JP0550080

JAERI-Tech
2004-073

ITERトカマクの耐震性評価に関わる振動試験計画

2005年1月

武田　信和・中平　昌隆

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

本レポートは、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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行　日本原子力研究所

JAERI－Tech 2004－073

ITER トカマクの耐震性評価に関わる振動試験計画

日本原子力研究所那珂研究所 ITER 開発室
武田　信和・中平　昌隆

(2004 年 10 月 21 日受理)

ITER トカマクは異なる運転温度の機器からなり、その温度差による熱変形を許容するために、支持脚に柔軟性を持たせている。このような構造上の特徴から、ITER トカマクは複雑な振動挙動を示すことが予想され、耐震設計においてはこの点について十分に考慮する必要がある。このような構造はこれまでに例がないため、耐震設計に用いる数値解析モデルを事前に実験により検証することが必要不可欠である。特に、支持構造については板バネとボルト等からなる複雑な構造体であり、その機械的特性の把握は重要である。

本報告は、ITER トカマクの耐震設計に必要となる一連の振動試験計画について、その全体計画を示すものである。トカマク全体の振動特性を把握するための試験は、可能であれば実規模の試験体を用いて行うことが望ましいが、試験設備の制約から縮小試験体を用い、スケール則を適用して試験結果を解釈する。また、スケール則が適用できない現象である減衰特性については、支持脚の実規模試験体を用いて試験を実施する。さらに、真空容器縮小試験や支持脚小型縮小試験といった、その他の補完的な試験も合わせて計画されている。

本報告で示した全体計画に含まれる試験の詳細は、以下の通りである。

(1) スケール則を適用する試験

・トカマク全体縮小試験：　変位に大きな影響を与える低次の水平振動モードの確認、解析モデル検証

・真空容器縮小試験：　真空容器自身の変形モードの確認、トカマク全体の振動特性への影響評価、解析モデル検証

・支持脚小規模試験：　支持脚の詳細な振動特性把握

(2) スケール則が適用できないため、実規模で行う試験

・支持脚実規模試験：　スケール不可能な減衰等の振動特性確認

さらに、重力支持脚が低次の水平振動モードに対する影響を数値解析により評価し、支持脚と本体の両者が柔構造の場合、それぞれが複合的に振動特性に影響を与えることを明らかにした。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

Plan of Vibration Tests for Estimation of Seismic Performance of ITER Tokamak

Nobukazu TAKEDA and Masataka NAKAHIRA

Department of ITER Project
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 21, 2004)

The ITER toamak is composed of major components such as superconducting magnet and vacuum vessel whose operation temperatures are changed from room temperature to 4 K and room temperature to 200℃, respectively. The gravity support structure of the tokamak is flexible in order to accept the thermal deformation caused by temperature change. It is expected that this structural feature causes the complex behaviors of the tokamak during seismic events. The seismic design of the tokamak has to therefore be considered to ensure the integrity. For this, the numerical analysis model for estimation has to be verified by the experiments because there is few report on the dynamic analysis of this kind of flexible structure in the past. In particular, the gravity support is a complicated structure composed of flexible plates and connection bolts. Therefore, the effect on the mechanical characteristics of the flexible support structure has to be investigated in detail during vibration.

The present report describes the global plan of the series of vibration tests to estimate the seismic performance of the ITER tokamak. Although it is ideal that the vibration tests are carried out using a full-scale model, scale models are planned due to the limitation of the test facilities. The test results can be estimated by a scaling law. When the scaling law cannot be applied to some performances such as damping, the test is performed using a full-scale model. In addition, the other complimentary tests using a scale model such as vacuum vessel and small-scale models of the support structure are also planned.

Details of the global plan on vibration tests are shown in this report as follows.

(1) Tests for which the scaling law is applicable:

* Scale model test of the whole tokamak: investigation of horizontal vibration mode affecting on displacement and validation of analysis model
* Scale model test of vacuum vessel: investigation of deformation modes of the vacuum vessel structure, the effect on vibration characteristics of whole tokamak and validation of analysis model
* Small-scale model test of support structure: investigation of detailed vibration characteristics of the support structure

(2) Tests for which the scaling law is not applicable:

* Full-scale test of support structure: investigation of some characteristics such as damping, whose scaling is not applied

Furthermore, an effect of the support structure on horizontal vibration mode is estimated with the numerical analysis. As a result, it is found that the support structure and the internal deformation of components combinedly affect on the vibration characteristics of the whole structure.

Keywords: ITER, Seismic Design, Scale Model, Full-scale Model, Vibration Test, Structural Integrity, Damping, Scaling Law, Modal Analysis, Vibration Table

This is a blank page.

目次

1. 序論 1
2. ITER トカマクの耐震性に関する振動試験全体計画 3
2.1 全体計画の概要方針 3
2.2 トカマク全体縮小試験体 4
2.3 支持脚実規模試験体 5
2.4 真空容器縮小試験体 6
2.5 支持脚小規模試験体 7
3. トカマク全体縮小試験体の現況 9
3.1 トカマク全体縮小試験体の数値計算 9
3.2 トカマク全体縮小試験体の製作状況 9
4. 支持脚が真空容器やコイル系の固有値および固有モードに与える影響 10
4.1 固有モード解析とその評価 10
4.2 単位加速度による水平荷重を印可した静解析 11
5. 結論 12
謝辞 13
参考文献 13
付録 1 支持脚が真空容器やコイル系の固有値および固有モードに与える影響 40
付録 2 ITER の設計変更に伴う計画の見直しについて 56

Contents

1. Introduction 1

2. Plan of Vibration Tests for Estimation of Seismic Performance of ITER Tokamak. 3

2.1 Outline of Plan 3

2.2 Scale Model of Whole Tokamak 4

2.3 Full-scale Model of Support Structure 5

2.4 Scale Model of Vacuum Vessel 6

2.5 Small-scale Model of Support Structure 7

3. Current Situation of Scale Model of Whole Tokamak 9

3.1 Numerical Analysis 9

3.2 Manufacturing 9

4. Effect of Support Structures on Eigen Frequencies and Modes of Vacuum Vessel and TF-CS Coil System 10

4.1 Eigen Mode Analysis and Estimation 10

4.2 Static Analysis with Horizontal Load by Unit Acceleration 11

5. Conclusion 12

Acknowledgements 13

References 13

Appendix 1 Effect of Support Structures on Eigen Frequencies and Modes of Vacuum Vessel and TF-CS Coil System 40

Appendix 2 Reviced Plan along Design Change of ITER 56

1. 序論

ITER は、核融合エネルギーの科学的・技術的実現性の実証を目的として国際協力により計画を進めている核融合実験炉である[1]。重水素と三重水素（トリチウム）が核融合反応の燃料として用いられるが、トリチウムは放射性物質であるため、その閉じこめは ITER における安全確保において重要な課題となる。図 1-1 に ITER の概念図を示す。ITER は、トカマク型核融合装置であり、主要機器としては 3 種類の超伝導コイル（ポロイダル磁場（PF）コイル、トロイダル磁場（TF）コイル、中央ソレノイド（CS）コイル）と真空容器が挙げられる[2]。真空容器は先に述べたトリチウムの閉じ込めを担う安全機器であり、その健全性の担保は安全設計上特に重要である。また、超伝導コイルは安全機器ではないが、核融合炉の運転上重要な機器であるので、やはり健全性の担保が要求される。これらの機器の設計において検討の対象とするべき主な荷重としては、電磁力と地震荷重が挙げられる。また、熱変形による応力も考慮に入れる必要がある。地震荷重については、標準設計として IAEA の SL-2（0.2ｇの地動加速度）に基づいて耐震設計が成されている。また、これ以上の強地震動については、建屋免震によりトカマク機器の健全性を確保することが設計に盛り込まれている。

表 1-1 に各機器の運転温度を示す。これらの機器は、運転温度が異なるため熱収縮を考慮した柔軟な支持系で支持されている。図 1-2 に TF、PF 及び CS コイルの組立構造を示す。TF コイルは、周方向に均等に配置され、コイル間支持構造により全 TF コイルと強固に連結しトーラス構造を形成する。PF 及び CS コイルは、いずれも TF コイルに接続・支持される。これらのコイルは、各 TF コイルの下部に配置される重力支持脚により支持される（図 1-3）。この重力支持脚は、複数の薄板から成る板バネ構造であり、垂直方向には高い剛性を確保しつつ、水平方向には室温から極低温に冷却する際の熱収縮に対する柔軟性を有している。また、これらの締結にはボルトが用いられており、全体として複雑な構造になっている。真空容器は、TF コイルの内側に配置されるドーナツ形状の構造体で、その内部に真空容器内機器が配置される。真空容器も TF コイルと同様に、柔軟な構造によって支持されている。

支持構造は、その柔軟性によって、構造体の振動特性に大きな影響を与える（付録１参照）。特に、機器そのものの剛性が比較的高い真空容器においてはその影響は顕著であり、低次の振動モードについていえば支持構造による影響は真空容器本体による影響と比較して大きい。一方、コイル系については、支

持構造による影響も当然無視できないものの、機器そのものが比較的柔軟な構造であることから、双方による影響を考慮する必要がある。

このように、ITER トカマクはその構造上の特徴から、複雑な振動挙動を示すことが予想され、耐震設計においてはこの点について十分に考慮する必要がある。このような構造はこれまでに例がないため、耐震設計に用いる数値解析モデルを事前に実験により検証することが必要不可欠である。特に、支持構造については板バネとボルト等からなる複雑な構造体であり、その機械的特性の把握は重要である。

振動挙動の実験的な検証の為に行われる振動試験は、可能であれば実規模の試験体を用いることが望ましいが、通常、試験設備等の制約から縮小試験体を用いることとなる。この場合、適切なスケール則を用いて実験結果を実規模における現象に変換する必要があるが、このようなスケール則が適用できない現象については、実規模試験体による試験を部分的に実施することになる。

本報告は、ITER トカマクの耐震設計に必要となる一連の振動試験計画について、その全体計画を示すものである。本計画においても、トカマク全体の振動特性は、試験設備の制約から縮小試験体を用いて行う。また、スケール則が適用できない現象である減衰特性については、支持脚の実規模試験体を用いて試験を実施する。さらに、真空容器縮小試験や支持脚小型縮小試験といった、その他の補完的な試験も合わせて計画されている。

また、振動試験計画の一例として、トカマク全体振動試験計画について、その現状について述べる。

この計画は、平成 12 年度より財団法人原子力安全協会に設置された ITER 耐震・免震設計基準案検討専門委員会（委員長：藤田隆史東京大学教授）により審議され、了承されたものである。

さらに、トカマク本体の振動特性に影響を与える構造要素として柔構造である重力支持脚に着目し、耐震性を評価する上で最も重要となる、低次の水平振動モードに対する影響を数値解析により評価する。

2. ITER トカマクの耐震性に関する振動試験全体計画

2.1 全体計画の概要方針

構造物の振動特性を把握する場合、実機の構造を完全に模擬した実規模の試験体を用いるのが当然ながら最も望ましい。しかしながら、大規模な構造物については、振動試験に用いる設備の制約（主に寸法、重量）により、実規模試験は不可能であることが多い。このような場合、実機の構造と相似な縮小試験体を製作して用いることになる。ITER においても、その全重量は数万トンにも及び、また、直径も 30m にわたることから、全体の実規模試験は不可能である。そこで、ITER トカマク全体の振動挙動の把握は、縮小試験体を用いて行うこととした。実機の振動特性は、縮小試験体の特性からスケール則にしたがって求めることができる。トカマク全体の試験においては、特に最低次の振動モードである全体水平振動に着目して試験を行う。これは、水平振動による真空容器-コイル間の相対変位を抑制することが耐震設計上重要な課題となっているためである。

一方、減衰特性のように縮小試験体によるスケールが不可能な特性も存在する。このようなものについては、重要な部分を取り出して実規模で試験を行う必要がある。本計画においては、支持脚の挙動が特に重要であり、また、減衰が主にその部分で生じると考えられることから、支持脚については実規模モデルを用いて試験を行うこととした。

また、真空容器については、本体はその支持脚と比較して剛であるため（付録 1 参照)、トカマク全体の振動試験においては本体は剛体として扱い、細部の構造は模擬しない。しかしながら、実際に十分に剛であるかどうかについては別途確認する必要があるため、真空容器については別途部分モデルでその本体の構造を模擬し、本体の変形モードも含めて振動挙動を把握する。

これまでに述べた 3 種類の試験は比較的大規模なものとなり、機動的に試験を行うことは難しい。しかしながら、振動特性を把握する上で最も重要である支持構造の基礎的な特性を把握するためには、パラメータサーベイを行いつつ反復的に試験を行う必要がある。また、これらの試験体の製作後に ITER の設計に変更が生じることはままありうるが、その設計変更を試験体に反映することはかなり難しい。これらの理由から、比較的小規模な試験体によって支持脚の基礎的な特性を把握し、また、支持脚に設計変更が生じた場合には変更による影響を評価することは非常に有効である。

以上から、ITER トカマクの振動特性を把握するため、以下の試験体を用いて試験を行うこととした

- トカマク全体縮小試験体
- 支持脚実規模試験体
- 真空容器縮小試験体
- 支持脚小規模試験体

全体計画の中における各試験体間の関係を図 2-1 に示す。以下、各試験について詳述する。

2.2 トカマク全体縮小試験体

トカマク全体縮小試験体は、主に真空容器とコイル系とからなるトカマク本体全体の振動特性を把握するものである。この試験体では、真空容器は剛体として扱われ、重量のみが模擬される。

搭載重量 100 トンの振動台を用いるが、加振等の裕度を考慮して、試験体の全重量を 80 トン程度に押さえることとした。また、スケール則の取り方としては、実機と同じ材料を用いると検討が容易であること（ヤング率が等しい）、また、応力を 1 対 1 とすると安全確証の面から望ましいこと（実機と同程度の応力で破壊が生じる）から、表 2-1 に示すようなスケール則を選択した。これらを勘案すると、縮尺は 1/8 とすることとなった。

試験は、支持脚のみの部分試験、コイル系のみの試験、真空容器も含んだ全体試験の 3 種類を行う。コイル系試験の概念図を図 2-2 に示す。

(1) 主な目的

- 低次振動モードの確認（水平変位の把握）
- 数値計算モデルの検証

(2) 特徴

- 支持脚要素試験、コイル系試験、全体系試験の 3 種類の試験を実施
- 大型振動台を使用 (搭載重量 100 ton、加振周波数～50Hz、加振力 2G)
- 支持構造とコイル系が対象

(3) 試験内容

- 板ばねを用いた支持脚を持つ構造の一般的な振動特性把握

低次振動モード、固有値、地震応答を把握し、数値計算と比較して、数値計算モデルを修正する。

・支持脚の裕度確認

現設計実機と試験体との間で、支持脚板ばねに生じる最大応力の比が 1:1 となる(あるいはそれ以上となる)スケール則を用いて、支持脚の裕度確認を行う。

水平静荷重を想定した場合、支持脚には上端隅に最大応力が生じ、その値は解析的には以下のようになる。

$\sigma=(2M\alpha/mn)(3h/awt)$

ただし、

M: 全体質量

α: 静荷重加速度

m: 支持脚あたり板ばね枚数

n: 支持脚数

h: 板ばね高さ

a: 板ばね上端幅

w: 板ばね平均幅

t: 板ばね厚さ

また、支持脚 1 体の強軸方向の剛性を k とすると、系の周期 T は、

$T=(nk/2M)^{1/2}$

したがって、最大応力が 1/1 とするためには表 2-1 のようなスケール則が必要となり、地震波の加速度を 8 倍、時間を 1/8 倍すればよい。

2.3 支持脚実規模試験体

支持脚実規模試験体では、スケールが不可能な減衰等の特性を確認する。図 2-3 にその概念を示す。

(1) 主な目的

・ スケール不可能な振動特性(減衰等)の確認

・ 実機支持脚の成立性実証

(2) 特徴

・ 現設計実機の支持脚構造を忠実に模擬した実規模試験体

(3) 試験内容

減衰率のように、寸法に対して非線型な依存性を持つ振動特性については、縮小試験体による試験では把握できない。また、実機同様の支持脚を用いて試験を行うことで、実機の成立性を実証することができる。

本試験の目的は以下のとおり。

・実規模試験体による非線型振動特性の把握

実規模の重力コイル系支持脚(1 脚)を振動させ、非線型なものを含む振動特性を把握する。

・成立性実証試験

トカマク全体縮小試験体による振動試験で明らかになった、結果等を用いて評価した地震時の支持脚への入力荷重を用いて荷重試験を行い、重力コイル系支持脚の成立性を実証する。

2.4 真空容器縮小試験体

真空容器縮小試験体では、真空容器自身の変形モードを確認し、全体の振動特性に与える影響を確認することが主な目的となる。試験体の製作にあたって、溶接変形を抑えられる最小の板厚は 6mm であり、これで真空容器の二重壁（片側 60mm、合計 120mm）を模擬することを考えると、その縮尺は 1/20 となる。図 2-4 にその概念を示す。

(1) 主な目的

- 真空容器自身の変形モード確認
- 真空容器本体構造がトカマク全体系の振動特性に与える影響確認
- 解析モデルの検証

(2) 特徴

- 真空容器部分のみを取り出した試験体
- 現設計実機の 1/20
- リブ付二重壁構造をリブ付一重壁で模擬(断面二次モーメント考慮)

(3) 試験内容

- 振動モード確認試験

試験体を加振し、その振動モードを確認する。また、固有振動数を把握し、全体系の振動特性に影響を与えないことを確認する。

2.5 支持脚小規模試験体

比較的小規模な振動台を用いて機動的に試験を行い、支持脚の基礎的な特性の把握を行うための試験体である。図 2-5 にその概念を示す。

(1) 主な目的

- 支持脚の基礎的な振動特性の把握
- 設計変更があった場合、その影響の把握

(2) 特徴

- 支持脚のみを対象とした小型試験体
- 小型振動台を使用 (搭載重量 500 kg、加振周波数 200 Hz)
- 設計変更等に容易に対応
- 板ばね形状と締結構造を模擬、板ばね枚数と支持脚数については削減(振動台の制約上)
- ボルト締結と溶接構造の相違を検討するため、以下の 2 種類の試験体を使用

(a) ボルト締結試験体

締結方式: 板ばね-フランジ間、フランジ-基礎間共にボルト締結
板ばね形状: トカマク全体縮小試験体と同様
板ばね縮尺: トカマク全体縮小試験体の 1/6.3
板ばね枚数: 5 枚
支持脚数: 4 および 8 脚

(b) 溶接構造試験体

締結方式: 板ばね-フランジ間は溶接、フランジ-基礎間はボルト締結
板ばね形状: トカマク全体縮小試験体と同様
板ばね縮尺: トカマク全体縮小試験体の 1/6.3
板ばね枚数: 5 枚
支持脚数: 4 および 8 脚

(3) 試験内容

・板ばね形状、締結方式による振動特性（固有値及び減衰）の変化

ボルト締結試験体と溶接構造試験体の特性の比較により確認する。

・支持脚本数の相違による振動特性の差異の確認

支持脚数が 4 本の場合と 8 本の場合において、振動特性に生じる変化が解析で予測可能であることを確認する。

3. トカマク全体縮小試験体の現況

試験計画の現況の一例として、トカマク全体縮小試験体について、数値解析と試験体製作の状況を示す。

3.1 トカマク全体縮小試験体の数値計算

トカマク全体縮小試験体を用いたコイル系振動試験に備えて、数値計算を行った。解析モデルは図 3-1 に示すように、TF コイル、板バネ支持脚、ベースプレートを構成要素とした。

TF コイル－支持脚間、支持脚—ベースプレート間、ベースプレート－フロア間ははり要素モデル化によるボルト締結とし、ソリッド要素、シェル要素とはり要素間の結合は剛体要素複数個を用いた。また、ベースプレート－テストフロア間ボルトのテストフロア側節点は全自由度拘束した。さらに、ベースプレート外周節点は Z 方向の変位拘束とした。

固有モード解析の結果を図 3-2～11 に示す。また、固有周波数とモードを表 3-1 にまとめた。試験における検討の対象としている一次モード（水平モード）は振動台の最大周波数（50Hz）以下におさまっており、試験に支障のないことが明らかになった。

3.2 トカマク全体縮小試験体の製作状況

トカマク全体縮小試験体については、コイル系について製作が終了しており、真空容器部分についても一部製作が進んでいる。図 3-12～15 に組み立て過程を示す。図 3-12 では、コイル系の重力支持脚が円周上に配置されている。図 3-13 では、TF コイル間を下部で連結する下部コイル間構造物が重力支持脚の上に配置されている。図 3-14 では、中央に円筒上の CS コイル模擬体が設置されている。図 3-15 では、20 個の D 形をした TF コイルが設置されている。また、図 3-16 にトカマク全体縮小試験体のコイル系部分全体図を示す。コイル系の試験については、近々行う予定である。

4. 支持脚が真空容器やコイル系の固有値および固有モードに与える影響

4.1 固有モード解析とその評価

トカマク本体の振動特性に影響を与える構造要素として柔構造である重力支持脚について、耐震性を評価する上で最も重要となる、低次の水平振動モードに対する影響を数値解析により評価を行った。解析は、真空容器とコイル系について、支持脚の剛性を設計通りとしたものと完全剛体として扱ったものの2種類について行った。解析結果の詳細については付録1を参照のこと。

真空容器の場合、支持脚を完全に剛として扱った場合の固有振動数は6.41Hzであり、支持脚を弾性体として扱った場合の 3.94Hz と比較して約 1.5 倍であることから、支持脚の柔軟性が全体の振動特性に大きな影響を与えることがわかった。この影響を定量的に評価するため、支持脚の影響を表す等価剛性 $k_{support}$ を以下のとおり導入し、検討を行った。まず、先に求めた固有振動数のうち、前者の値から真空容器の内部変形による等価剛性 k_{VV} を、後者の値から内部変形と支持脚の変形を総合した全体的な等価剛性 k_{total} を以下の式によりそれぞれ求めた。

$$k_{whole} = m_{effective}\,(2\pi f_{normal})^2$$

$$k_{VV} = m_{effective}\,(2\pi f_{rigid})^2$$

そして、これらの値から $k_{support}$ を

$$1/k_{support} = 1/k_{whole} - 1/k_{VV}$$

と定義した。この指標を用いて、真空容器の場合について分析を行い、全体柔性（剛性の逆数: $1/k_{total}$）に対する支持脚と内部変形の影響による柔性 $1/k_{support}$、$1/k_{VV}$ の占める割合はそれぞれ 62%、38%であり、機器の内部変形は比較的小さく、支持脚が全体柔性に与える影響が支配的であることが明らかとなった。

一方、超伝導コイルの場合、支持脚を完全に剛として扱った場合の固有振動数は6.74Hzであり、支持脚を弾性体として扱った場合の5.40Hzと比較すると、真空容器の場合のような顕著な相違がないことが判明した。これは、超伝導コイルが支持脚と比較して柔軟であることを示すものであり、全体柔性に対する支持脚と本体の影響はそれぞれ36%、64%である。

これにより、支持脚のみならず機器の内部変形も全体の振動特性に大きな影響を与え、特に超伝導コイルにおいては内部変形による影響の方が大きいことを明らかにした。また、内部変形と支持脚のどちらの影響も 30%以上であることから、両者が複合的に振動特性に影響を与えることを明らかにした。

4.2 単位加速度による水平荷重を印可した静解析

前述した検討結果を検証することを目的として、上記と同様のモデルを用いて単位加速度による水平荷重に対する変形を解析し、支持脚の剛性が最大変位に与える影響をそれぞれ比較した。真空容器の場合、内部変形のみによる最大変位は支持脚も考慮した場合の最大変位の 37%であり、変位は柔性に比例することから、上記検討における、内部変形の影響による柔性の割合である 38%という値と整合することが確認できた（図 4-1）。また、コイル系についても同様の解析を行った結果、内部変形の割合は 64%であり、上記検討における柔性の割合と完全に一致した。両解析における変位量について、支持脚下端から出発し、ポロイダル断面を時計周りに沿って描いたものを図 4-2、4-3 に示す。

この時の各支持脚上端が受ける水平変位を Fig. 4-4、4-5 にそれぞれ示す。支持脚上端における変位は一様でなくばらついており、この点からも内部変形と支持脚の影響が相互に作用していることが読み取れる。

以上から、内部変形と支持脚が複合的に振動特性に影響を与えることについて、静荷重による変形解析からも検証できた。

5. 結論

本報告では、ITER トカマクの耐震設計に必要となる一連の振動試験計画について、その全体計画を示した。全体計画には、以下の試験が含まれる。

・トカマク全体縮小試験

水平変位に大きな影響を与える低次の水平振動モードに着目し、トカマク機器の中でも最も重要なコイル系の振動挙動を把握する。

・支持脚実規模試験

支持脚の実規模試験体を用いて、減衰特性のようなスケール不可能な特性を把握する。

・真空容器縮小試験

真空容器本体の変形モードに着目し、その固有振動数をはじめとする特性を把握して、トカマク全体の振動特性に与える影響を確認する。

・支持脚小規模試験

比較的小規模の振動台を用いて機動的に試験を行い、支持脚の基礎的な測定を把握する。また、設計変更があった場合に、その影響を検証する。

トカマク全体縮小試験については、製作が進んでおり、コイル系は完成し、真空容器部分について製作中である。平成 16 年度中には試験を実施する予定となっている。また、予備的な数値解析を行った結果、試験の対象としている一次固有振動モードの周波数が試験機器のスペックに収まっており、試験に支障がないことが確認された。今後、他の試験についても順次実施する予定である。

さらに、重力支持脚が低次の水平振動モードに対する影響を数値解析により評価し、支持脚と本体の両者が柔構造の場合、それぞれが複合的に振動特性に影響を与えることを明らかにした。上記試験計画の遂行の上でこの知見は有用であり、今後の試験において反映していく。

謝辞

本報告の内容については、委員長である藤田隆史東京大学教授をはじめとする財団法人原子力安全研究協会 ITE 耐震・免震設計基準案検討専門委員会の委員の方々に御審議いただき、多くの御指導、御助言を頂戴した。ここに深く感謝する。

また、本研究を推進するにあたり、御支援をいただいた ITER 開発室の常松俊秀室長、多田次長、柴沼清 ITER トカマク本体開発室長に感謝する。

参考文献

[1] "Summary of the ITER Final Design Report", ITER EDA Document Series No. 22, IAEA, Vienna (2001)

[2] "ITER Technical Basis", ITER EDA Document Series No. 24, IAEA, Vienna (2002)

[3] "Design and Structural Analysis of Support Structure for ITER Vacuum Vessel", N. Takeda, J. Ohmori, M. Nakahira, K. Shibanuma, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.41, No.12, pp.1280-1286 (2004)

表 1-1 ITER トカマクの主要構成機器

主要機器	主な機能	動作温度
クライオスタット	超伝導コイルの真空断熱	室温
トロイダル磁場コイル	プラズマの磁場閉じ込め	-269 度 C
ポロイダル磁場コイル	プラズマの位置・形状制御	-269 度 C
中央ソレノイドコイル	プラズマ電流の立ち上げ・維持	-269 度 C
真空容器	プラズマ空間の高真空の維持	150 度 C
ブランケット	遮蔽、トリチウムの増殖	600～100 度 C
ダイバータ	プラズマ中の不純物の制御	700～100 度 C

表 2-1 最大応力が 1/1 となるスケール則

	応力	質量	板ばね枚数	支持脚数	板ばね高さ	板ばね幅	板ばね厚さ	支持脚剛性	加速度	時間
スケール則	1/1	1/512	1/1	1/1	1/8	1/8	1/8	1/8	8	1/8
実機	—	40,000 ton	20	20	3680mm	1700mm	48mm	19.8GN/m	—	—
試験体	—	80 ton	20	20	460mm	212.5mm	6mm	2.48GN/m	—	—

表 3-1 コイル系試験体固有モード解析結果

	固有振動数[Hz]	モード分類
1 次	37.7	①全体系の曲げ 1 次
2 次	37.7	〃
3 次	69.4	②全体系のねじり
4 次	82.9	③上下振動
5 次	94.5	④全体系の曲げ 2 次
6 次	94.5	〃
7 次	114.4	⑤コイル系ねじれ
8 次	115.2	⑥コイル系のオーバル
9 次	115.2	〃
10 次	123.0	ベースプレート—テストフロア間 ボルトによるねじれ

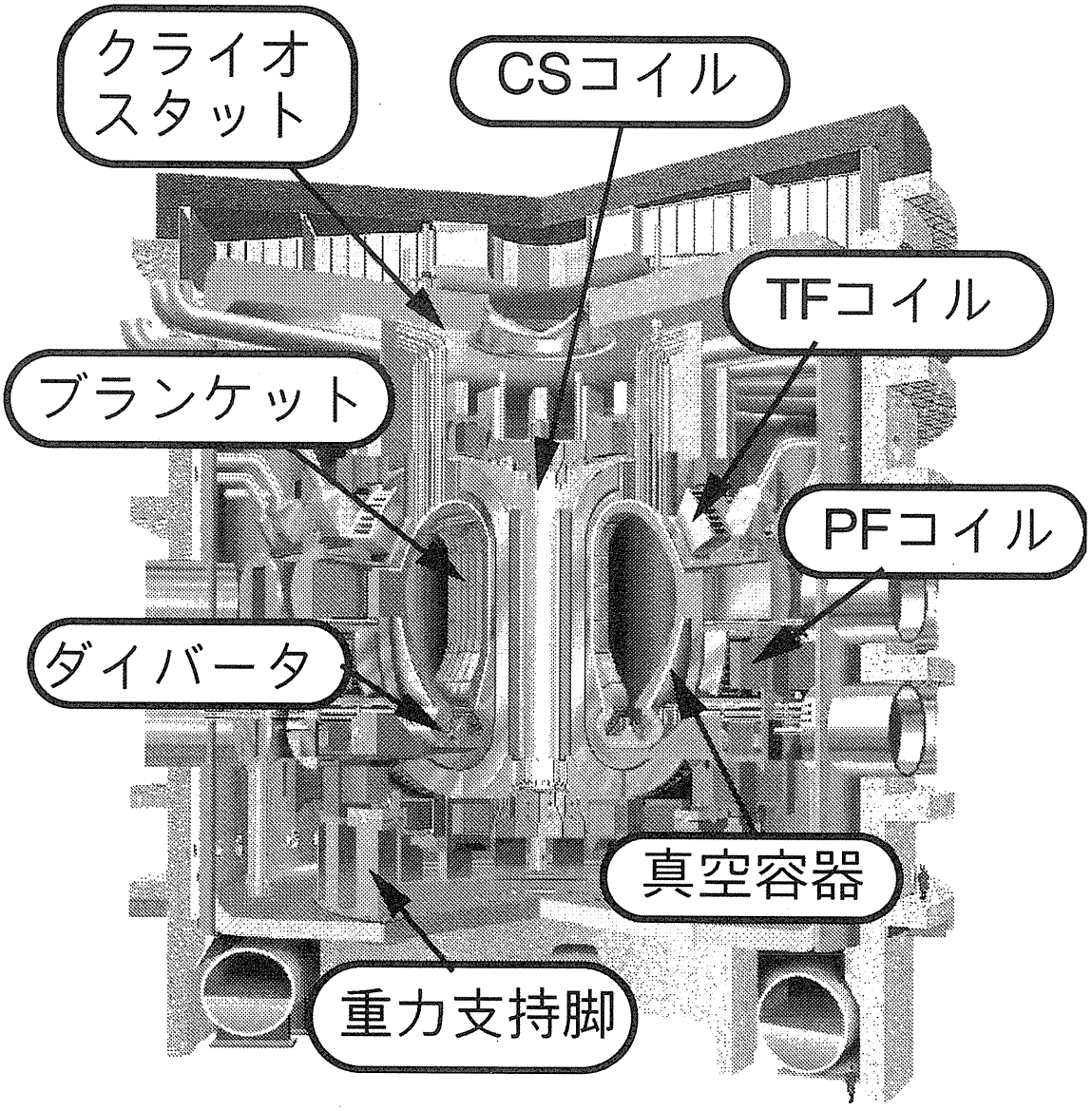


図 1-1 ITER の概念図

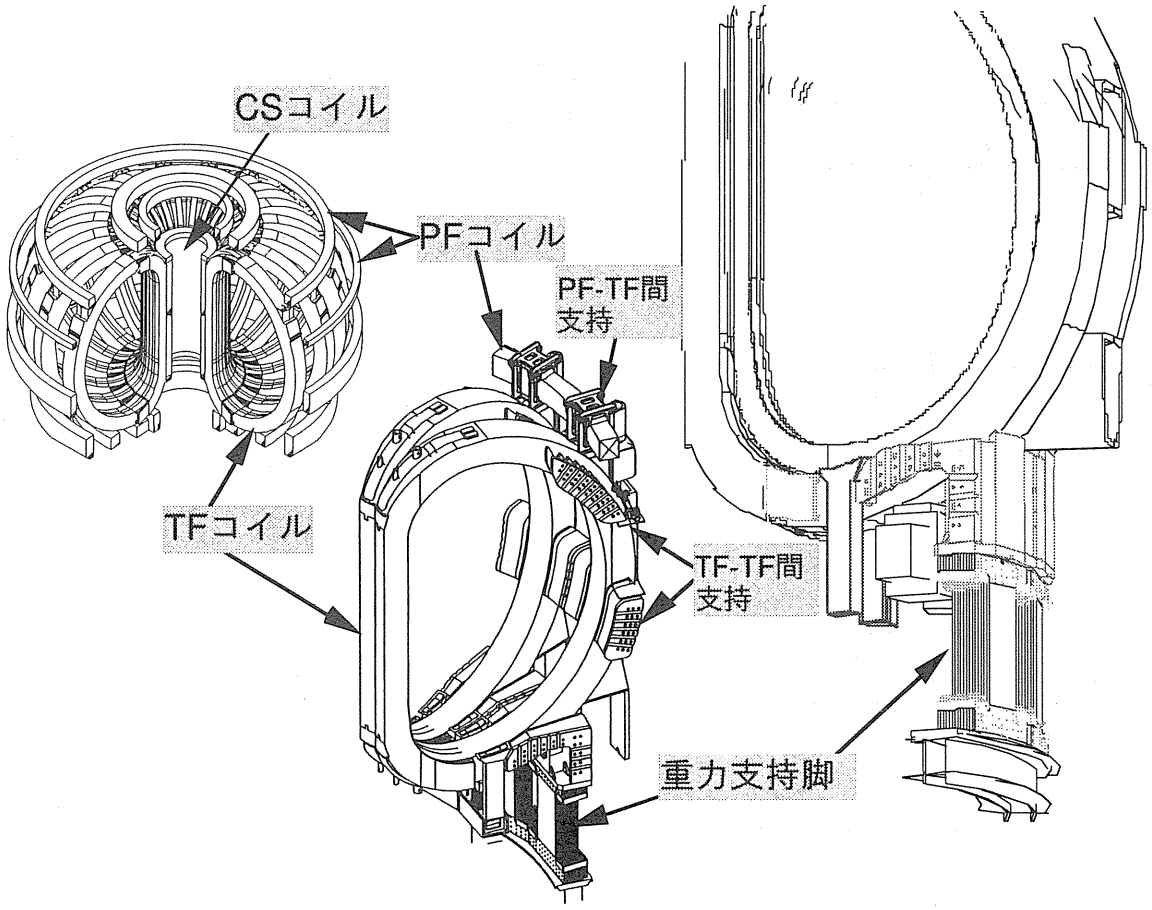
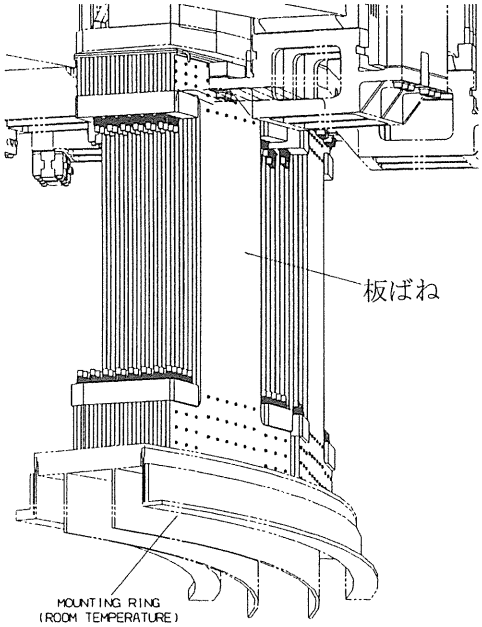


図 1-2 超伝導コイルの構成と支持構造



・矩形の板ばね
・ボルトによって床に締結
・板ばね枚数: 20
・支持脚数: 20

図 1-3 コイル系支持脚

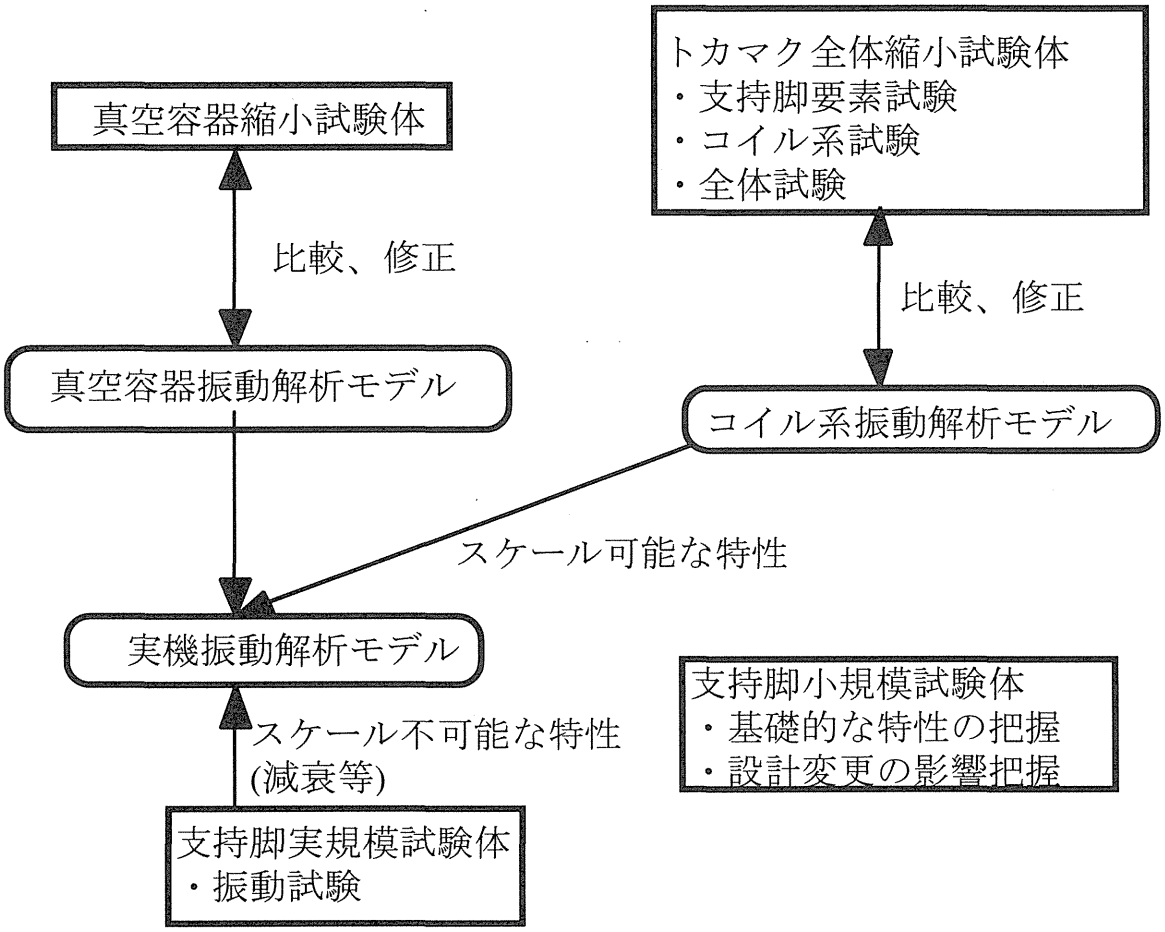


図 2-1 ITER トカマクの耐震性に関する振動試験全体計画

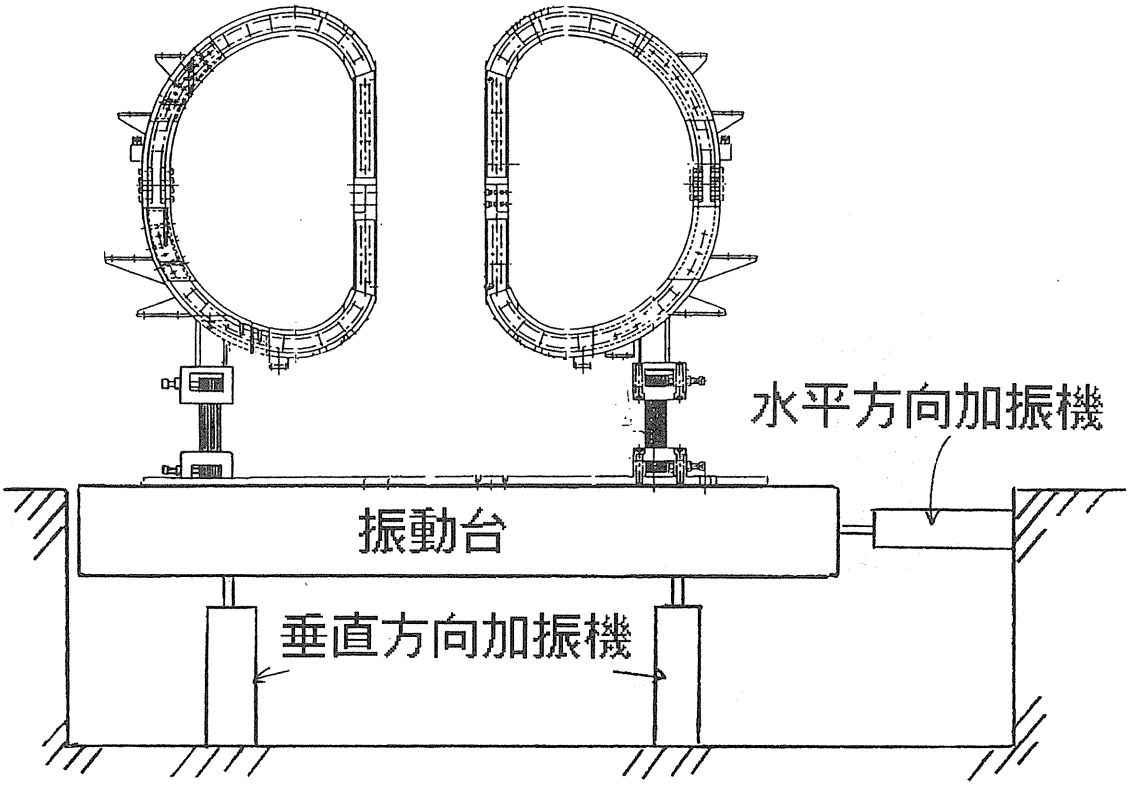
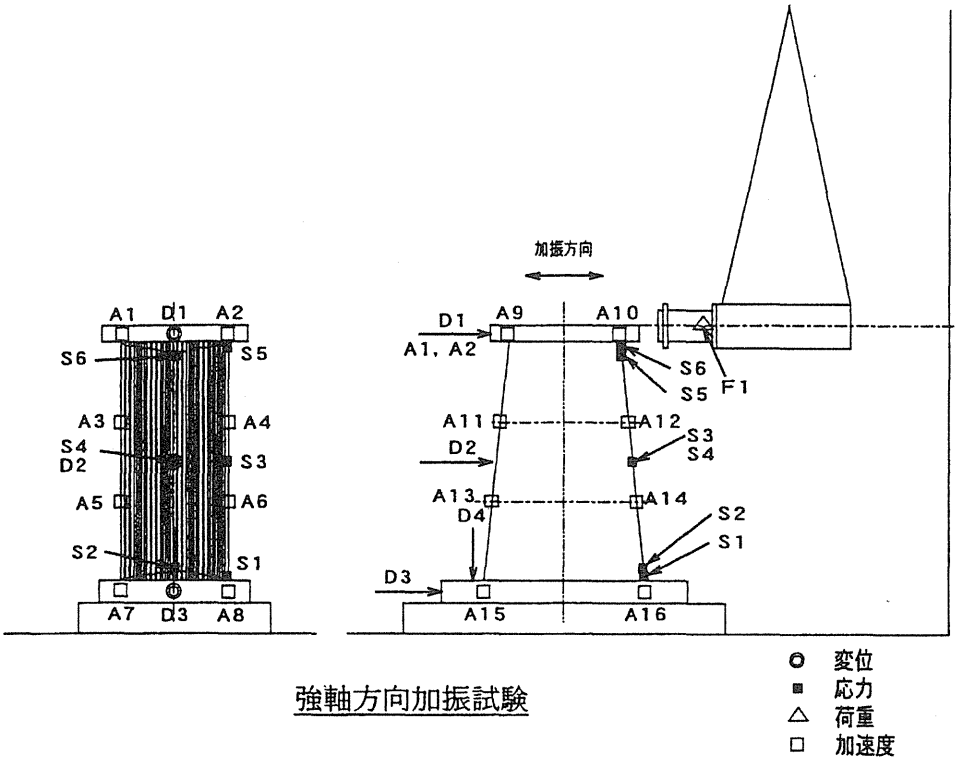
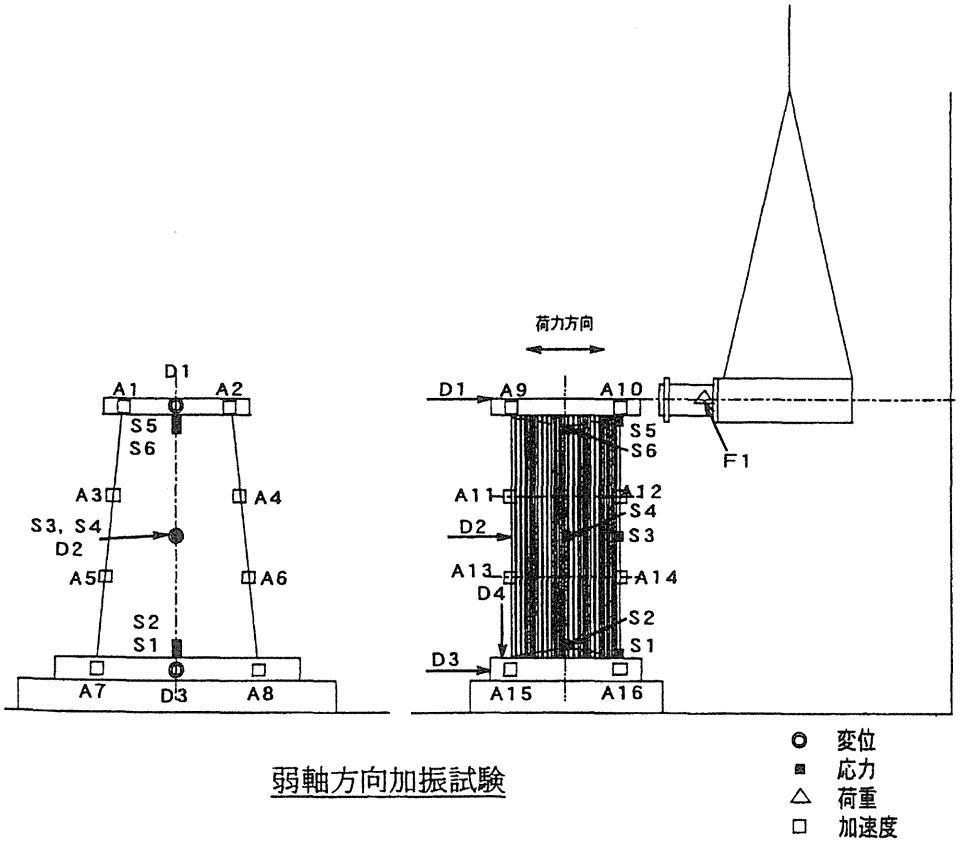


図 2-2 トカマク全体縮小試験体



強軸方向加振試験



弱軸方向加振試験

図 2-3 支持脚実規模試験体

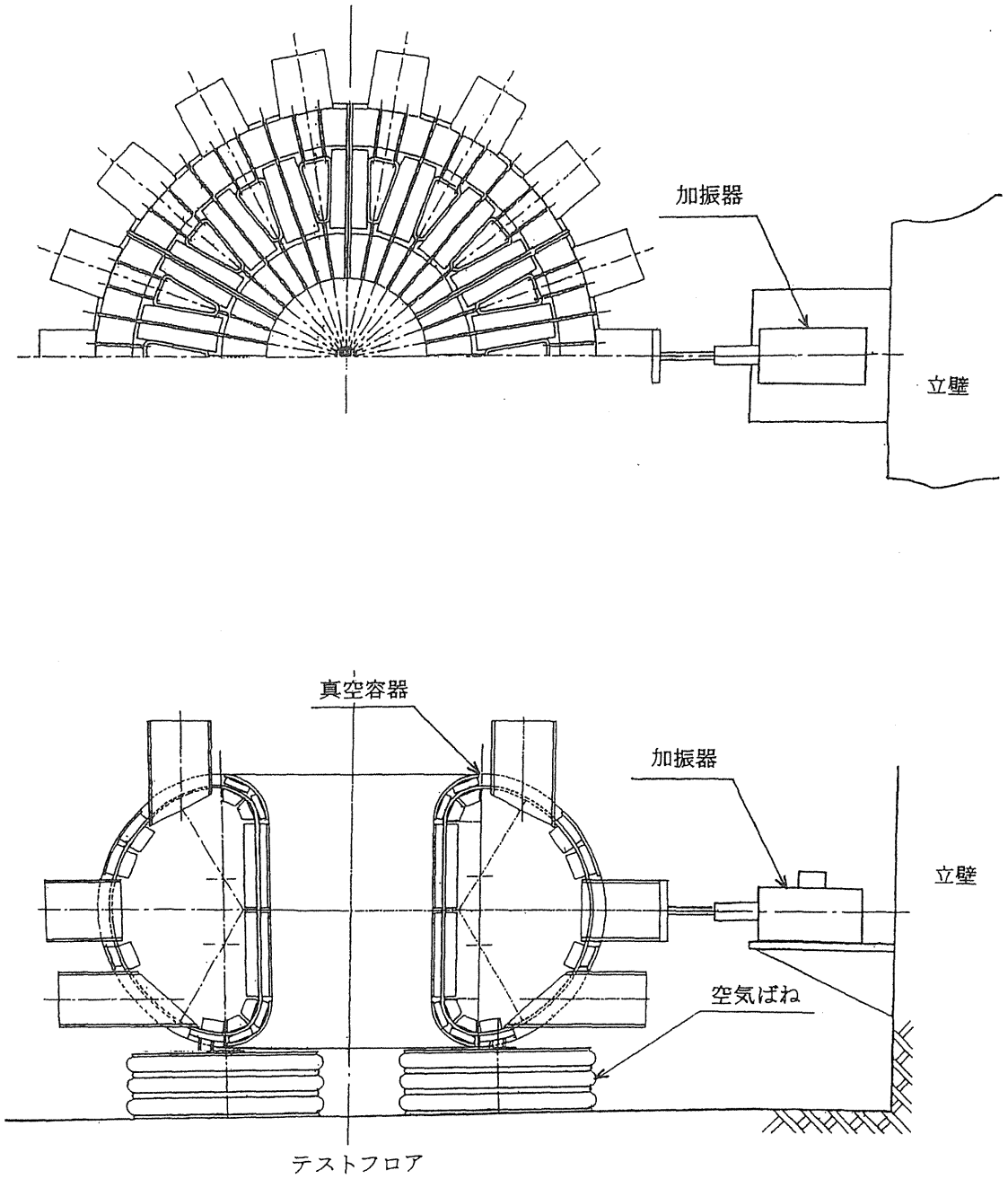
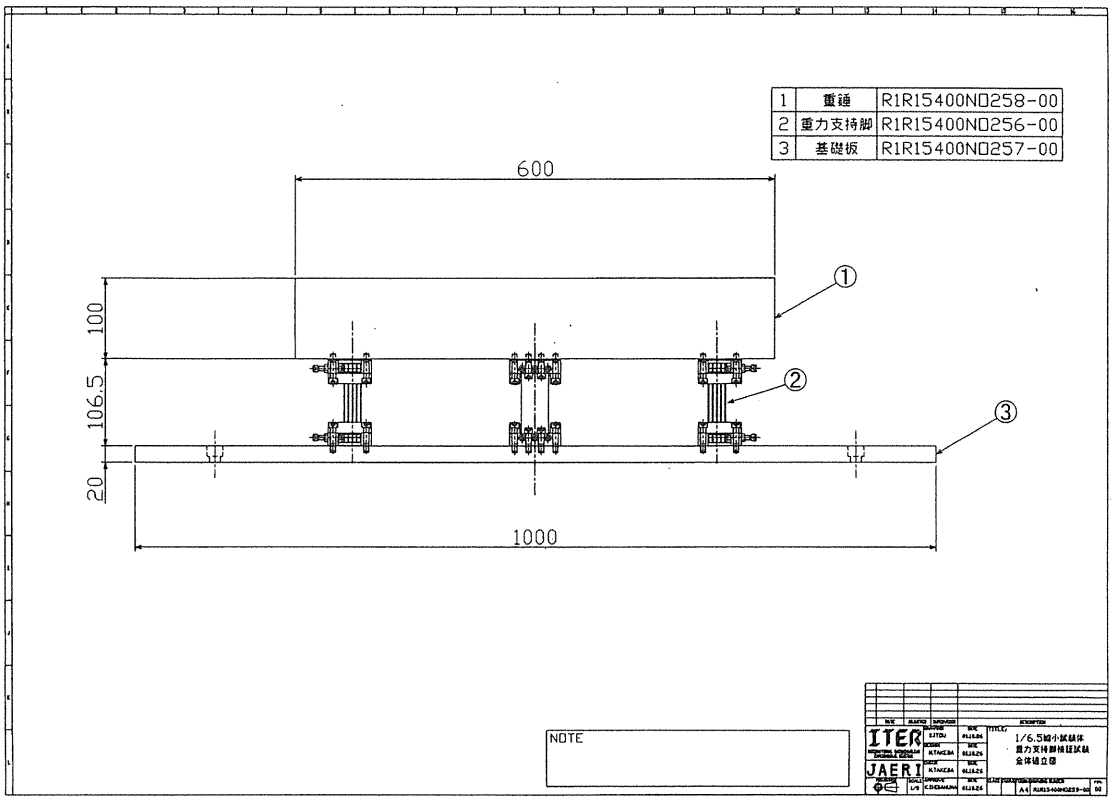


図 2-4 真空容器縮小試験体



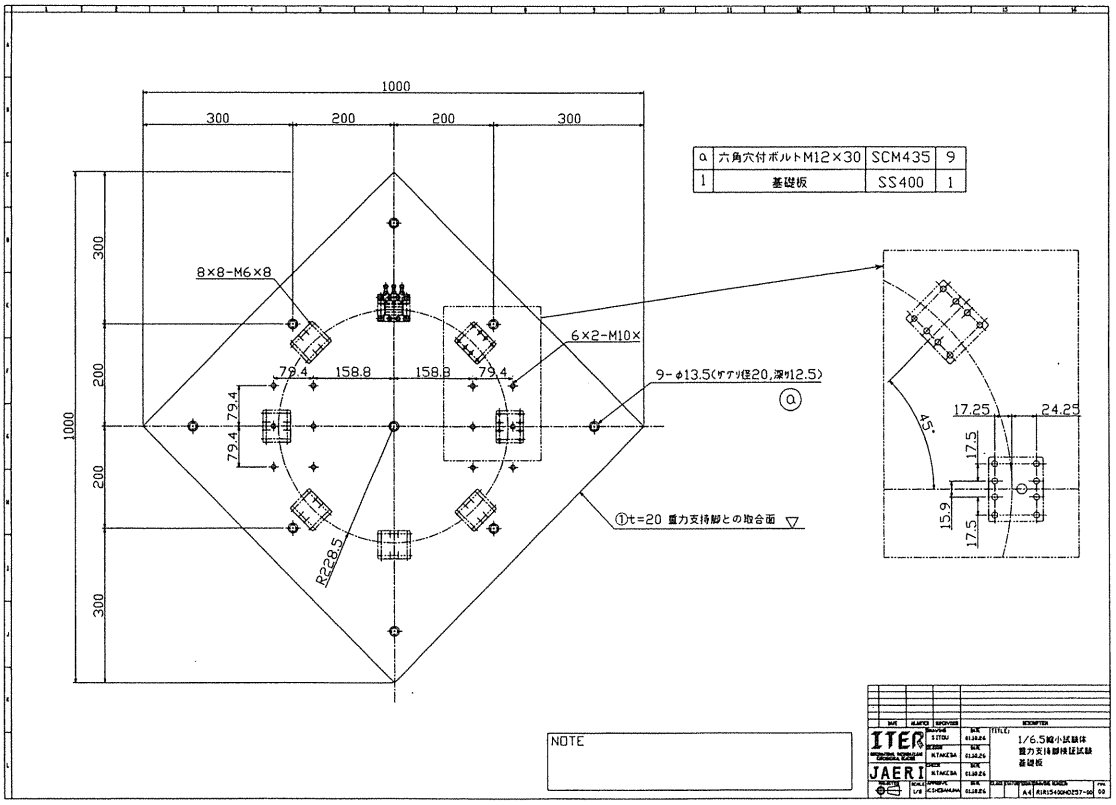


図 2-5 支持脚小規模試験体

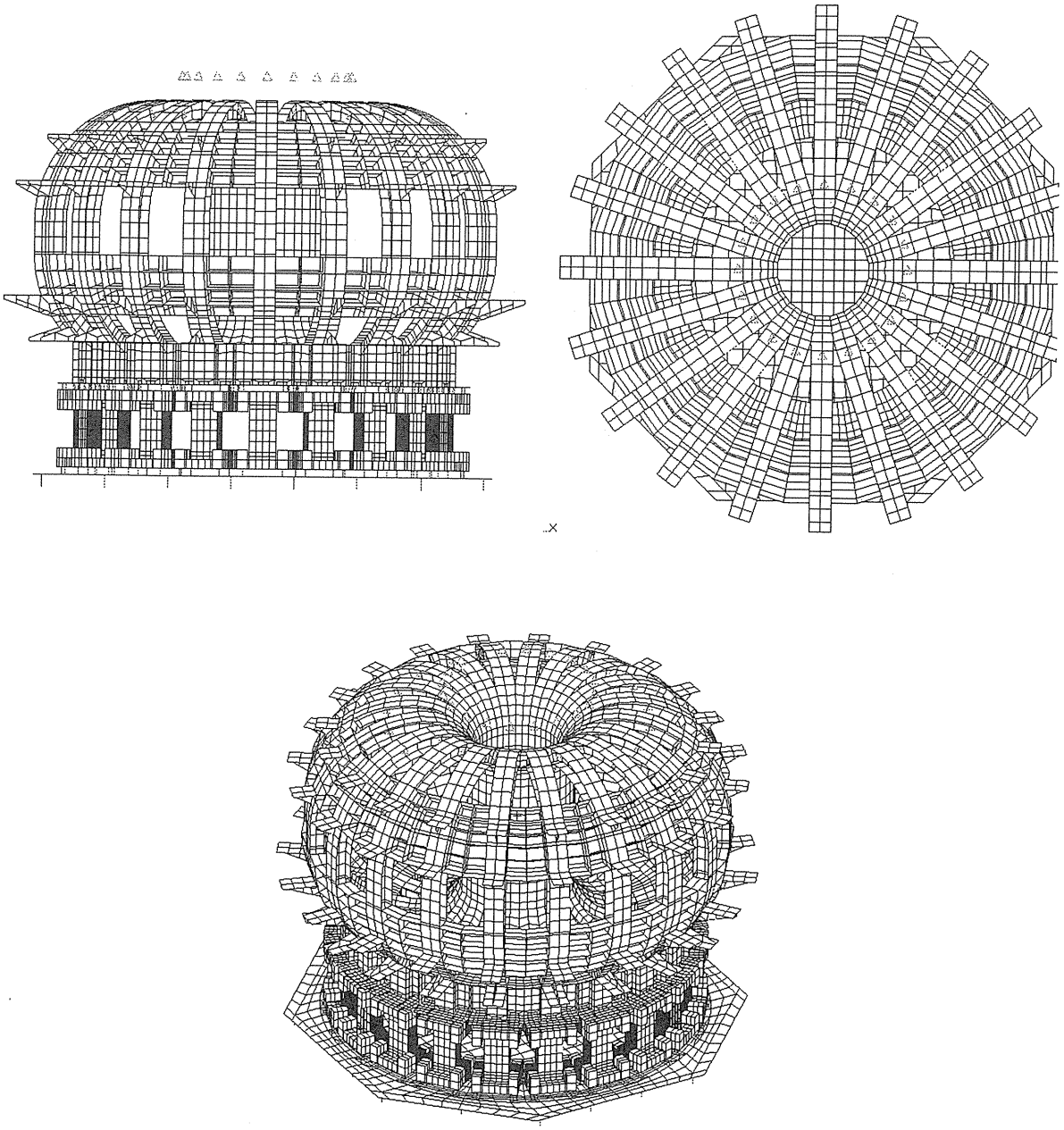
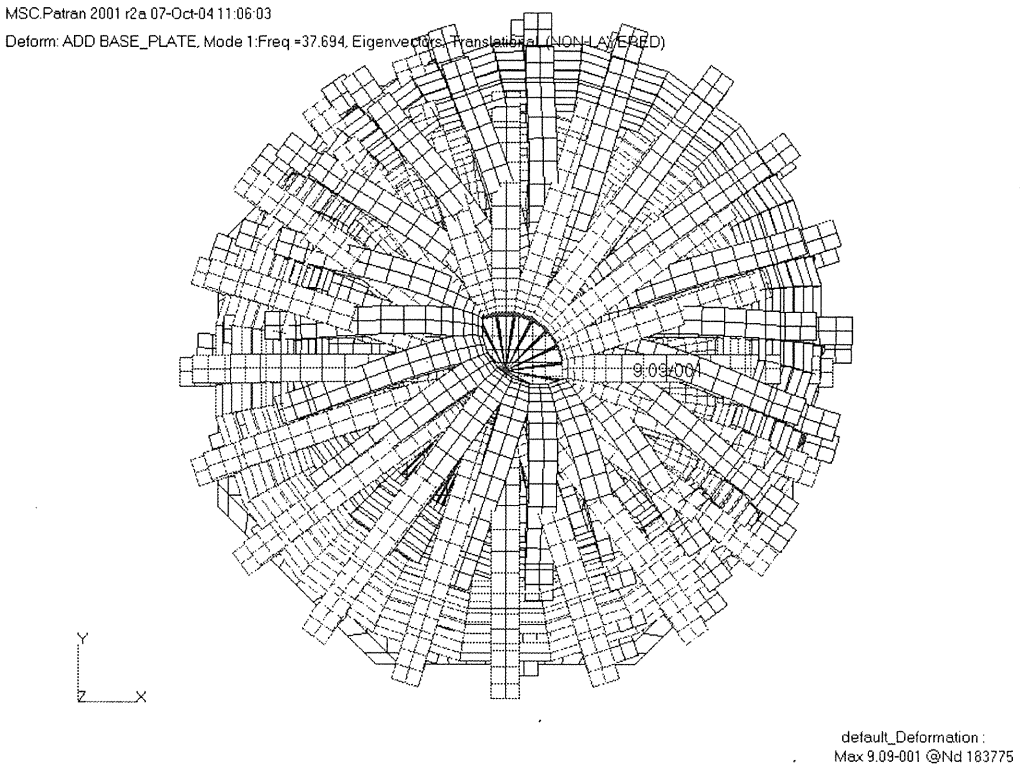


図 3-1 解析モデル


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:06:03
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 1:Freq =37.694, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
9.09-001
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 9.09-001 @Nd 183775

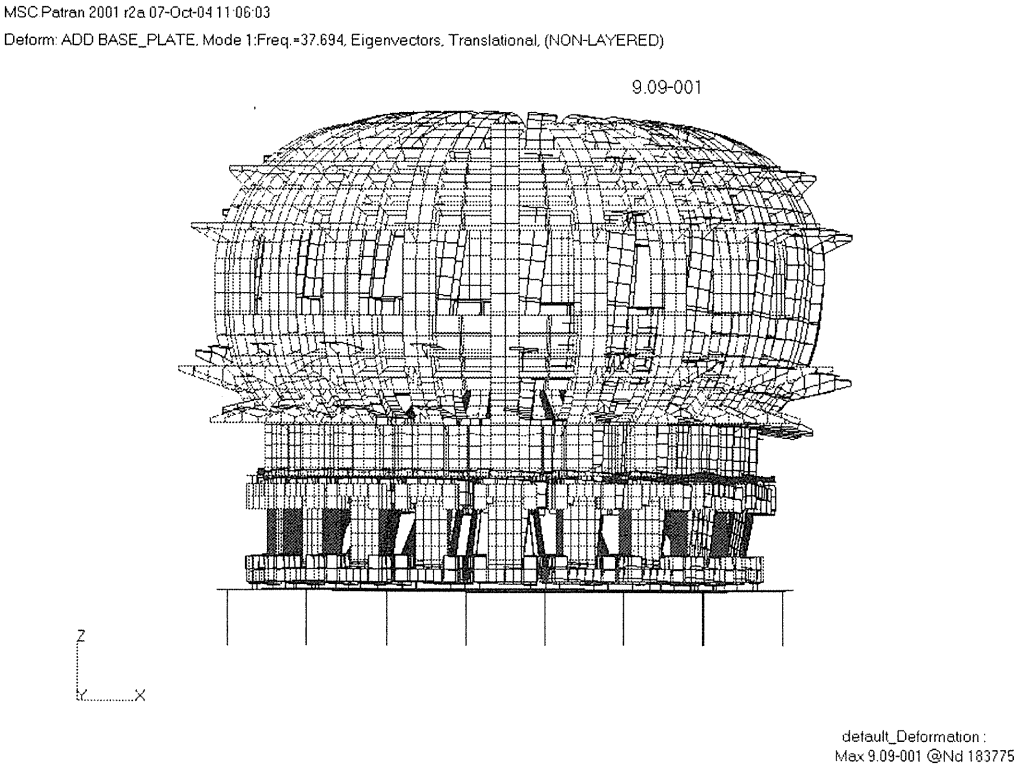
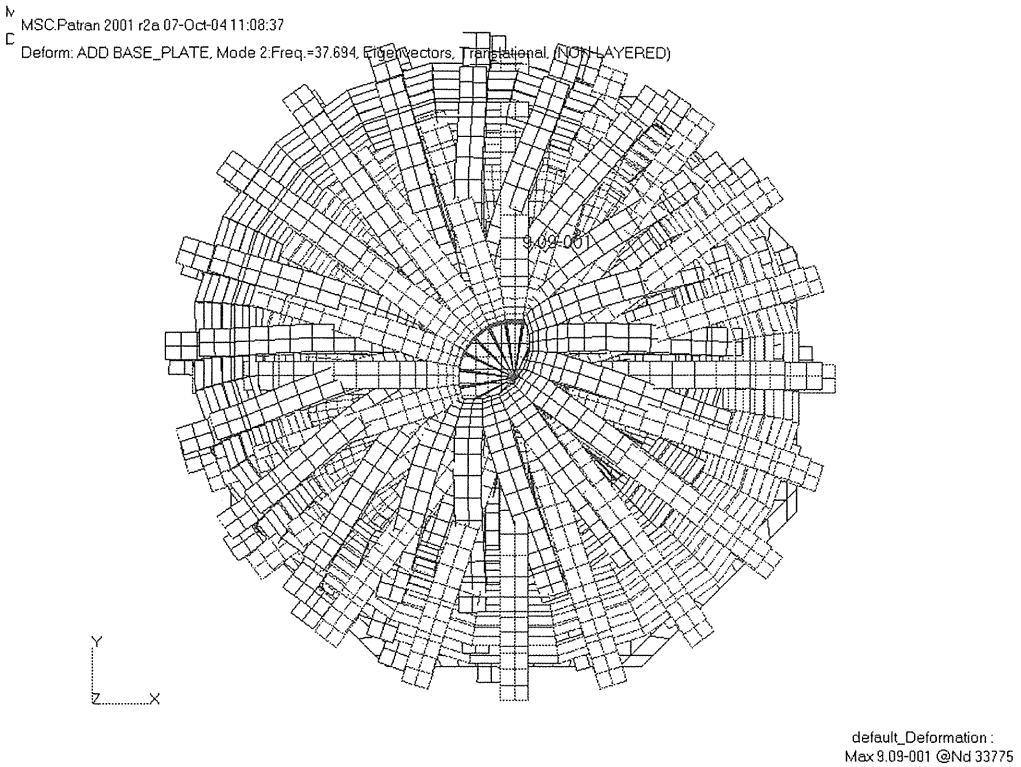

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:06:03
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 1:Freq.=37.694, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
9.09-001
Z
X
default_Deformation :
Max 9.09-001 @Nd 183775

図 3-2 1 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:08:37
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 2:Freq.=37.694, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
9.09-001
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 9.09-001 @Nd 33775

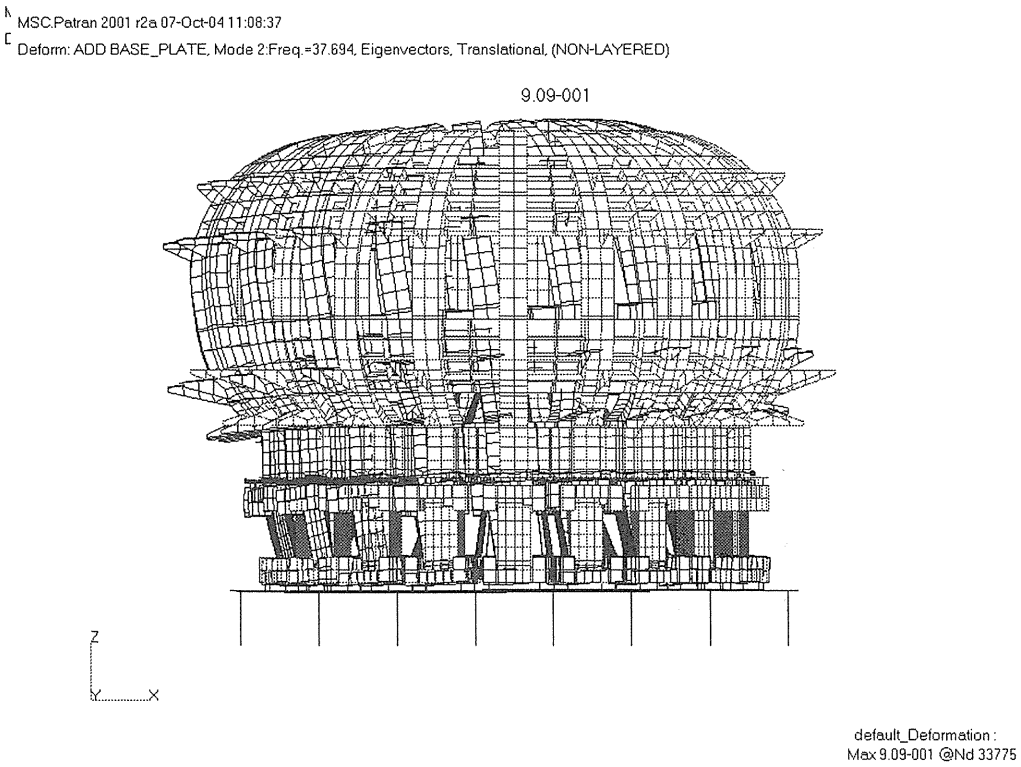
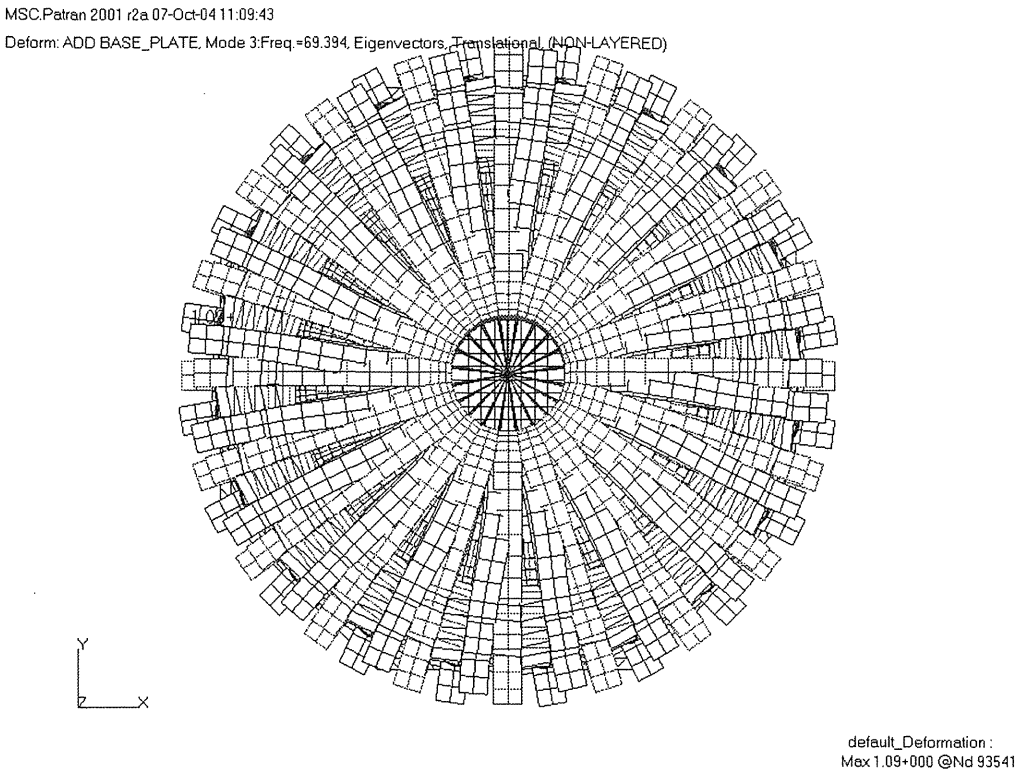

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:08:37
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 2:Freq.=37.694, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
9.09-001
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 9.09-001 @Nd 33775

図 3-3 2 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:09:43
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 3:Freq.=69.394, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 1.09+000 @Nd 93541

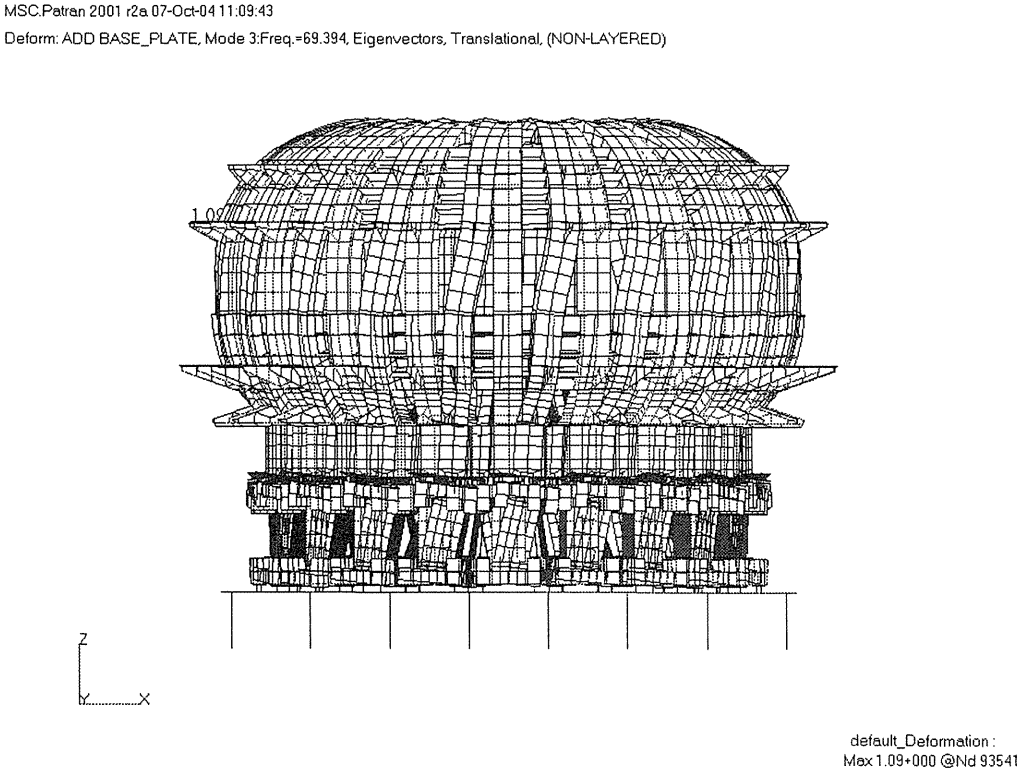
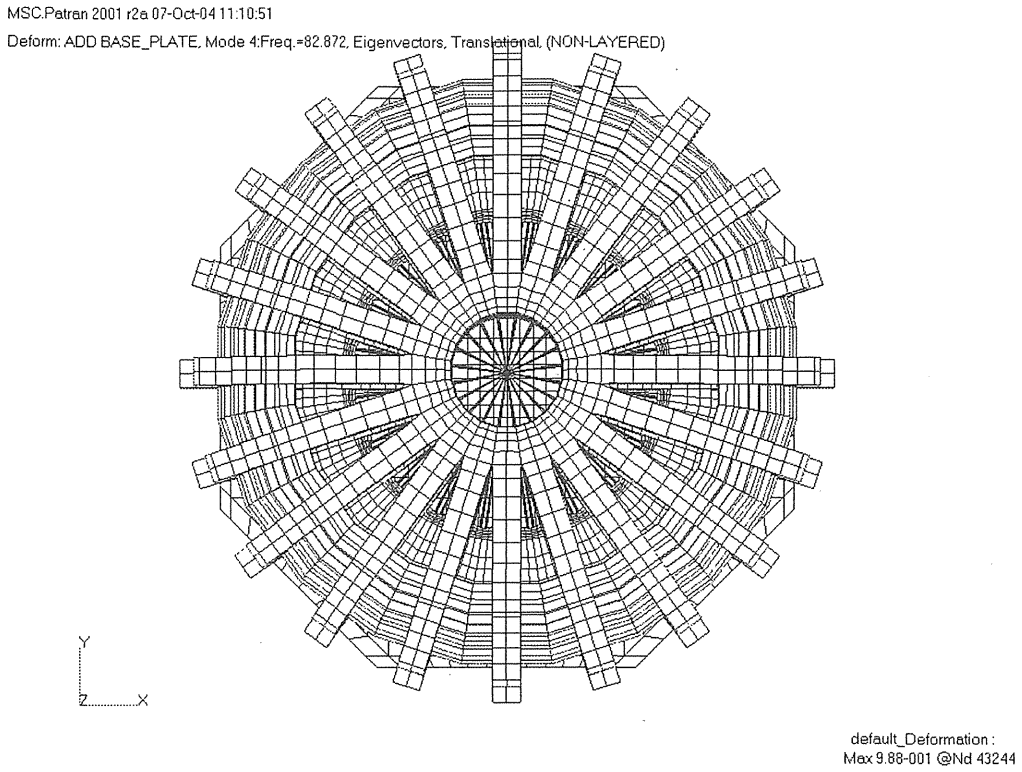

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:09:43
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 3:Freq.=69.394, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 1.09+000 @Nd 93541

図 3-4 3 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:10:51
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 4:Freq.=82.872, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 9.88-001 @Nd 43244

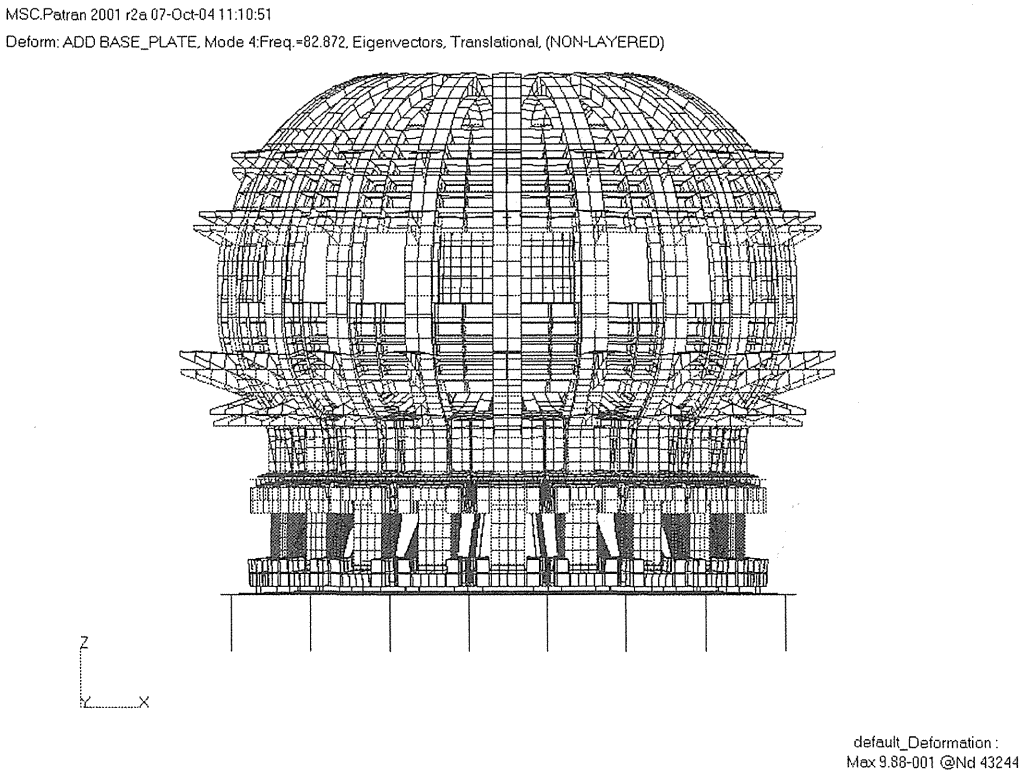
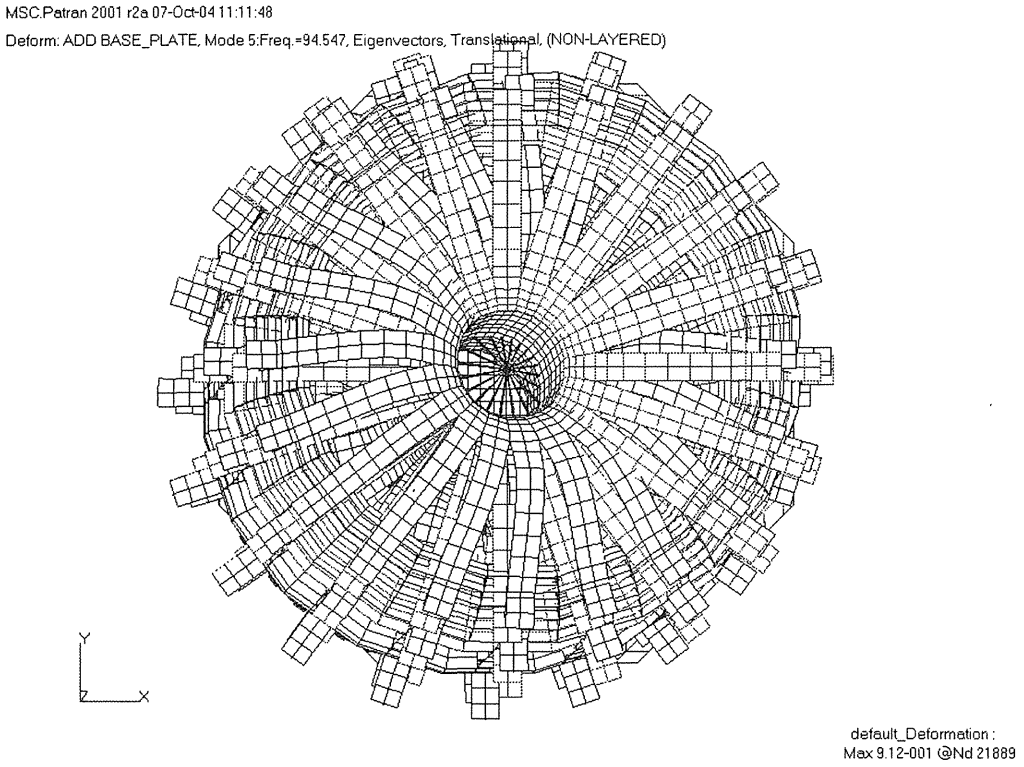

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:10:51
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 4:Freq.=82.872, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 9.88-001 @Nd 43244

図 3-5 4 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:11:48
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 5:Freq.=94.547, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 9.12-001 @Nd 21889

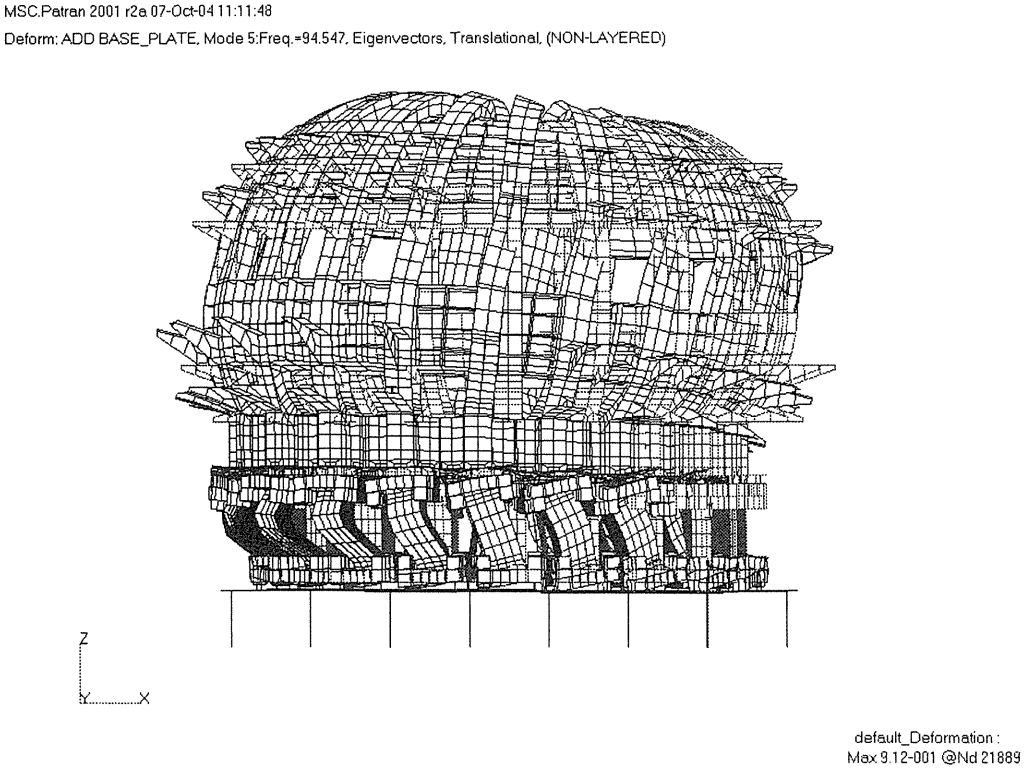
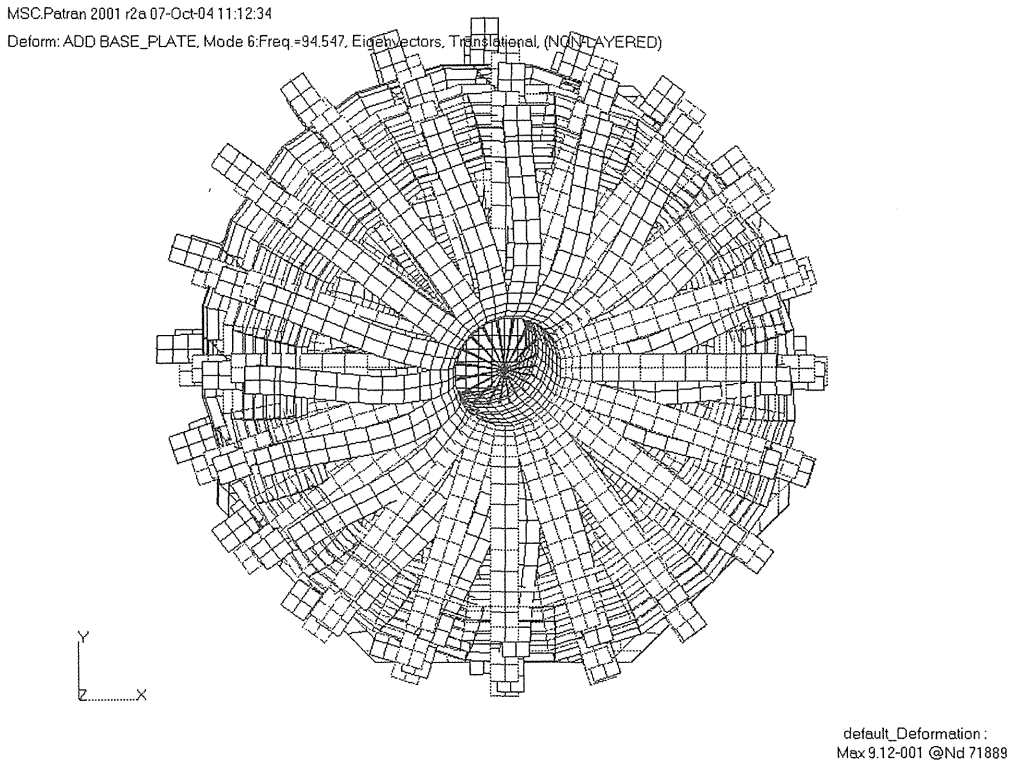

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:11:48
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 5:Freq.=94.547, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 9.12-001 @Nd 21889

図 3-6 5 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:12:34
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 6:Freq.=94.547, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 9.12-001 @Nd 71889

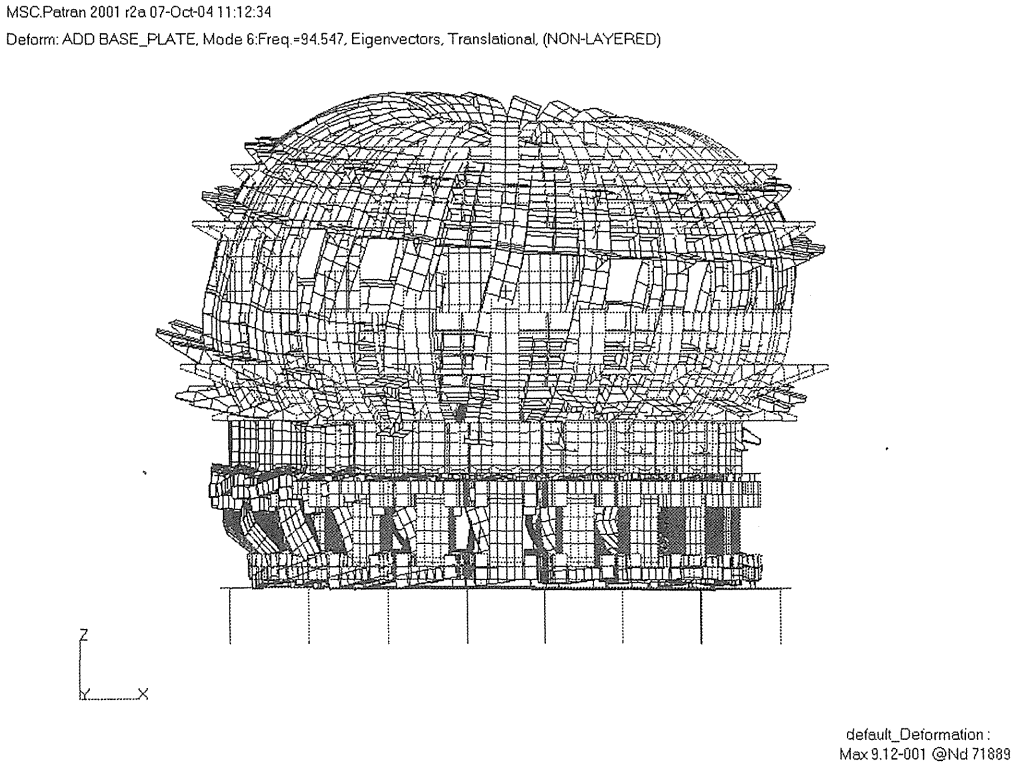
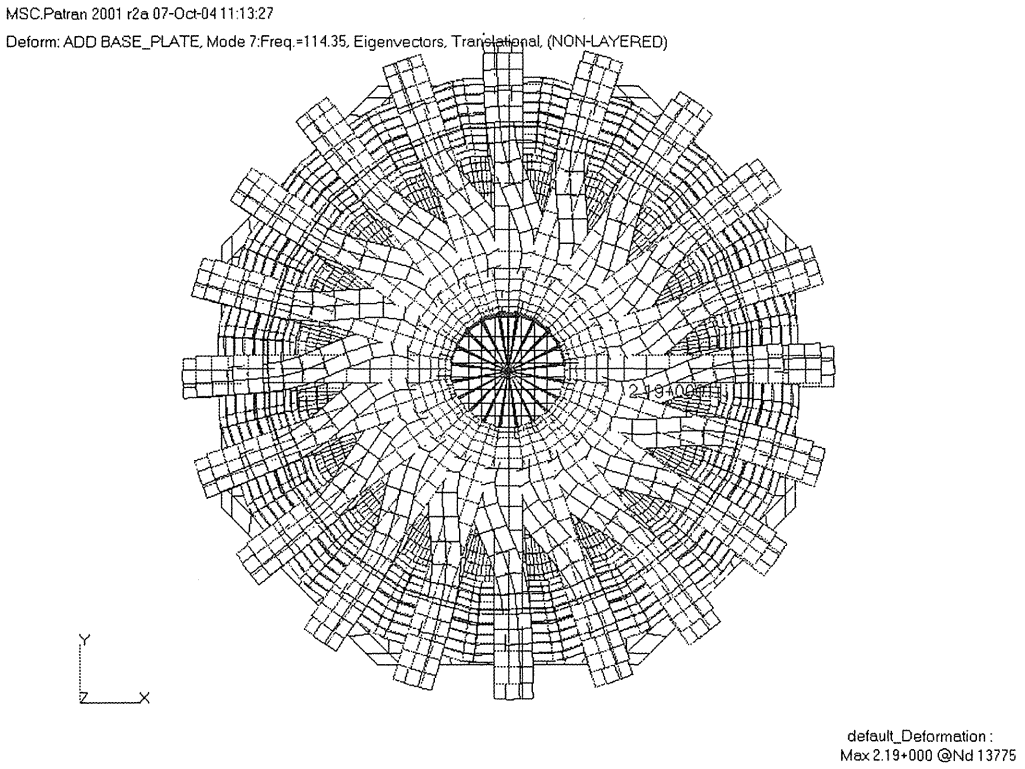

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:12:34
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 6:Freq.=94.547, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 9.12-001 @Nd 71889

図 3-7 6 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:13:27
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 7:Freq.=114.35, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
2.19+000
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 2.19+000 @Nd 13775

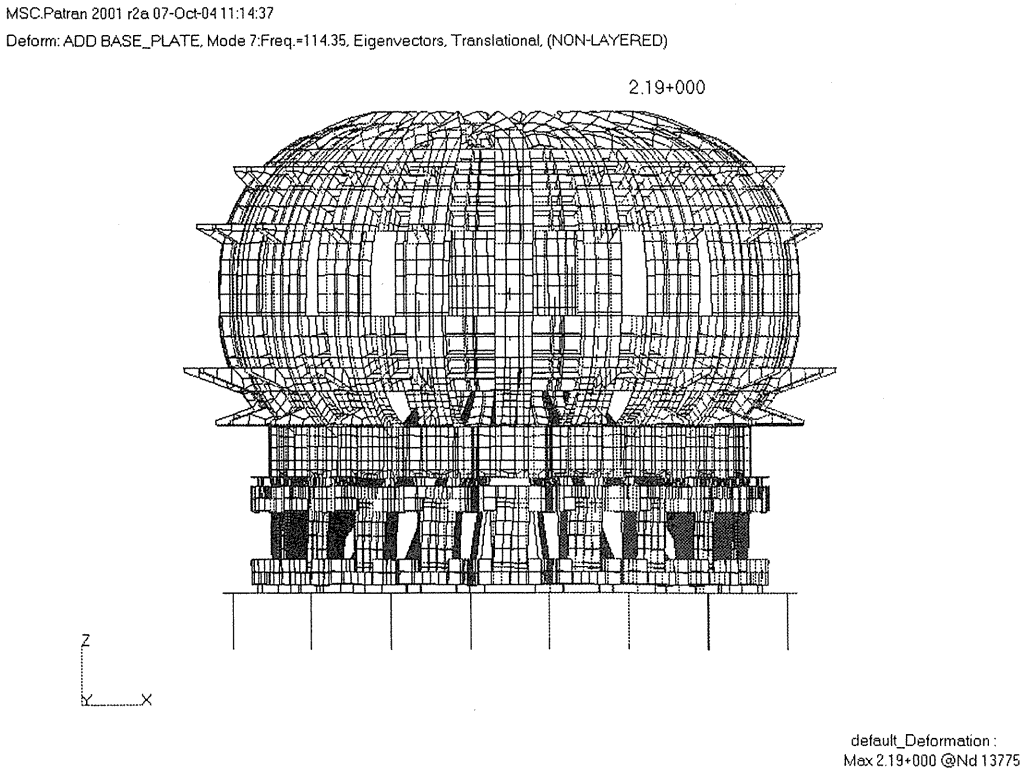
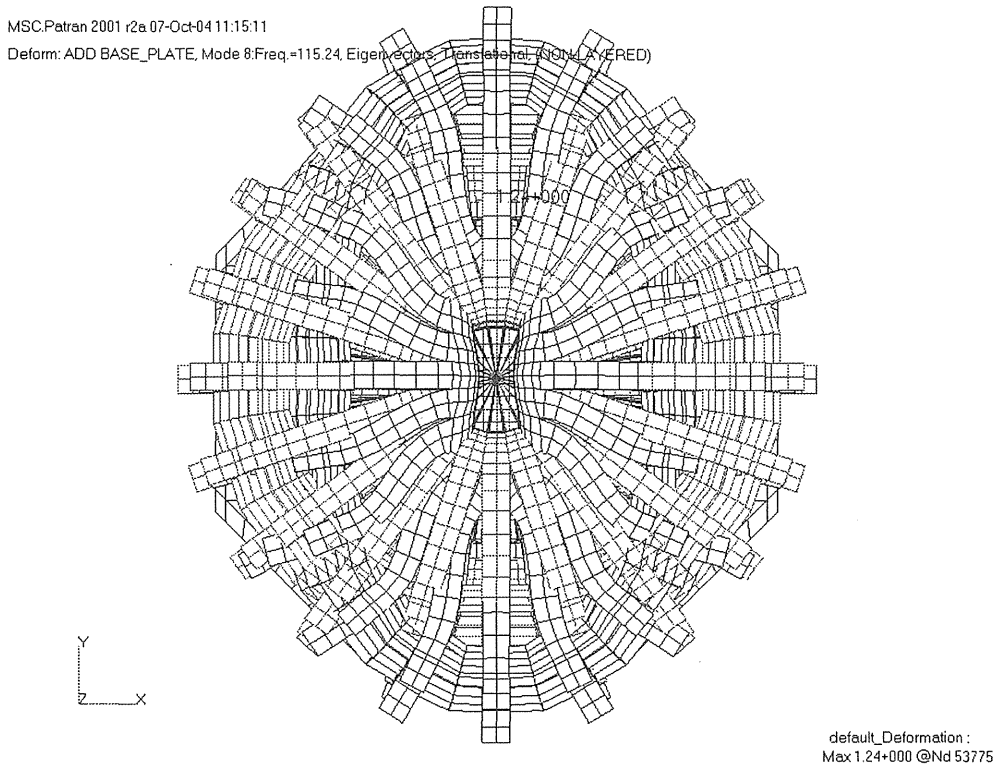

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:14:37
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 7:Freq.=114.35, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
2.19+000
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 2.19+000 @Nd 13775

図 3-8 7 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:15:11
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 8:Freq.=115.24, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
1.24+000
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 1.24+000 @Nd 53775

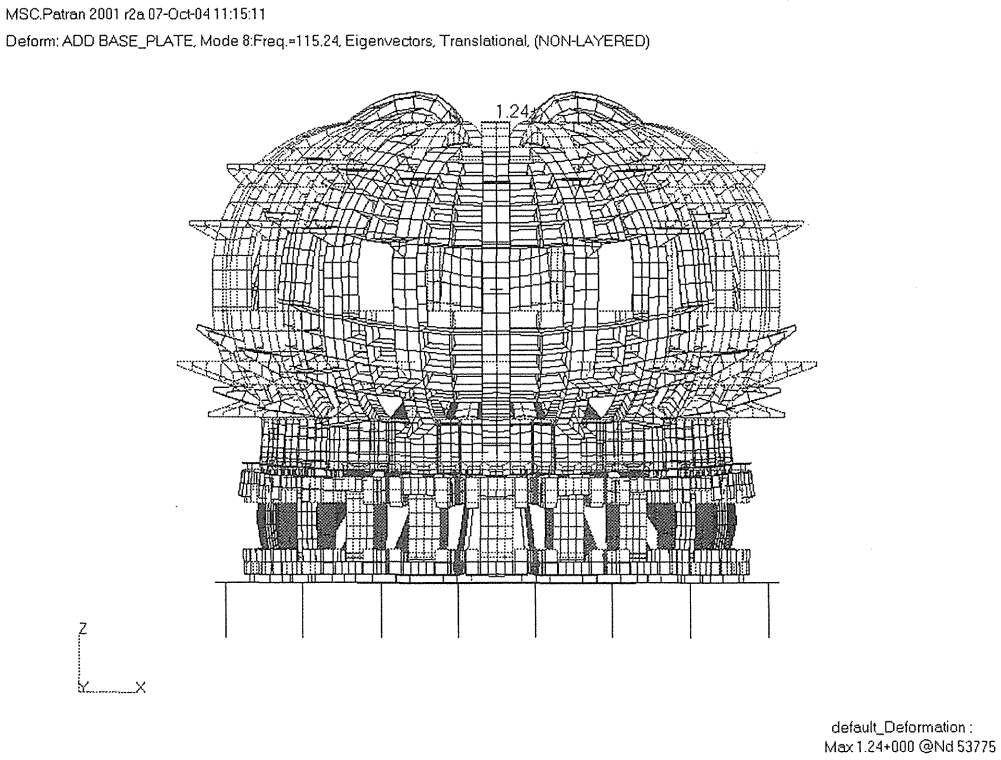
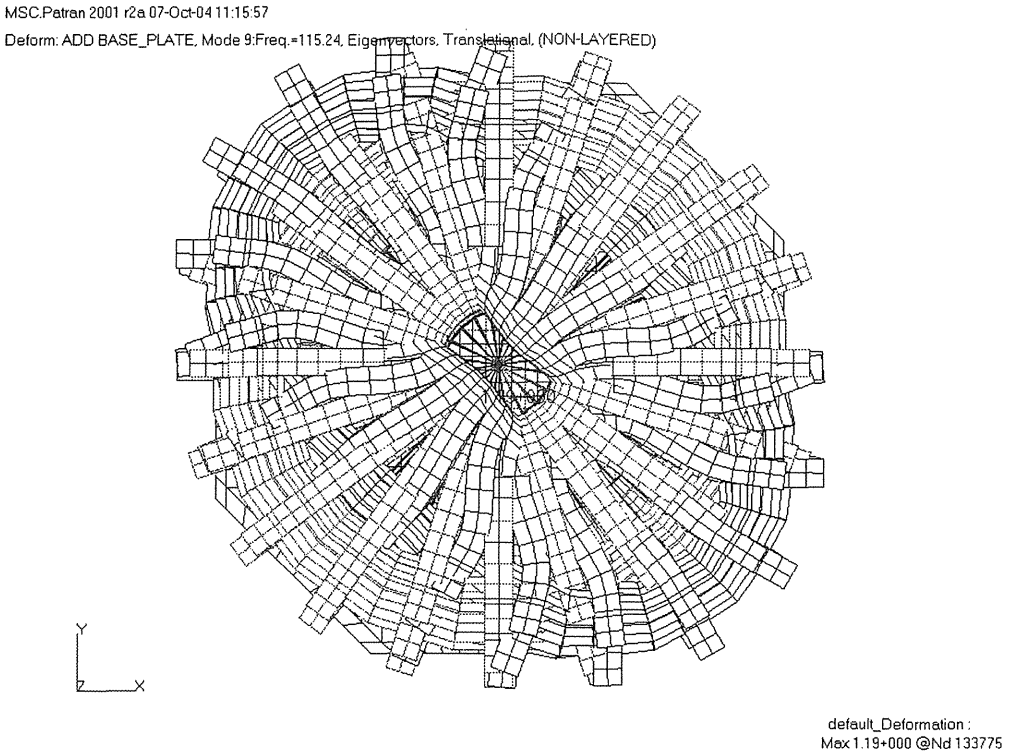

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:15:11
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 8:Freq.=115.24, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
1.24+000
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 1.24+000 @Nd 53775

図 3-9 8 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:15:57
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 9:Freq.=115.24, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 1.19+000 @Nd 133775

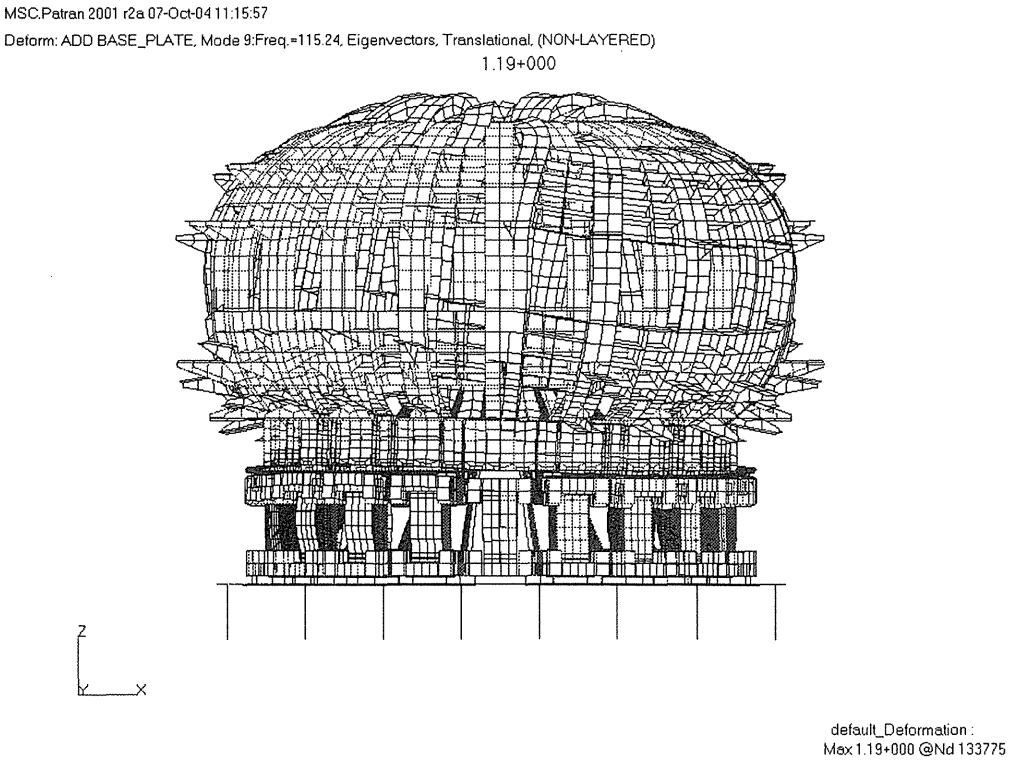
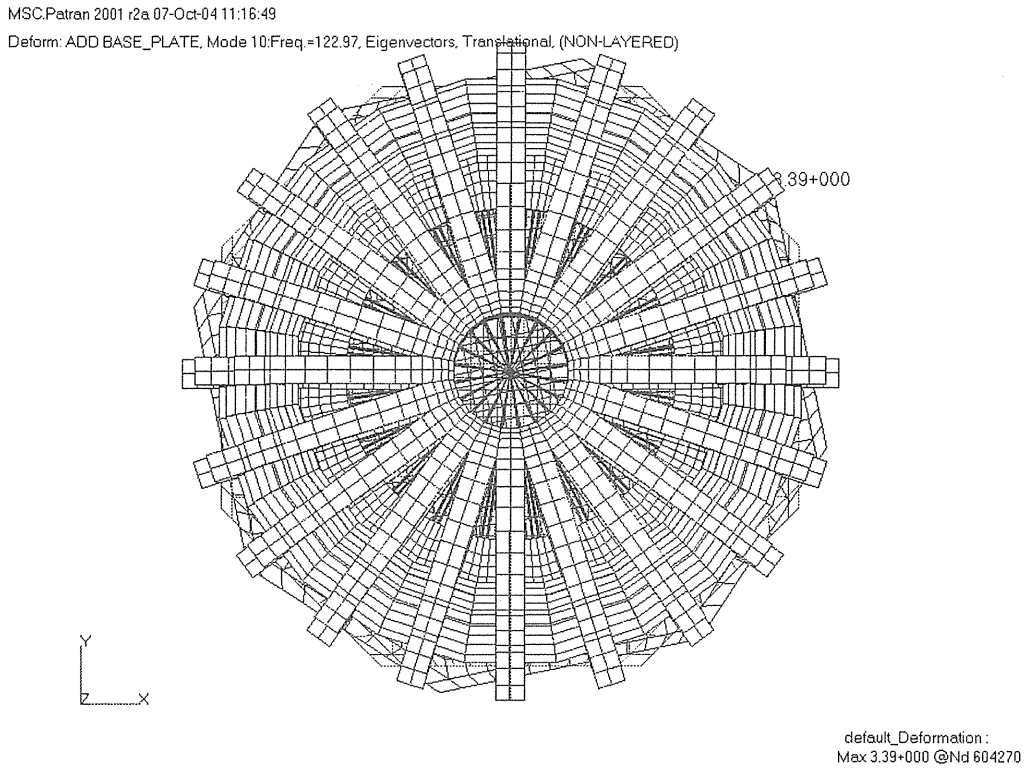

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:15:57
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 9:Freq.=115.24, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
1.19+000
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 1.19+000 @Nd 133775

図 3-10 9 次モード


MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:16:49
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 10:Freq.=122.97, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
3.39+000
Y
Z
X
default_Deformation :
Max 3.39+000 @Nd 604270

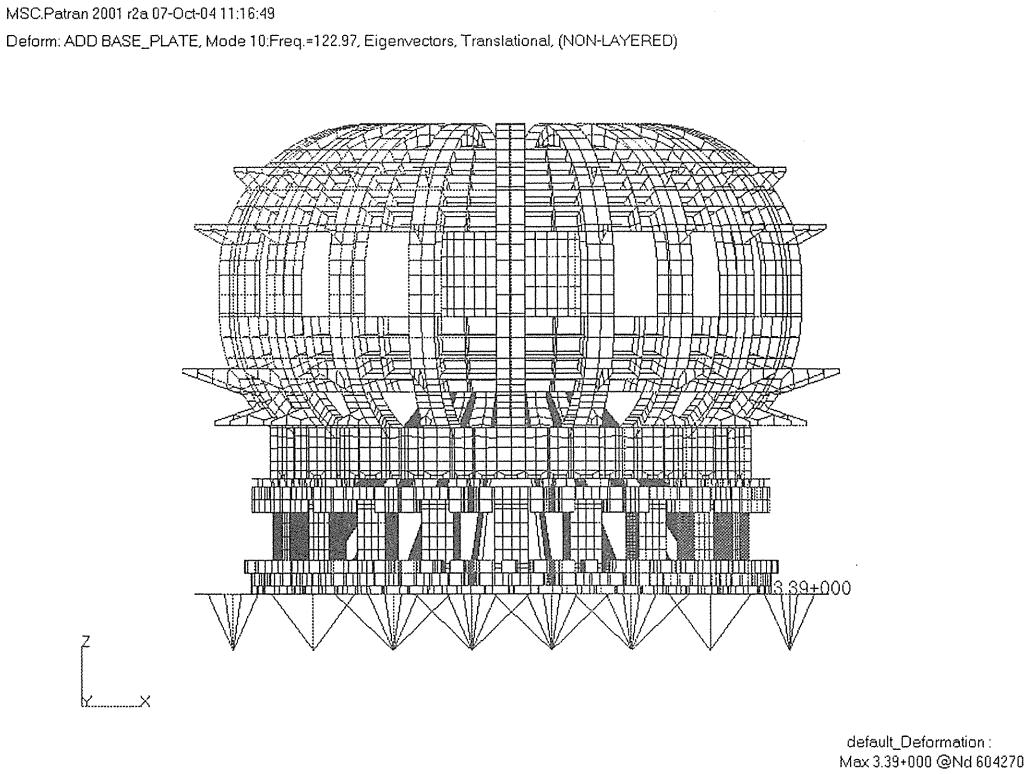

MSC.Patran 2001 r2a 07-Oct-04 11:16:49
Deform: ADD BASE_PLATE, Mode 10:Freq.=122.97, Eigenvectors, Translational, (NON-LAYERED)
3.39+000
Z
Y
X
default_Deformation :
Max 3.39+000 @Nd 604270

図 3-11 10 次モード

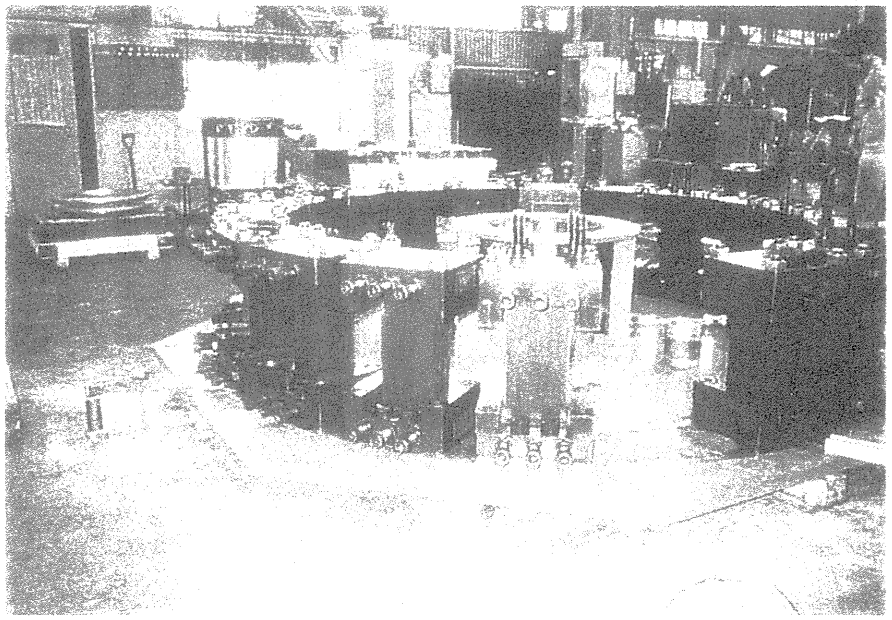


図 3-12 重力支持脚

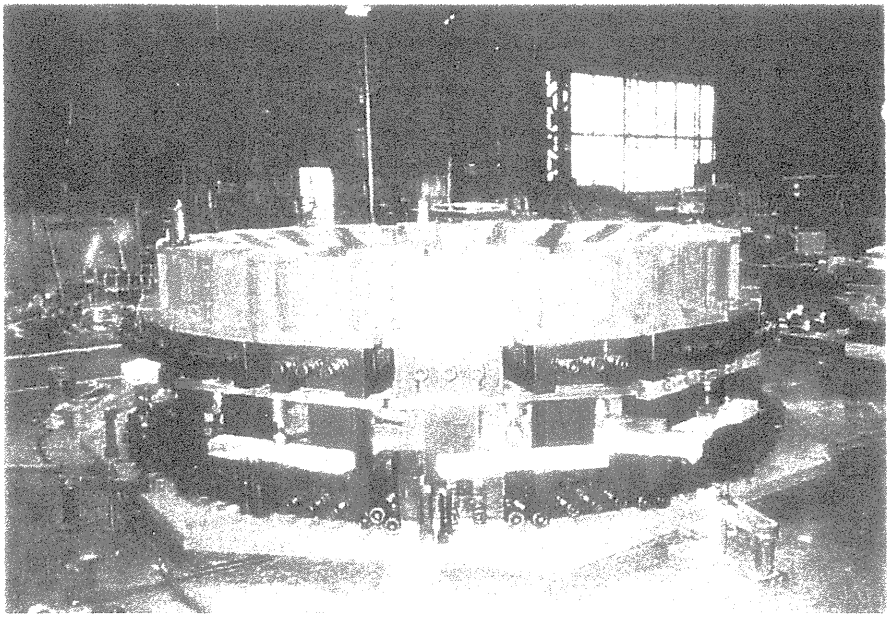


図 3-13 重力支持脚と下部コイル間構造

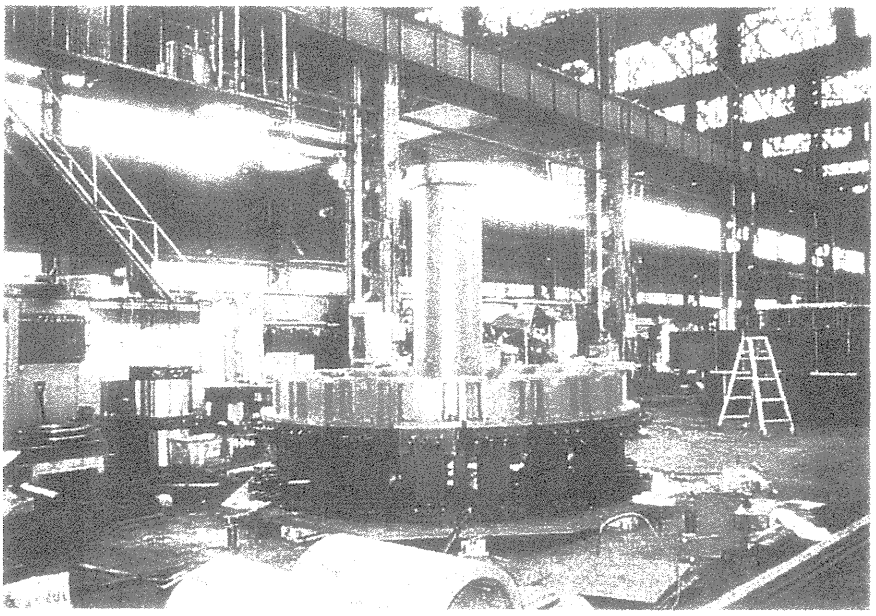


図 3-14 CS コイルの設置

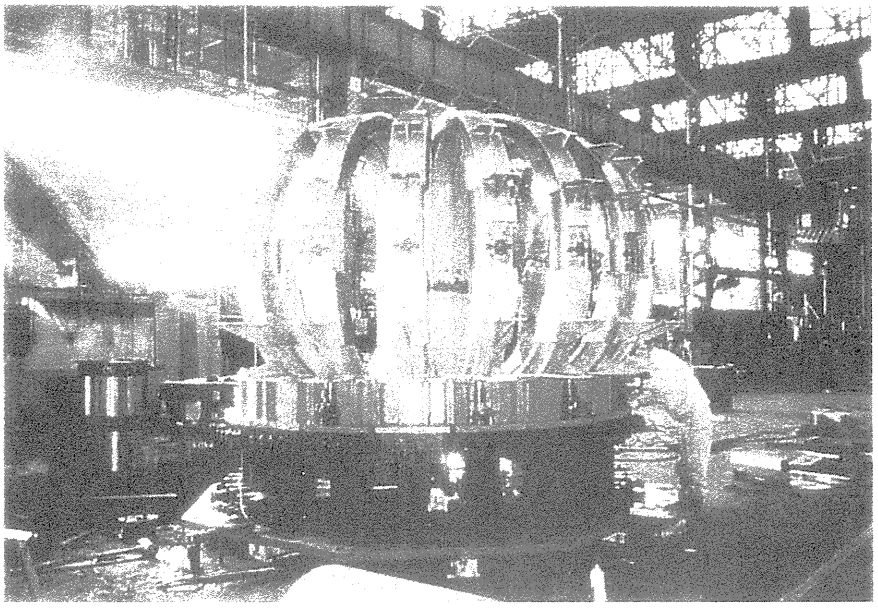


図 3-15 TF コイルの設置

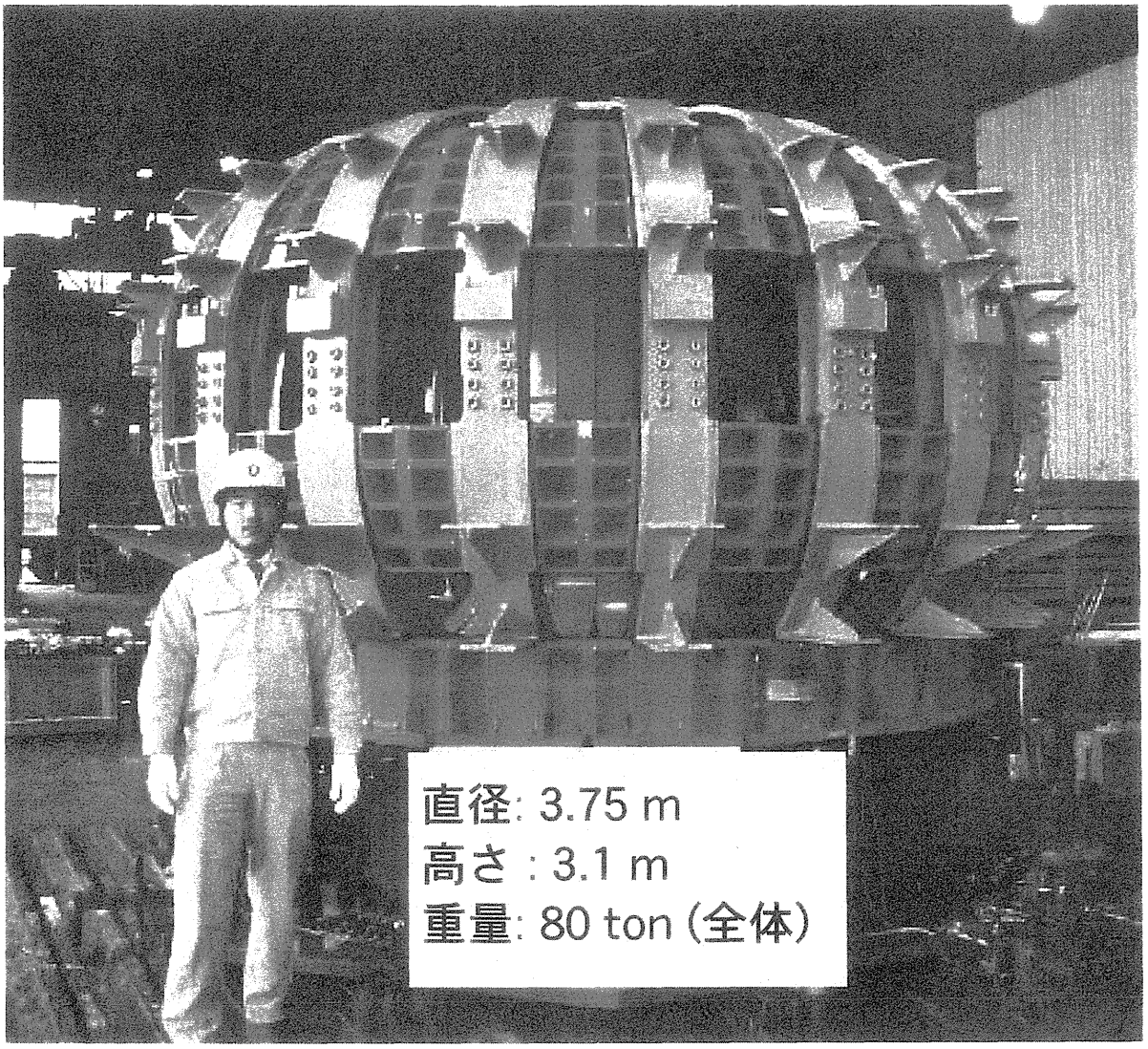


図 3-16 トカマク全体縮小試験体（コイル系のみ）

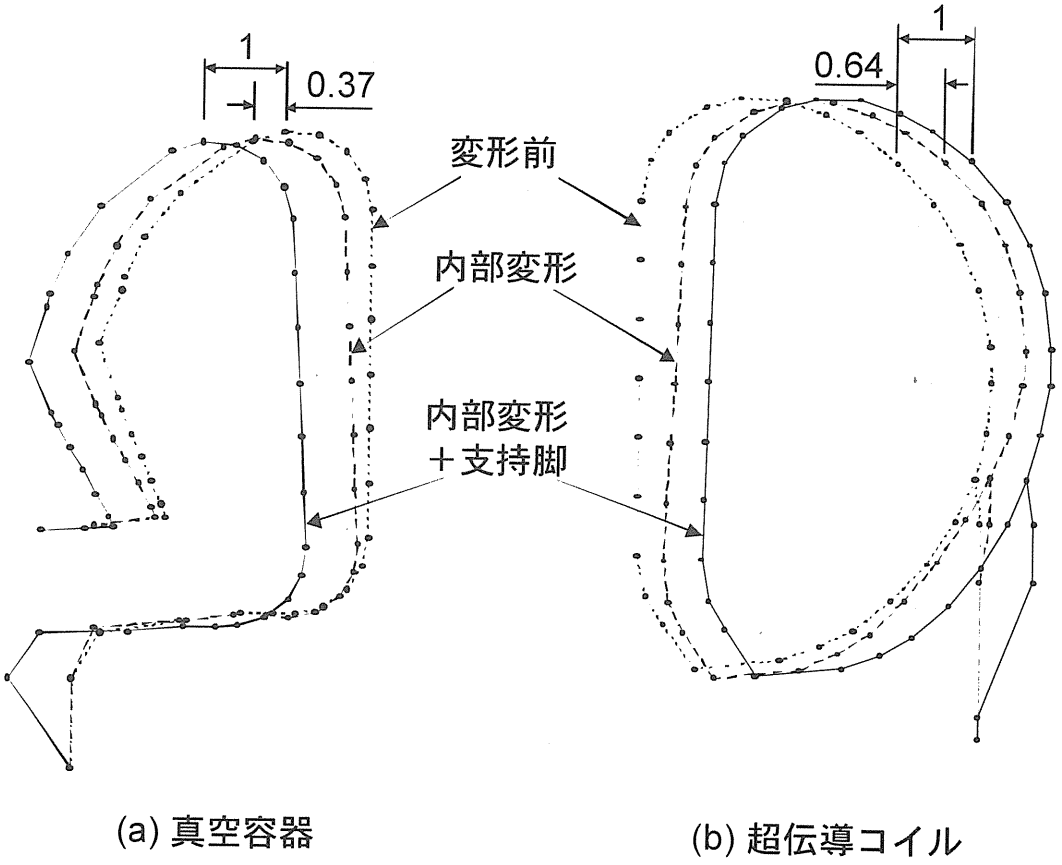


図 4-1　単位加速度による水平荷重に対するトカマクの変位

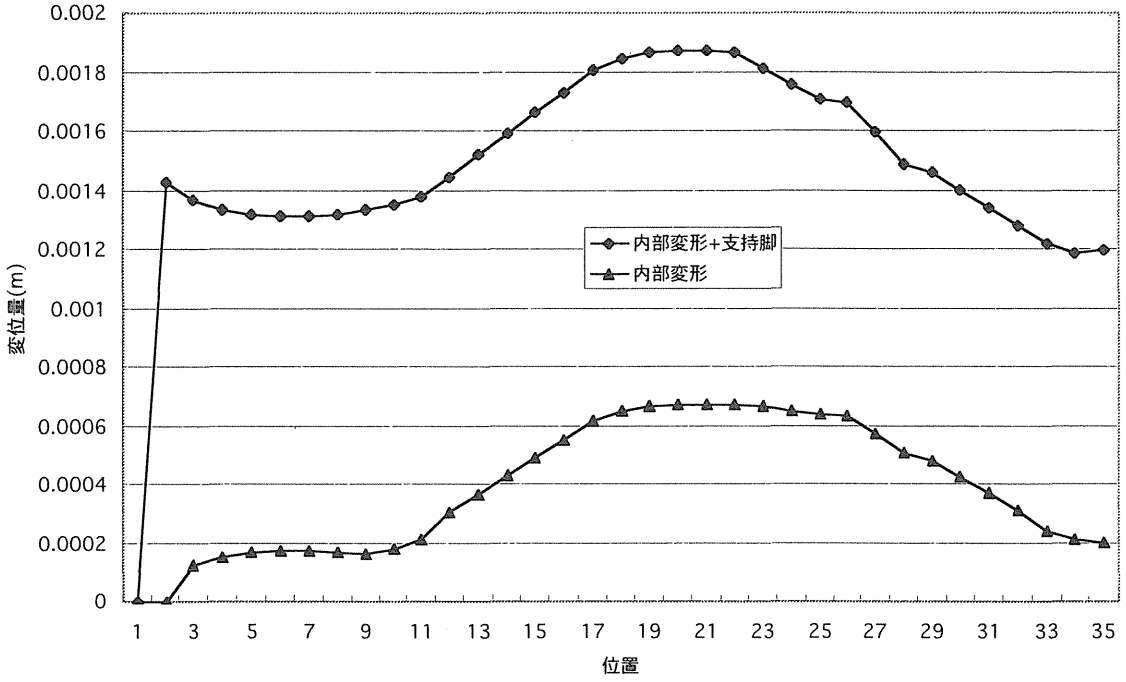


図 4-2 真空容器の変位量（ポロイダル断面）

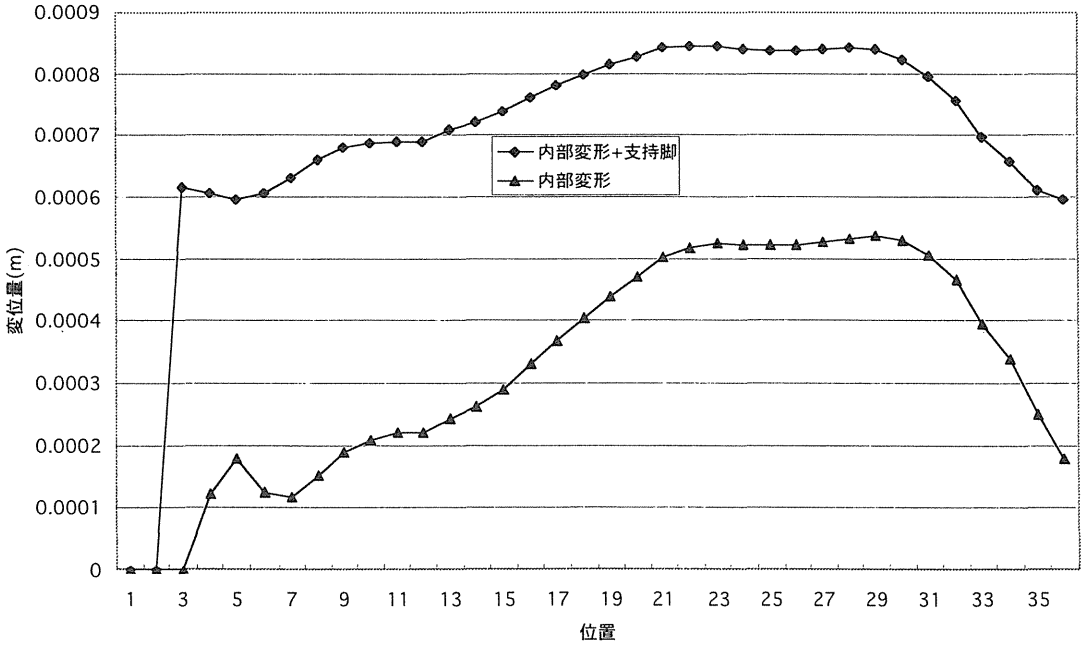


図 4-3 コイル系の変位量（ポロイダル断面）

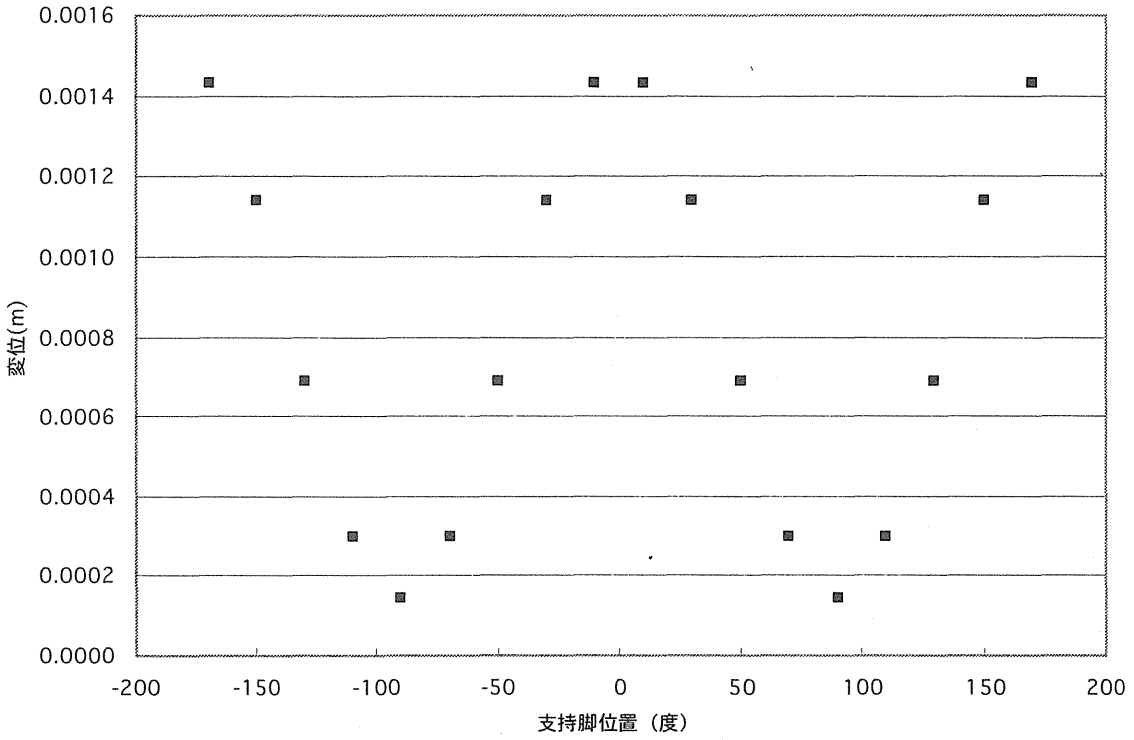


図 4-4　真空容器支持脚上端における変位

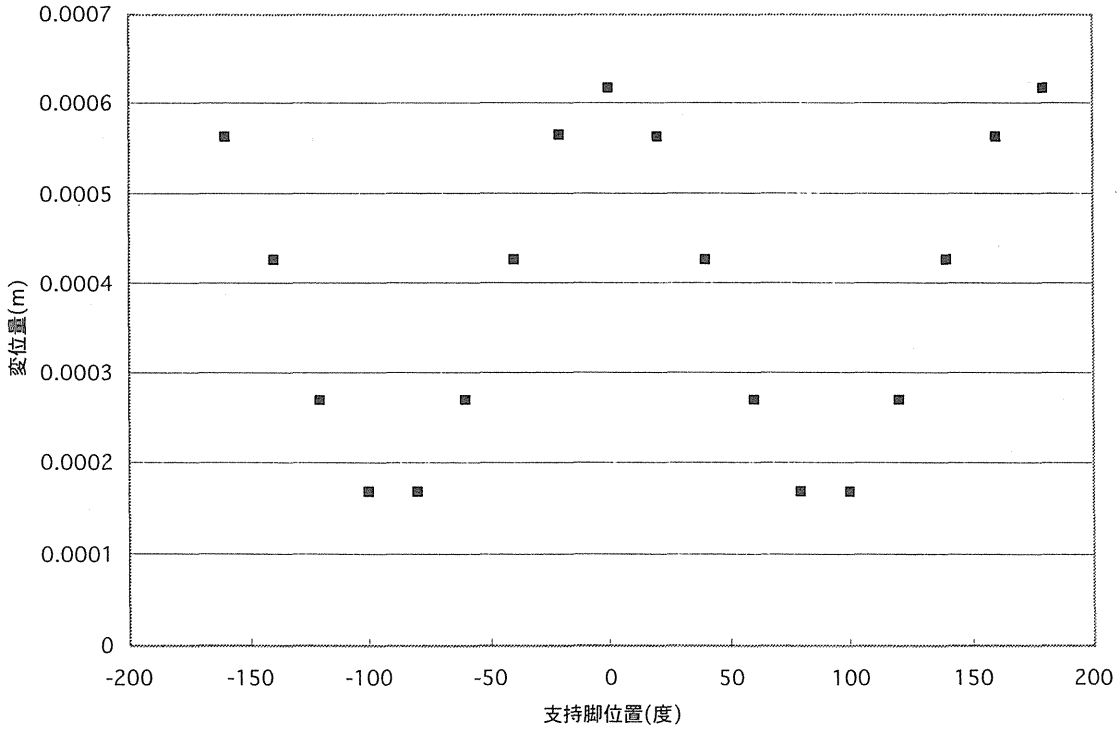


図 4-5　コイル系支持脚における変位

付録１ 支持脚が真空容器やコイル系の固有値および固有モードに与える影響

(Effect of Support Structures on Eigen Frequencies and Modes of Vacuum Vessel and TF-CS Coil System)

Table A-1 shows the eigen frequencies and modes of the vacuum vessel. In Table A-1, "Rigid Support Structure" means the results assuming infinite stiffness for the horizontal stiffness of the support structure, while "Normal Support Structure" uses the normal model with finite stiffness. The results using "Rigid Support Structure" show the eigen modes of the VV itself without the effect of the support structure. The effective stiffness k_{whole} and k_{VV} of whole system and the VV itself can be calculated from the frequencies f_{normal} and f_{rigid} of "Normal Support Structure" and "Rigid Support Structure", respectively, as follows:

$$k_{whole} = m_{effective}\,(2\pi f_{normal})^2$$

$$k_{VV} = m_{effective}\,(2\pi f_{rigid})^2$$

where is the effective stiffness regarding to the eigen mode. The effective stiffness $k_{support}$ of the support structure can be calculated as follows:

$$1/k_{support} = 1/k_{whole} - 1/k_{VV}$$

The contribution rate of the support structure on the effective stiffness of whole system can be defined as:

$$(1/k_{support})/(1/k_{whole})$$

The results are shown in Talbe A-1. For the horizontal modes, the contribution rate is highest comparing to other modes and the effect of the support structure is dominant because the rate is 62%. It also affects on the vertical mode with rather small contribution ratio, 44%. On the contrary, it does not affect on the oval mode of the VV upper half, because the lower half of the VV and the support structure does not move in this mode.

Table A-2 shows the eigen frequencies and modes of the TF-CS coil system. The effect of the support structure on the vibration of the whole system is estimated in the same manner as the VV. In Table A-2, "Out of Phase" means the TF coils and CS coil moves out of phase. The contribution rate is relatively low comparing to the VV. In the horizontal mode, the rate is 36% and even in the highest case, the rocking mode, it is 41%. This means the stiffness of the TF-CS coil system itself is comparable or relatively lower than that of the support structure.

From these results, it is found that the support structure strongly affects on the vibration of the component. Therefore, it is essentially important to investigate mechanical characteristics of the support structure for the seismic design.

Table A-1 Eigen Frequencies and Modes of Vacuum Vessel

Modes	Normal Support Structure		Rigid Support Structure		Contribution of Support Structure (%)
	Frequency (Hz)	Figure	Frequency (Hz)	Figure	
Horizontal	3.94	A-1	6.41	A-2	62
Vertical	6.96	A-3	9.30	A-4	44
Rotation	7.34	A-5	7.74	A-6	10
Rocking	9.52	A-7	10.6	A-8	19
Oval (Out of Phase between Upper and Lower Half)	15.3	A-9	-	-	-
Oval (Upper Half Only)	15.4	A-10	15.4	A-11	0

Table A-2 Eigen Frequencies and Modes of TF-CS Coil System

Modes	Normal Support Structure		Rigid Support Structure		Contribution of Support Structure (%)
	Frequency (Hz)	Figure	Frequency (Hz)	Figure	
Horizontal	5.40	A-12	6.74	A-13	36
Horizontal (Out of Phase)	9.70	A-14	9.78	A-15	1.6
Vertical	9.88	A-16	10.3	A-17	8.0
Rotation	11.4	A-18	12.5	A-19	17
Rocking	12.2	A-20	15.9	A-21	41
Rotation (Out of Phase)	16.4	A-22	16.5	A-23	1.2
Vertical (Out of Phase)	16.9	A-24	17.2	A-25	3.5
Rocking (Out of Phase)	18.2	A-26	19.7	A-27	15

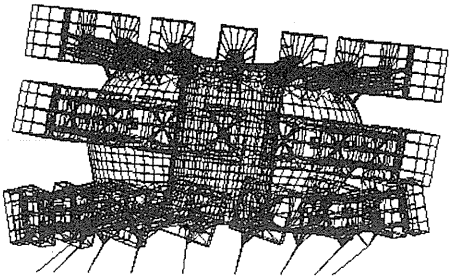


Fig. A-1 Horizontal Mode of Vacuum Vessel (Normal Support Structure)

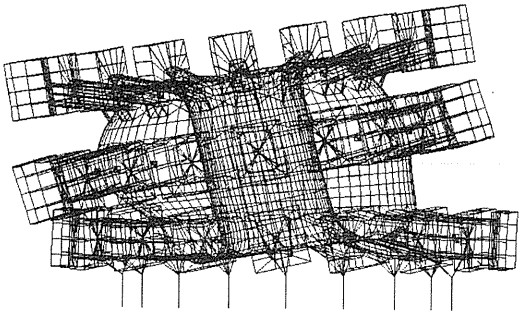


Fig. A-2 Horizontal Mode of Vacuum Vessel (Rigid Support Structure)

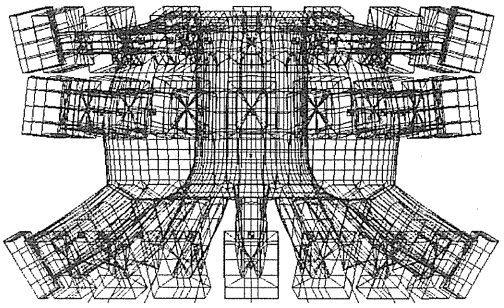


Fig. A-3 Vertical Mode of Vacuum Vessel (Normal Support Structure)

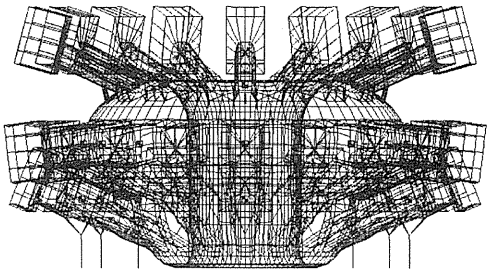


Fig. A-4 Vertical Mode of Vacuum Vessel (Rigid Support Structure)

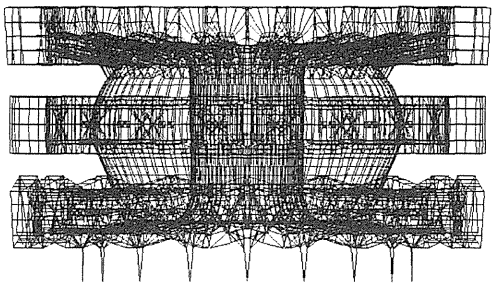


Fig. A-5 Rotation Mode of Vacuum Vessel (Normal Support Structure)

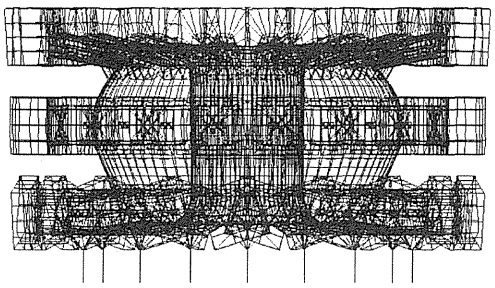


Fig. A-6 Rotation Mode of Vacuum Vessel (Rigid Support Structure)

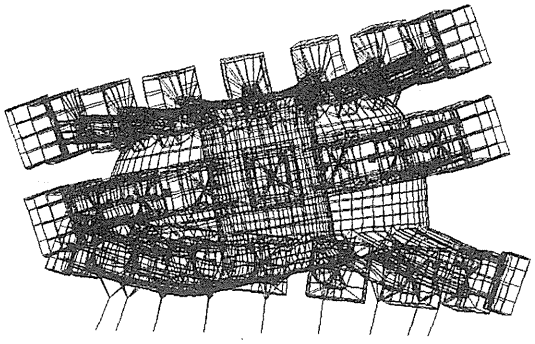


Fig. A-7 Rocking Mode of Vacuum Vessel (Normal Support Structure)

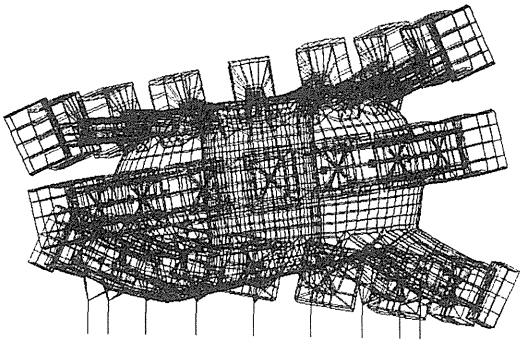


Fig. A-8 Rocking Mode of Vacuum Vessel (Rigid Support Structure)

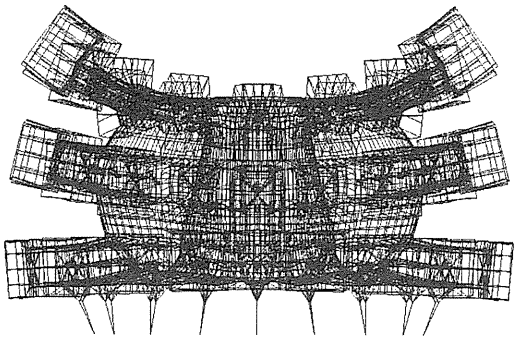


Fig. A-9 Oval Mode (Out of Phase between Upper and Lower Half) of Vacuum Vessel (Normal Support Structure)

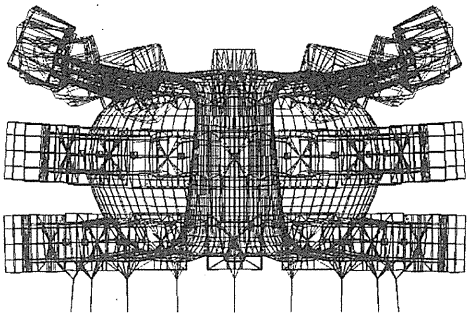


Fig. A-10 Oval Mode (Upper Half Only) of Vacuum Vessel (Normal Support Structure)

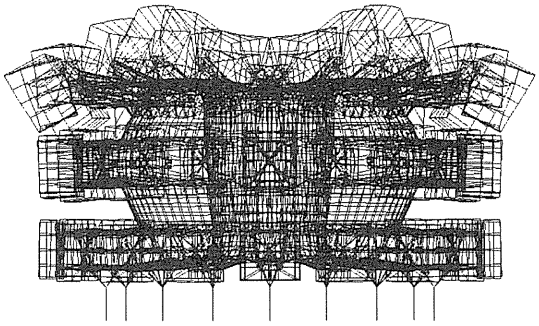


Fig. A-11 Oval Mode (Upper Half Only) of Vacuum Vessel (Rigid Support Structure)

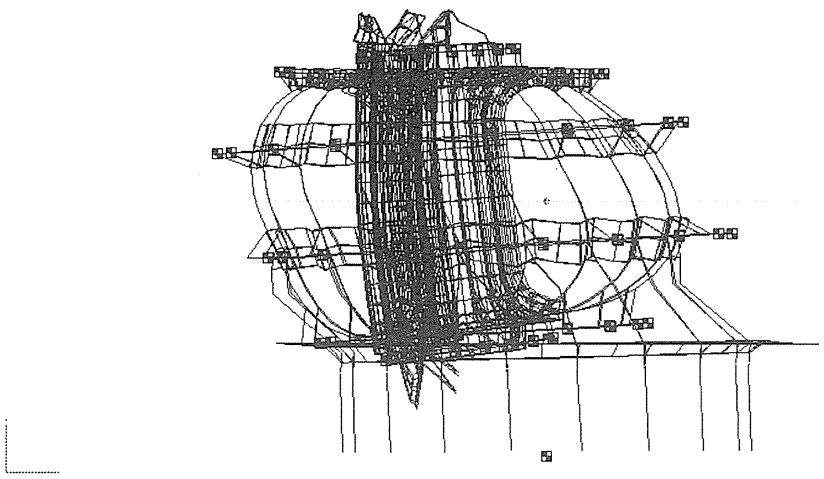


Fig. A-12 Horizontal Mode of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

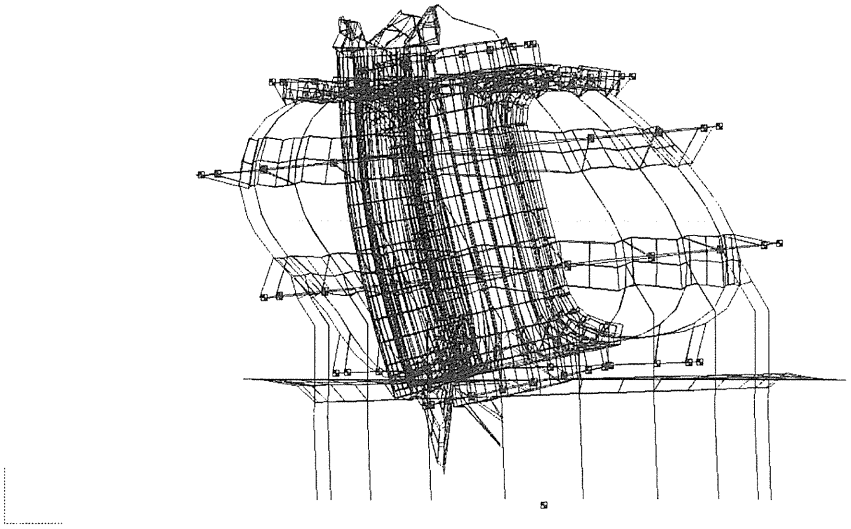


Fig. A-13 Horizontal Mode of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

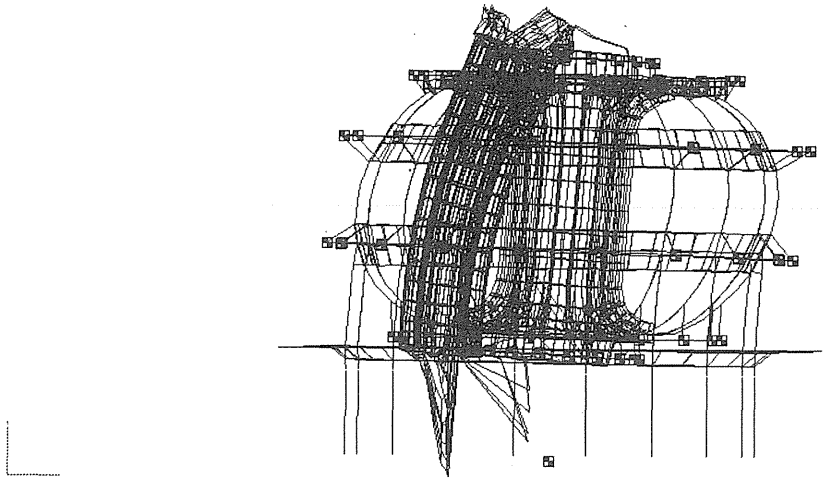


Fig. A-14 Horizontal (Out of Phase) Mode of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

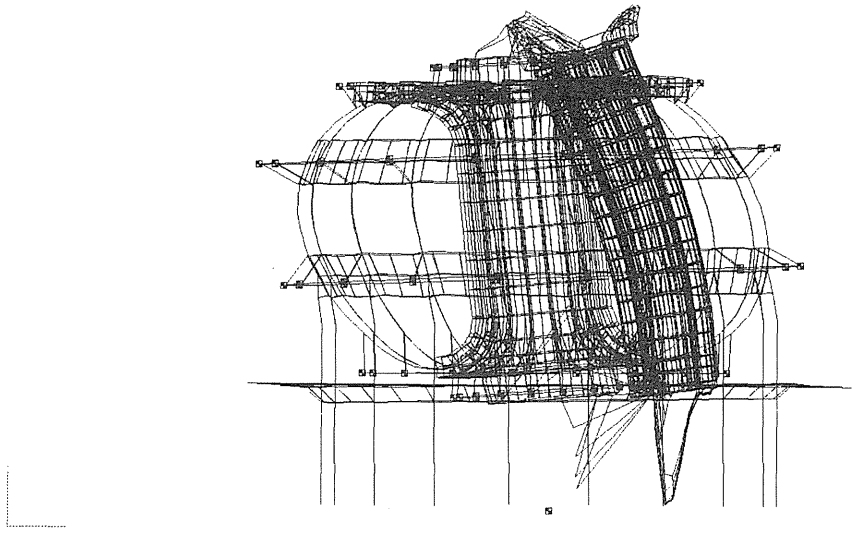


Fig. A-15 Horizontal (Out of Phase) Mode of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

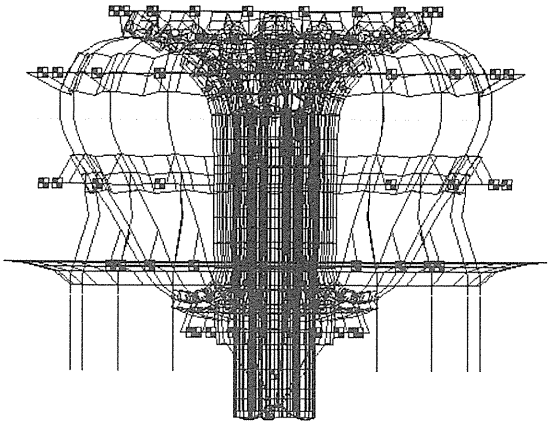


Fig. A-16 Vertical Mode of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

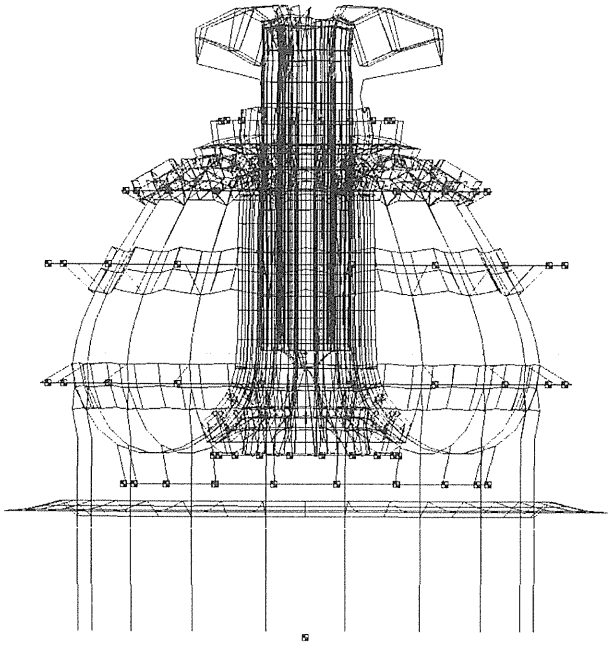


Fig. A-17 Vertical Mode of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

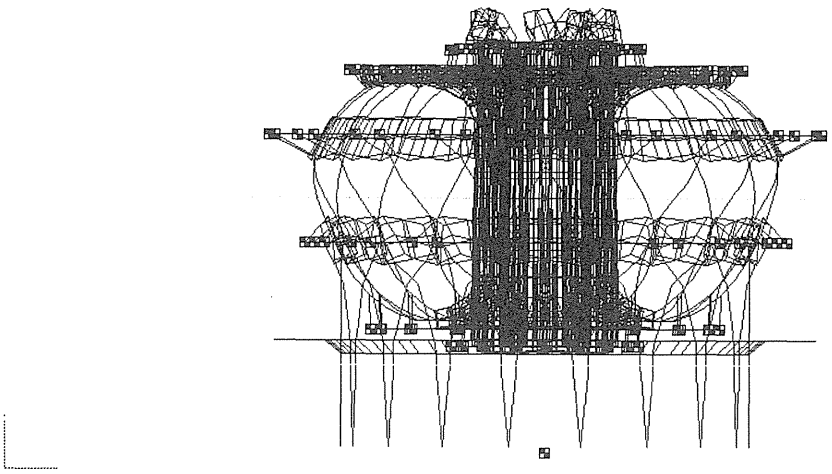


Fig. A-18 Rotation Mode of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

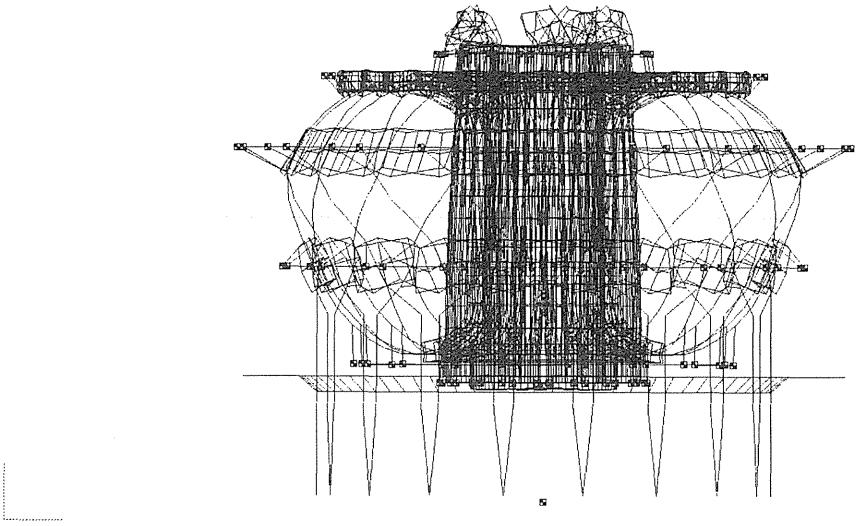


Fig. A-19 Rotation Mode of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

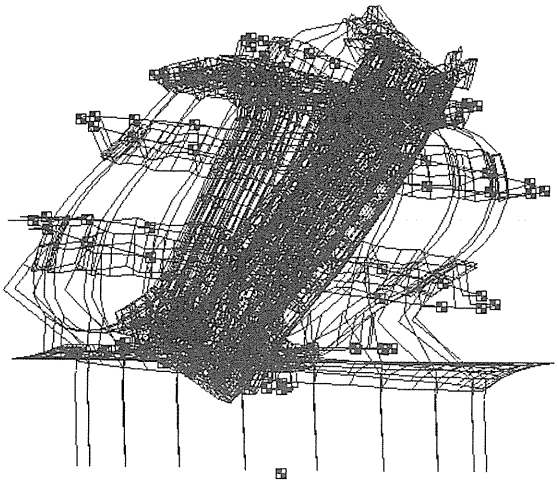


Fig. A-20 Rocking Mode of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

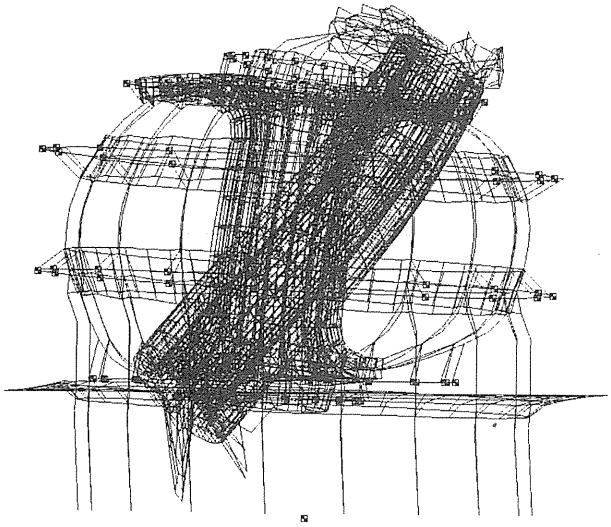


Fig. A-21 Rocking Mode of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

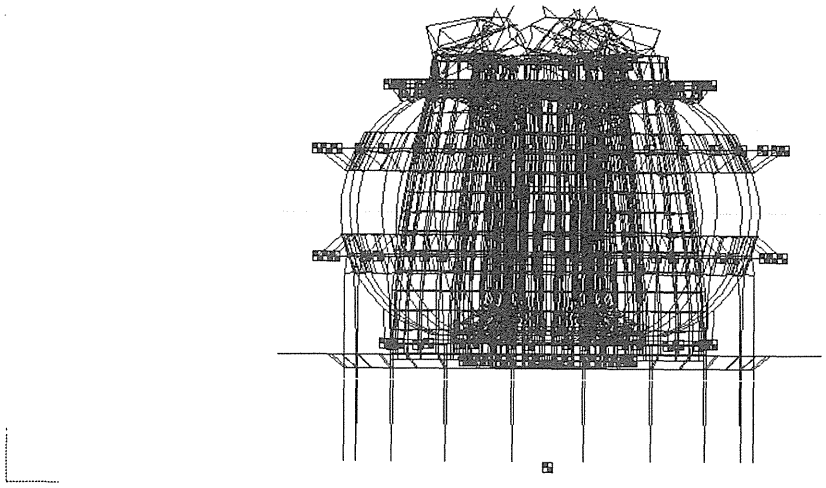


Fig. A-22 Rotation Mode (Out of Phase) of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

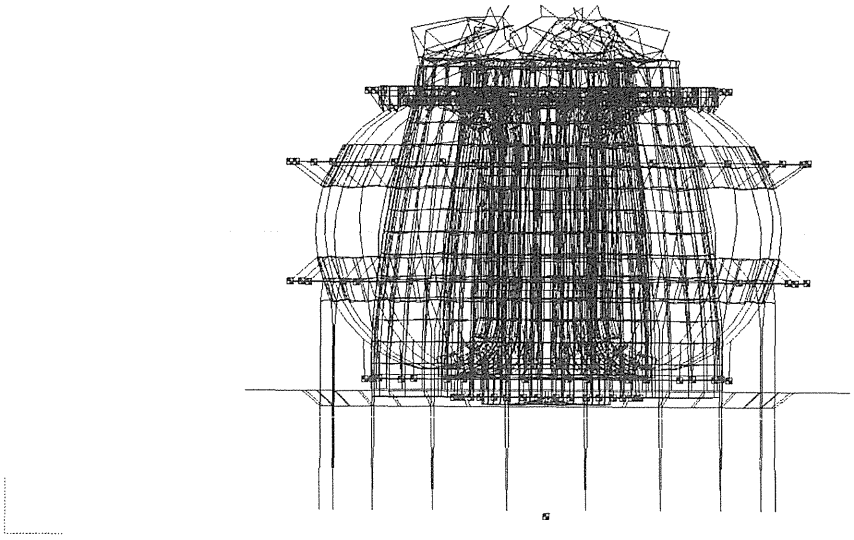


Fig. A-23 Rotation Mode (Out of Phase) of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

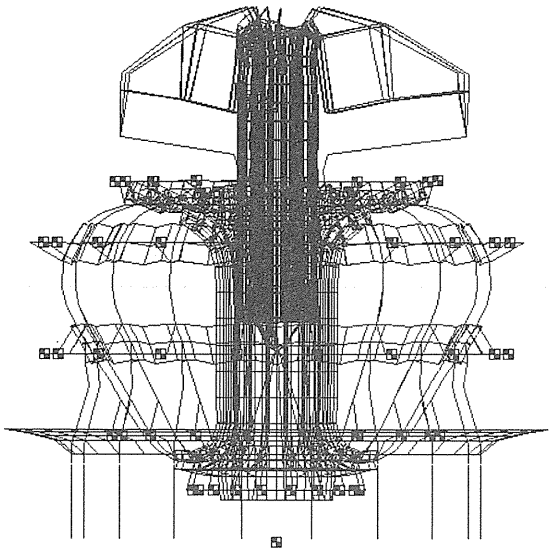


Fig. A-24 Vertical Mode (Out of Phase) of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

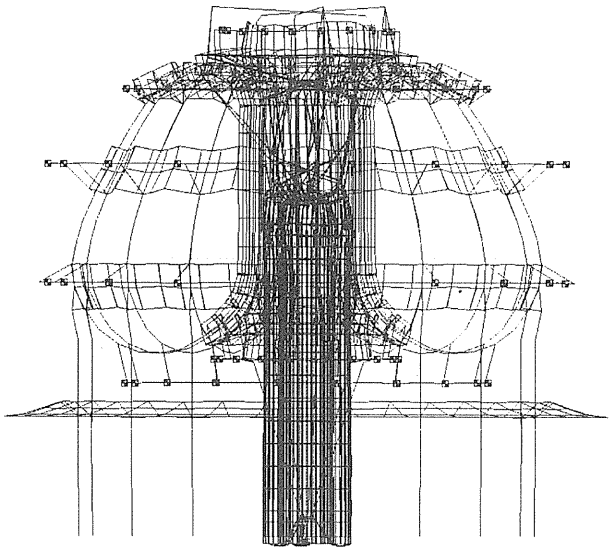


Fig. A-25 Vertical Mode (Out of Phase) of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

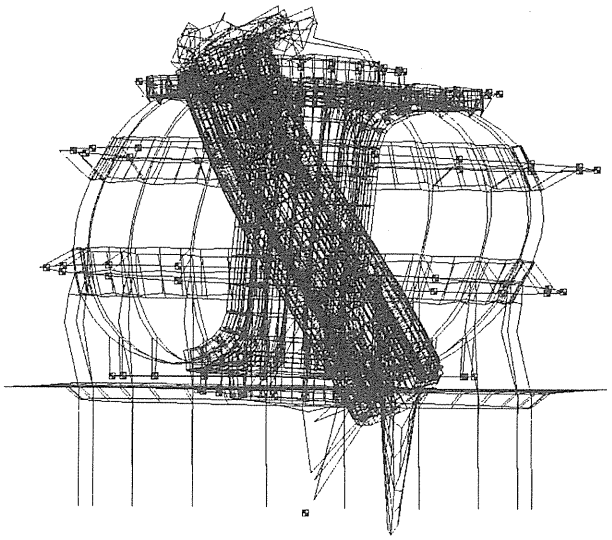


Fig. A-26 Rocking Mode (Out of Phase) of TF-CS Coil System (Normal Support Structure)

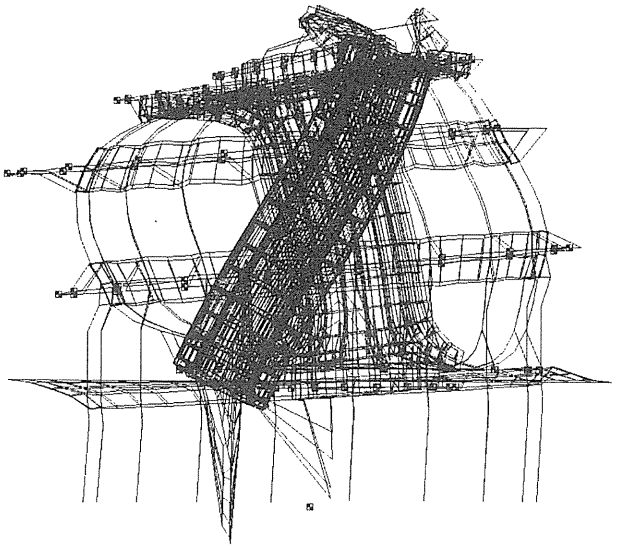


Fig. A-27 Rocking Mode (Out of Phase) of TF-CS Coil System (Rigid Support Structure)

付録２ITER の設計変更に伴う計画の見直しについて

(1)概要

本計画の策定後、ITER についてはコンパクト化のために設計の見直し作業が行われ、2001 年 7 月に最終設計書を報告、重量で約 1/2 に軽量化された。これに伴い、全体計画についても若干の見直しを行った。見直されたものは、既に製作が進んでいた全体縮小試験体のスケール則と、小規模試験体の位置付けのみであり、大きな変更はなかった。

(2) 全体縮小試験体のスケール則

見直しの際も、安全確証の面を考えて応力を 1 対 1 とすることとした。見直し前と同様に以下の式を用いる。

$\sigma = (2M\alpha/mn)(3h/awt)$

ただし、

M: 全体質量

α: 静荷重加速度

m: 支持脚あたり板ばね枚数

n: 支持脚数

h: 板ばね高さ

a: 板ばね上端幅

w: 板ばね平均幅

t: 板ばね厚さ

また、支持脚 1 体の強軸方向の剛性を k とすると、系の周期 T は、

$T=(nk/2M)1/2$

したがって、最大応力が 1/1 とするためには表 A-3 のようなスケール則が必要となり、地震波の加速度を 6.8 倍、時間を 1/4.9 倍すればよい。

(3) 小規模試験体の位置付け

小規模試験体は、当初計画でも設計変更があった場合にその影響を検証することを一つの目的としていたため、厳密には位置付けが変更されたわけではない。むしろ、設計変更の影響を検証するため、より重要度が増したと言える。見直された全体計画を図 A-28 に示す。小規模試験体の計画の中での位置付けはより鮮明になっている。設計変更による影響のうち、小規模試験体で明らかにすべき点は以下の２点である。

・ 支持脚の構造の相違（当初案：ボルト締結、現行案：溶接構造）
・ 支持脚の本数の相違（当初案：２０本、現行案：１８本）

後者については、直接的に本数を模擬するわけではなく、例えば、４本と８本の振動特性を比較し、特性がスケール可能であることを確認することによって検証するものとする。

表 A-3　見直されたスケール則

	応力	質量	板ばね枚数	支持脚数	板ばね高さ	板ばね上端幅	板ばね平均幅	板ばね厚さ	支持脚剛性	加速度	時間
従来のスケール則	1/1	1/512	1/1	1/1	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	8	1/8
現設計実機	—	5853 ton	21	18	2250mm	1035mm	1267.5mm	30mm	22.1GN/m	—	—
試験体	—	30 ton	20	20	460mm	212.5mm	212.5mm	6mm	2.48GN/m	—	—
新たなスケール則	1/1	1/195.1	20/21	10/9	1/4.9	1/4.9	1/6.0	1/5	1/8.9	6.8	1/4.9

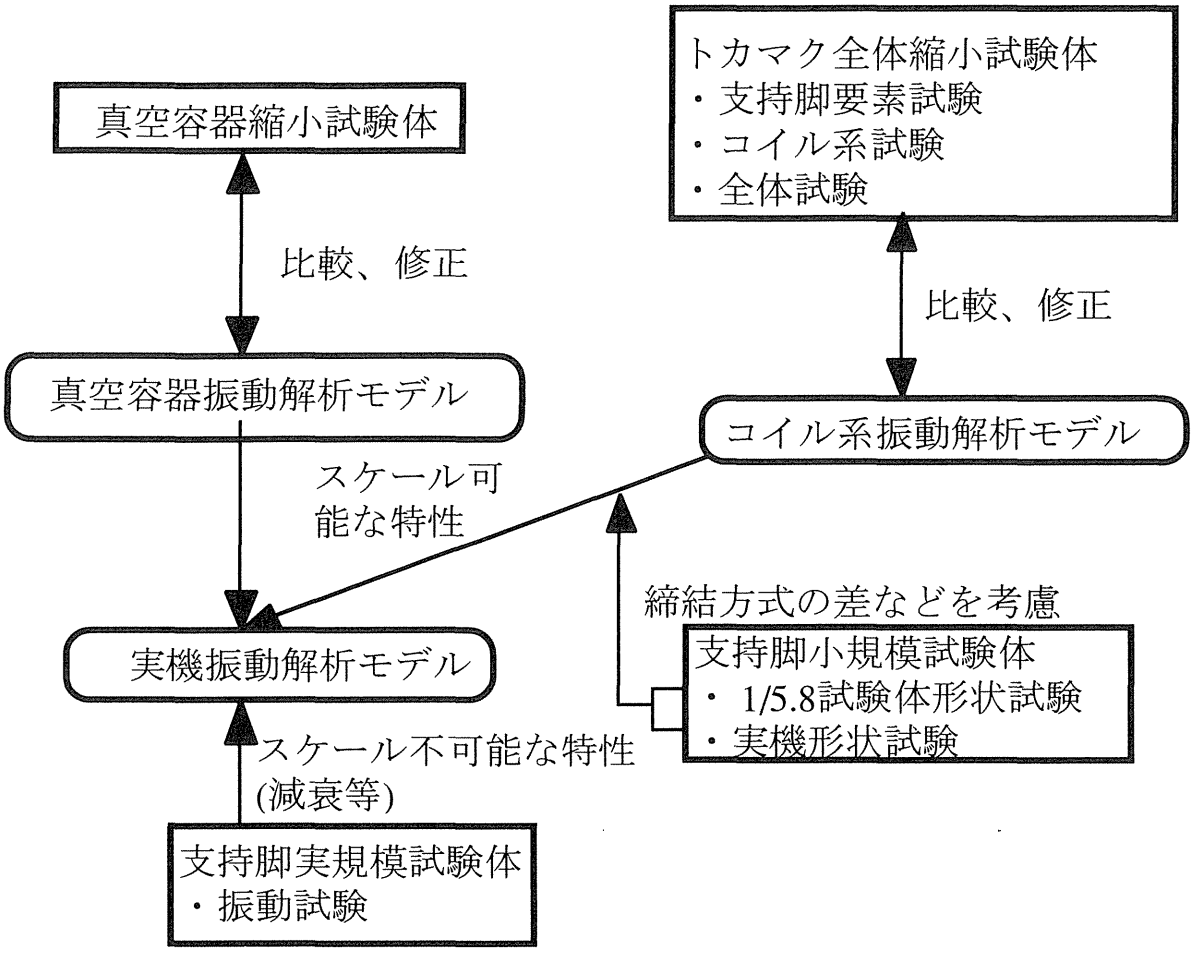


図 A-28 見直された全体計画

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表 1　SI基本単位および補助単位

量	名　称	記　号
長　さ	メートル	m
質　量	キログラム	kg
時　間	秒	s
電　流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光　度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表 2　SIと併用される単位

名　称	記　号
分，時，日	min，h，d
度，分，秒	°，′，″
リットル	l，L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10^{-19} J

1 u=1.66054×10^{-27} kg

表 5　SI接頭語

倍数	接頭語	記　号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表 3　固有の名称をもつSI組立単位

量	名　称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	m·kg/s^2
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N·m
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	A·s
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表 4　SIと共に暫定的に維持される単位

名　称	記　号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å= 0.1 nm=10^{-10} m

1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2

1 bar=0.1 MPa=10^5 Pa

1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2

1 Ci=3.7×10^{10} Bq

1 R=2.58×10^{-4} C/kg

1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy

1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv

（注）

1. 表1－5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局 1985年刊行による。ただし，1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
2. 表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
3. barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
4. EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換　算　表

力	N(=10^5dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘　度　1 Pa·s(N·s/m^2)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　1 m^2/s=10^4St(ストークス)(cm^2/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10^7erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal = 4.18605 J（計量法）

= 4.184 J　（熱化学）

= 4.1855 J　（15 °C）

= 4.1868 J（国際蒸気表）

仕事率　1 PS（仏馬力）

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

（86年12月26日現在）

ITERトカマクの耐震性評価に関わる振動試験計画

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています