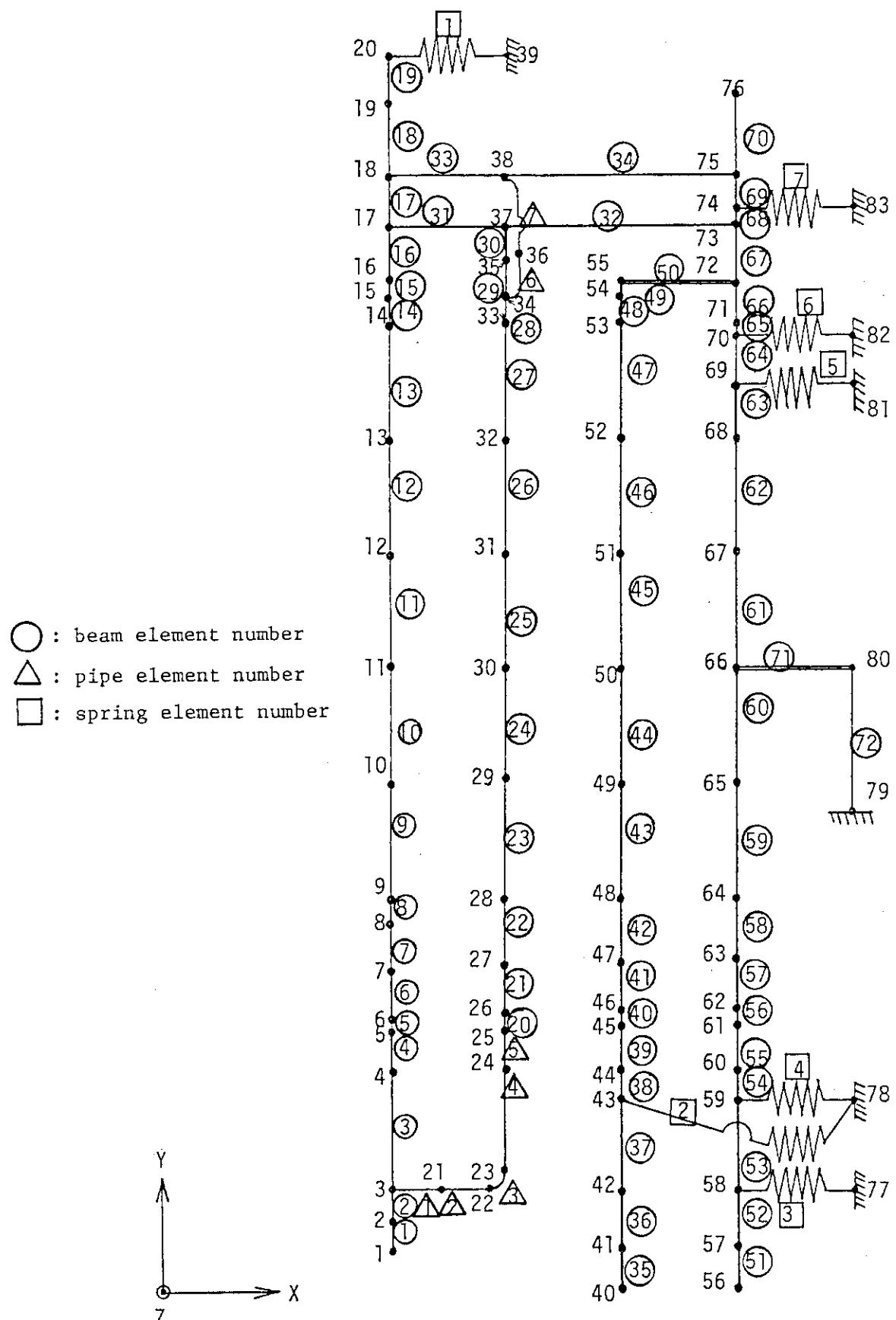
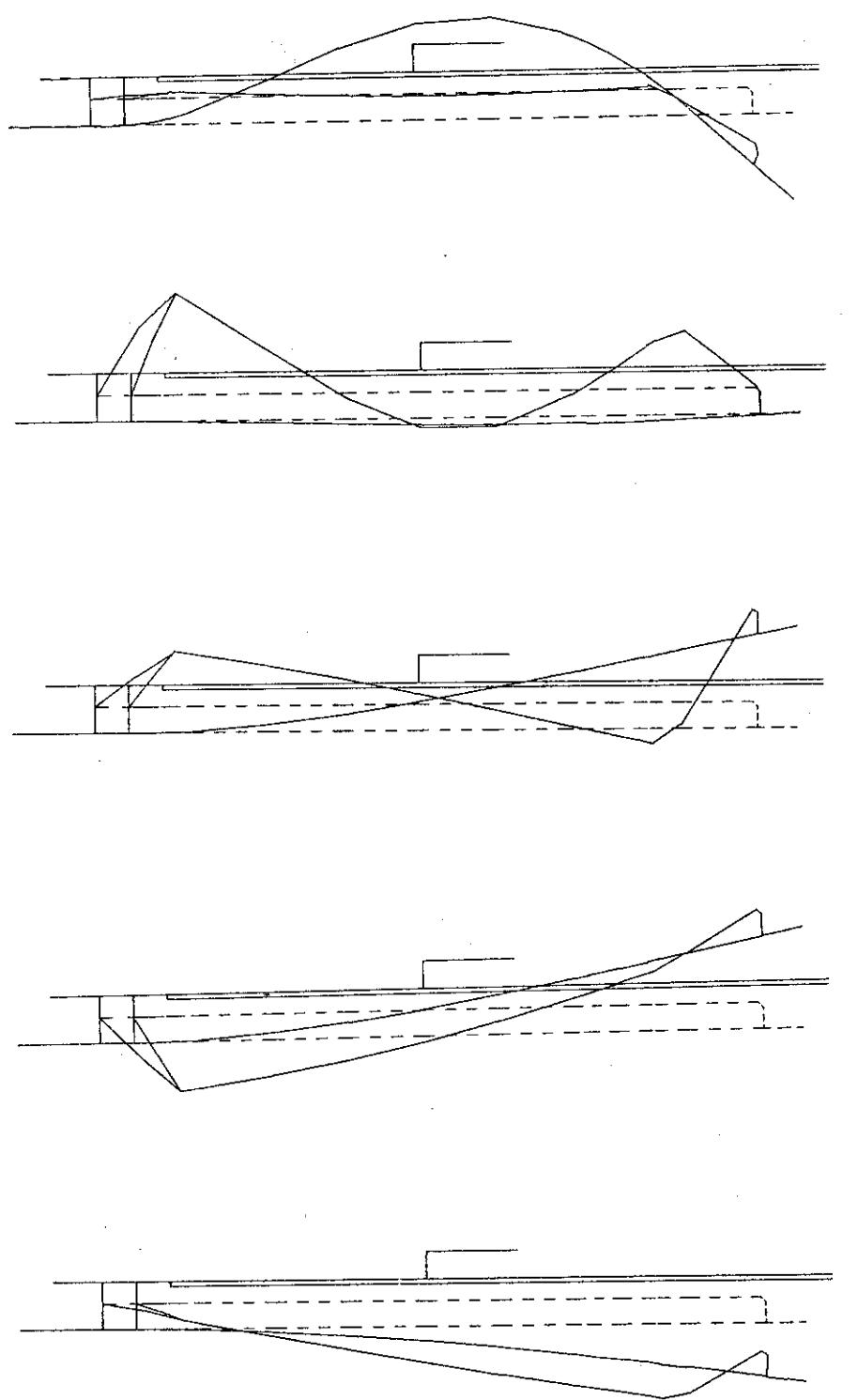


Fig. 4.15 Finite element mesh of the whole structure of IHX  
(simplified model)



1st mode (0.42Hz)	2nd mode (1.51Hz)	3rd mode (1.98Hz)	4th mode (7.76Hz)	5th mode (9.13Hz)
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Fig. 4.16 Mode shapes of the simplified model of the whole structure of IHX

## 5. ま と め

ヘリカルコイル形熱交換器である多目的高温ガス実験炉の中間熱交換器に対する耐震解析の第1段階として、以下に述べるようなモデル化の検討及び固有値解析を行った。

①中間熱交換器の内部構造について、各部の振動特性を把握するために、詳細部分モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、例えば下部連絡管部においては、1次固有周波数は約17 Hzであった。

②内部構造については、3次元詳細モデルと簡略モデルを作成し、詳細モデルの固有値解析結果を参考にして簡略モデルの剛性を修正した。この手法により、詳細モデルと振動特性の一一致する工学的に妥当な簡略モデルを作成した。

③内部構造物簡略モデルに基づいて中間熱交換器全体モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、1次モードにおいて、センターパイプと伝熱管群が同位相、固有周波数約0.4 Hzで振動することが明かになった。

今後は、全体モデルに対し、ギャップ等の系の非線形性を考慮したモデルを導入して、中間熱交換器設置床応答値を入力した時刻歴応答解析を行っていく予定である。

## 謝 辞

本報告書を作成するに当たり、有益な御意見、御指導を戴いた高温構造工学研究室長武藤康氏、多目的高温ガス実験炉設計室副主任研究員馬場治氏、同設計室のプラントグループの皆様に対して深く感謝致します。また、本解析を進めるに当って、貴重な御意見、資料を戴いた日立製作所の落合兼寛氏、並びに石川島播磨重工業株式会社の占部茂美氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) SAP-V; A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems, USC version July 4, (1976).
- 2) 日本原子力研究所: "多目的高温ガス炉研究開発の現状", 動力炉開発・安全性研究管理部編集, (1981).
- 3) 軽水炉改良標準化耐震設計小委員会: "耐震設計の標準化に関する調査報告書", (1981).
- 4) 高津英幸他3名: "JT-60の耐震解析(I)", JAERI-M 8155, 日本原子力研究所, (1979).

## 5. ま と め

ヘリカルコイル形熱交換器である多目的高温ガス実験炉の中間熱交換器に対する耐震解析の第1段階として、以下に述べるようなモデル化の検討及び固有値解析を行った。

①中間熱交換器の内部構造について、各部の振動特性を把握するために、詳細部分モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、例えば下部連絡管部においては、1次固有周波数は約17 Hzであった。

②内部構造については、3次元詳細モデルと簡略モデルを作成し、詳細モデルの固有値解析結果を参考にして簡略モデルの剛性を修正した。この手法により、詳細モデルと振動特性の一一致する工学的に妥当な簡略モデルを作成した。

③内部構造物簡略モデルに基づいて中間熱交換器全体モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、1次モードにおいて、センターパイプと伝熱管群が同位相、固有周波数約0.4 Hzで振動することが明かになった。

今後は、全体モデルに対し、ギャップ等の系の非線形性を考慮したモデルを導入して、中間熱交換器設置床応答値を入力した時刻歴応答解析を行っていく予定である。

## 謝 辞

本報告書を作成するに当たり、有益な御意見、御指導を戴いた高温構造工学研究室長武藤康氏、多目的高温ガス実験炉設計室副主任研究員馬場治氏、同設計室のプラントグループの皆様に対して深く感謝致します。また、本解析を進めるに当って、貴重な御意見、資料を戴いた日立製作所の落合兼寛氏、並びに石川島播磨重工業株式会社の占部茂美氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) SAP-V; A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems, USC version July 4, (1976).
- 2) 日本原子力研究所: "多目的高温ガス炉研究開発の現状", 動力炉開発・安全性研究管理部編集, (1981).
- 3) 軽水炉改良標準化耐震設計小委員会: "耐震設計の標準化に関する調査報告書", (1981).
- 4) 高津英幸他3名: "JT-60の耐震解析(I)", JAERI-M 8155, 日本原子力研究所, (1979).

## 5. ま と め

ヘリカルコイル形熱交換器である多目的高温ガス実験炉の中間熱交換器に対する耐震解析の第1段階として、以下に述べるようなモデル化の検討及び固有値解析を行った。

①中間熱交換器の内部構造について、各部の振動特性を把握するために、詳細部分モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、例えば下部連絡管部においては、1次固有周波数は約17 Hzであった。

②内部構造については、3次元詳細モデルと簡略モデルを作成し、詳細モデルの固有値解析結果を参考にして簡略モデルの剛性を修正した。この手法により、詳細モデルと振動特性の一致する工学的に妥当な簡略モデルを作成した。

③内部構造物簡略モデルに基づいて中間熱交換器全体モデルを作成し、固有値解析を行った。その結果、1次モードにおいて、センターパイプと伝熱管群が同位相、固有周波数約0.4 Hzで振動することが明かになった。

今後は、全体モデルに対し、ギャップ等の系の非線形性を考慮したモデルを導入して、中間熱交換器設置床応答値を入力した時刻歴応答解析を行っていく予定である。

## 謝 辞

本報告書を作成するに当たり、有益な御意見、御指導を戴いた高温構造工学研究室長武藤康氏、多目的高温ガス実験炉設計室副主任研究員馬場治氏、同設計室のプラントグループの皆様に対して深く感謝致します。また、本解析を進めるに当って、貴重な御意見、資料を戴いた日立製作所の落合兼寛氏、並びに石川島播磨重工業株式会社の占部茂美氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) SAP-V; A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems, USC version July 4, (1976).
- 2) 日本原子力研究所: "多目的高温ガス炉研究開発の現状", 動力炉開発・安全性研究管理部編集, (1981).
- 3) 軽水炉改良標準化耐震設計小委員会: "耐震設計の標準化に関する調査報告書", (1981).
- 4) 高津英幸他3名: "JT-60の耐震解析(I)", JAERI-M 8155, 日本原子力研究所, (1979).

- 5) 谷田部広志, 鈴木一彦: "ヘリカルコイル形熱交換器の支持プレートと伝熱管の熱膨張差に起因する伝熱管応力の解析", JAERI-M 82-139, (1982).
- 6) "多目的高温ガス実験炉詳細設計(I)報告書", (1981, 未公開資料).

## Appendix-1 管板部等の等価はりへの置換

単軸垂直応力下のはりについて次式が成立する。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P}{A} \cdot \frac{\ell}{\delta} \quad (1-1)$$

ここで  $E$  : ヤング率 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\sigma$  : 応力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\epsilon$  : ひずみ (-)

$P$  : 軸力 ( $\text{kg}$ )

$A$  : はりの断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$\ell$  : はりの長さ ( $\text{cm}$ )

$\delta$  : はりの変形量 ( $\text{cm}$ )

また、断面2次モーメント  $I$  は、以下の式によって求められる。

$$I = \frac{M \ell}{E i} \quad (1-2)$$

ここで  $I$  : 断面2次モーメント ( $\text{cm}^4$ )

$M$  : モーメント ( $\text{kg} \cdot \text{cm}$ )

$i$  : 回転角 ( $\text{rad}$ )

第4章で示した静的解析の結果から、上部低温管板及び、サポートラグに対して、等価はりの  $E$  及び  $I$  は、以下に示すようにして求められる。

①上部低温管板

$$P = 1.0 \times 10^5 (\text{kg}), A = 100 (\text{cm}^2), \ell = 122 (\text{cm}), \delta = 1.285 \times 10^{-3} (\text{cm})$$

$$(1-1) \text{ 式により, } E = 9.49 \times 10^7 (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

また、 $M = 6.40 \times 10^6 (\text{kg} \cdot \text{cm})$ ,  $i = 4.76 \times 10^{-4} (\text{rad})$  を、(1-2)式に代入して,  
 $I = 1.728 \times 10^4 (\text{cm}^4)$

②サポートラグ

$$P = 1.0 \times 10^5 (\text{kg}), A = 100 (\text{cm}^2), \ell = 122 (\text{cm}), \delta = 1.882 \times 10^{-2} (\text{cm})$$

$$\text{従って, } E = 6.48 \times 10^6 (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

$$\text{また, } M = 6.40 \times 10^6 (\text{kg} \cdot \text{cm}), i = 5.208 \times 10^{-3} (\text{rad}) \text{ より, } I = 2.314 \times 10^{-4} (\text{cm}^4)$$