

分置
----

# 高速炉安全特性研究のための「常陽」炉心支持板変形解析

1996年9月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 高速炉安全特性研究のための「常陽」炉心支持板変形解析

鈴木俊宏\*、市毛 聡\*

鈴木惣十\*、菅谷和司\*\*

## 要 旨

高速炉の安全特性の内、炉心の基本的特性である反応度係数に影響を及ぼす因子として、炉心構造物の機械的変形による流量特性の変化によるものが想定される。高速実験炉「常陽」は流量一定で運転するため、この影響は殆ど考慮する必要がない。しかし、「常陽」の定格運転時と、停止時の冷却材流体圧力差によって生じる原子炉容器内炉心支持板の変位量を求め、高速炉の反応度係数の検討に資することは非常に有効となる。従って、この変位量を求めるため、汎用非線形構造解析コード "FINAS" を用いて変形解析を行った。

2次元軸対称モデルによって、炉容器コアサポートと炉内構造物との接合点の変位量を求め、これを境界条件として、炉心支持板を含む炉内構造物の3次元60°セクタモデルを作成し変位量を求めた。

この結果、炉内構造物中の上部炉心支持板は、炉内構造物下部のリブの効果によって炉心中心部の変位が抑制されるものの、炉心中心位置で約0.39mm、第5列で最大変位量の約0.43mmと僅かに上方に変位することが分かった。「常陽」では、流量を変化させる運転方法をとっていないため、定格運転中にこれらの変形を生じることはないが、この変位によって相対的に制御棒が挿入されたと仮定した場合の反応度変化量は、数 $\phi$ 程度（定格運転時、全制御棒が均等挿入されているとした場合）となる。

\* 大洗工学センター 実験炉部 技術課

\*\* 原子力システム株式会社

The deformation analysis of JOYO core support-plate for the fast  
reactor safety characteristic research

Toshihiro SUZUKI\*, Satoshi ICHIGE\*

Soju SUZUKI\*, Kazuji SUGAYA\*\*

ABSTRACT

As the factor which affects the reactivity coefficient, there is a thing by the change of the flow characteristic of the core internal structure by the mechanical deformation. This displacement of core support-plate in the JOYO reactor vessel was analyzed by using "FINAS" (Finite Element Nonlinear Structural Analysis System). This displacement is a result of the coolant loading difference between the shutdown and full operational primary flow rates.

The displacement of core support-plate in the JOYO reactor vessel was analyzed by using "FINAS" (Finite Element Nonlinear Structural Analysis System). This displacement is a result of the coolant loading difference between the shutdown and full operational primary flow rates.

At first, the deformation of the core support was required according to the two-dimensional axisymmetric model. These displacements were used as input in the three-dimensional models of excluding the support rib.

As a result, the displacement of the upper core support-plate would be about +0.39mm in the center and the maximum would be about +0.43mm in the fifth row. Because of the displacement of the support-plate was suppressed by the support rib.

The whole core support structure was displaced in the upward direction. And, core support-plate of the upper and lower was spread largest about 0.03mm in the tenth row by the high-pressure plenum coolant loading.

---

\* Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC

\*\* Nuclear Energy System Inc.

## 目次

1. 緒言 .....	1
2. 解析手順 .....	2
3. 解析モデル .....	3
3.1 2次元軸対称モデル .....	3
3.2 3次元モデル .....	4
3.2.1 リブを考慮しないモデル .....	4
3.2.2 リブを考慮するモデル .....	5
4. 解析結果 .....	9
4.1 2次元軸対称モデル .....	9
4.2 3次元モデル .....	9
4.2.1 リブを考慮しない場合 .....	9
4.2.2 リブを考慮する場合 .....	9
4.3 まとめ .....	10
5. 結言 .....	18
6. 参考文献 .....	19

## 図リスト

図 2. 1	解析対象部位概略図	2
図 3. 1	原子炉容器とコアサポートの 2 次元軸対称モデル	6
図 3. 2	リブなし炉内構造物と炉心支持板の 3 次元モデル	7
図 3. 3	リブ付き炉内構造物と炉心支持板の 3 次元モデル	8
図 4. 1	原子炉容器とコアサポートの変位図	11
図 4. 2	リブなし炉内構造物と炉心支持板の変位図	12
図 4. 3	リブなしモデルの各集合体列における炉心支持板変位量	13
図 4. 4	リブ付き炉内構造物と炉心支持板の変位図	14
図 4. 5	リブ付きモデルの各集合体列における炉心支持板変位量	15
図 4. 6	リブ付き炉内構造物底板の変位図	16
図 4. 7	リブなしモデルとリブ付きモデルの 各集合体列における炉心支持板変位量の比較	17

## 1. 緒 言

高速炉の安全特性の内、炉心の重要な基本的特性である反応度係数に影響を及ぼす因子として、炉心構造物の機械的変形による流量特性の変化によるものが想定される。本報告は、従来具体的に把握していなかった、高速実験炉「常陽」における1次主循環流量が、停止している場合と定格流量で流れている場合の流体圧力差によって生じる原子炉容器内炉心支持板の変位量を求めるため、汎用非線形構造解析コード“FINAS”を用いて変形解析を行ったものである。

## 2. 解析手順

炉心支持板の変位量を求めるためには、流体圧力によって変位する原子炉容器、コアサポートおよび炉内構造物の変位量を考慮する必要がある。そこで、本解析では、以下の手順で炉心支持板の変形解析を行った。図2.1に、解析対象部位の概略を示す。

- (1) 原子炉容器およびコアサポートの2次元軸対称モデルで変形解析を行い、炉内構造物との接合部となる上フランジの変位および傾きを求める。
- (2) (1)で求めた炉内構造物との接合点の変位量を変位境界条件として、炉内構造物および炉心支持板の3次元60°セクターモデルで炉心支持板の変形解析を行う。

なお、(2)の解析では、炉内構造物の底板より下に位置するリブの効果を評価するため、リブなしとリブ付きの2種類のモデルで解析を行った。

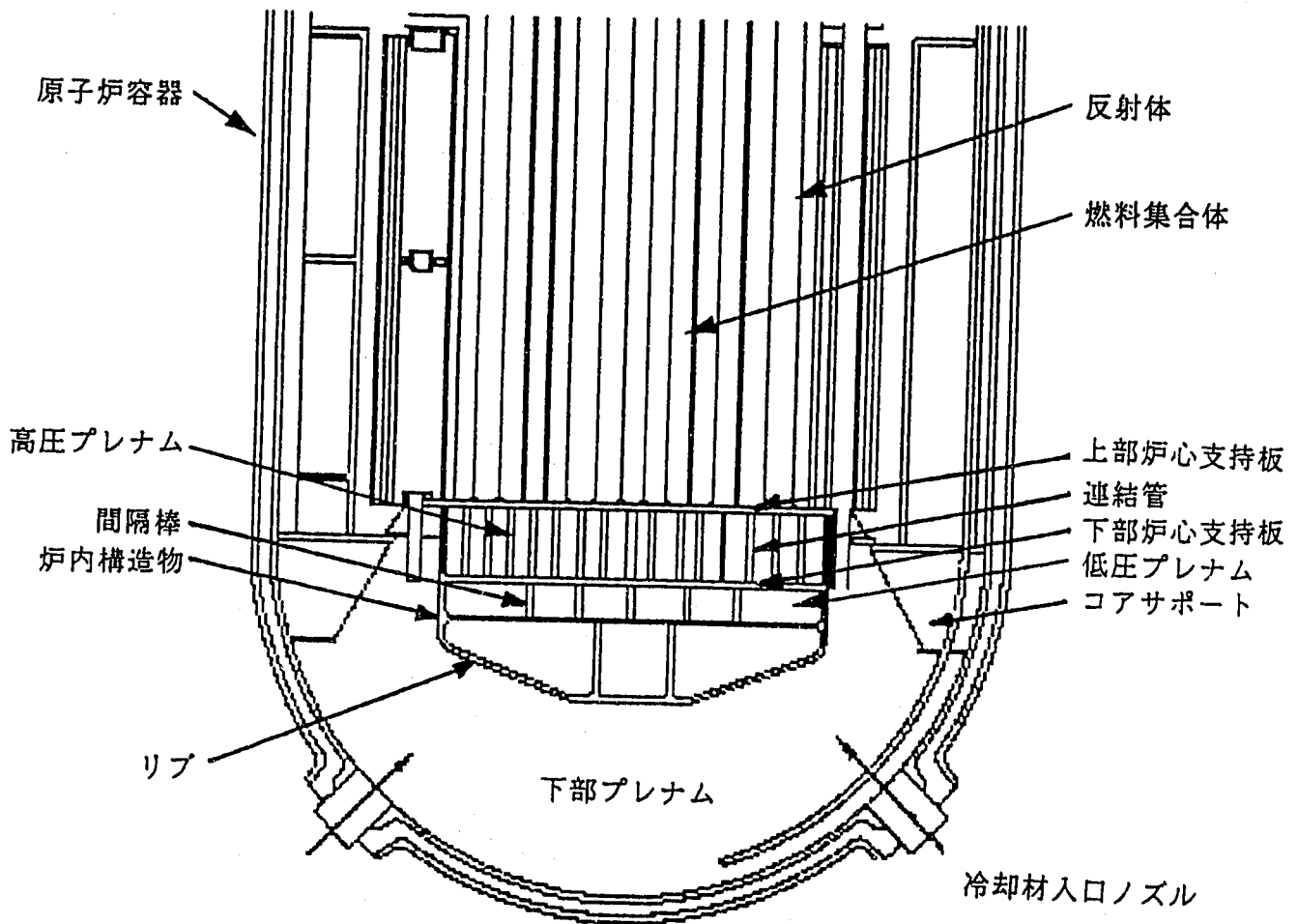


図2.1 解析対象部位概略図



### 3. 解析モデル

本解析では、3次元モデルの入力境界条件を求めるための原子炉容器とコアサポートの2次元軸対称モデルと、炉内構造物と炉心支持板の3次元モデルとして、炉内構造物底板より下側に位置するリブのないものと、リブのある2種類のモデルを作成した。

#### 3.1 2次元軸対称モデル

##### (1) 対象部位

図3.1にモデル図を示す。

本モデルは、原子炉容器、リークジャケット、耐震振れ止め、コアサポートおよびコアサポート間の補強ウェブからなり、補強ウェブを除く各部分は、3節点三角形軸対称要素TAX3および4節点四辺形軸対称要素QAX4を用いているが、補強ウェブについては、軸対称要素では周方向の剛性が強くなりすぎるため、4節点四辺形平面応力要素QMEM4を使用することにより、補強ウェブの周方向の剛性が実機と等価となるようにした。

なお、本モデルは「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係る機器・配管構造健全性評価<sup>(2)</sup>に用いたものである。

##### (2) 境界条件

- ① 原子炉容器下端およびリークジャケット下端は、R方向拘束とした。
- ② 原子炉容器上端およびリークジャケット上端は、Z方向拘束とした。
- ③ 耐震振れ止め下端面は、面を構成する全ての節点のZ方向の変位量が等しくなるように、Z方向の移動を等しくした。

##### (3) 荷重条件

原子炉容器下端からコアサポートの上フランジ側面までの範囲に下部プレナムに作用するNa圧力 $3.24 \text{ kg/cm}^2$ を与えた。なお、本解析は流体圧力による変位量を求める解析であるので、自重および集合体重量は無視した。

##### (4) 材料特性

材料特性は、 $250^\circ\text{C}$ のSUS304とし、「ナトリウム技術実用物性値表」<sup>(3)</sup>から縦弾性係数 $1.84 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、ポアソン比0.31の値を使用した。

## 3.2 3次元モデル

### 3.2.1 リブを考慮しないモデル

#### (1) 対象部位

図3.2にモデル図を示す。

モデルは、上下炉心支持板、底板より下に位置するリブを除く炉内構造物、連結管の一部および間隔棒からなり、構造物の対称性から3次元の60°セクターモデルとし、4節点四辺形シェル要素QFLA4Rおよび3節点三角形平板シェル要素TFLA3を使用した。

「常陽」の連結管は、引張管と圧縮管の2種類がある。引張管は、上下の炉心支持板をサンドイッチする取り付け構造となっており、上下の支持板が押し広げられるのを抑える働きがある。圧縮管は、上下の炉心支持板に挟まれる構造となっており、上下支持板間の収縮を抑える構造となっている。本解析では、低圧および上部プレナムの圧力より相対的に大きい高圧プレナムの圧力によって、上下の炉心支持板を押し広げる力が働くことから、それを抑制する引張管のみをモデル化した。ただし、モデル化した連結管は、引張と圧縮の両方が考慮される。また、連結管のナトリウム流入孔については、流入孔があるものとないもののバネ定数はほとんど変わらないことから、その影響は無視した。

#### (2) 境界条件

- ① 炉内構造物底板の中心は、Z方向以外の移動および全方向の回転を固定とした。
- ② 扇形の弦の部分は、 $\theta$ 方向の移動およびRとZ方向の回転を固定とした。
- ③ コアサポートの変位および傾きを考慮するため、下フランジの外側先端と一列内側の節点に対し、原子炉容器とコアサポートの2次元軸対称モデルの解析で得られたRおよびZ方向の変位量を与えた上で、固定とした。
- ④ 炉心支持板の外周部は、実機では炉心バレルと炉内構造物の突起部で挟み込む構造となっているが、本モデルでは、炉心支持板と同じ高さに炉内構造物に突起部を設け、突起部先端と支持板先端のZ方向の移動を等しくした。

#### (3) 荷重条件

下部プレナムには、2次元軸対称モデルと同様に $3.24 \text{ kg/cm}^2$ 、高圧プレナムに $3.14 \text{ kg/cm}^2$ および低圧プレナムに $0.347 \text{ kg/cm}^2$ と、それぞれの部位に作用するNaの圧力を与えた。なお、自重および集合体重量は考慮していない。

#### (4) 材料特性

3.1項と同様に、縦弾性係数 $1.84 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、ポアソン比0.31の値を使用した。

#### 3.2.2 リブを考慮するモデル

##### (1) 対象部位

図3.3にモデル図を示す。

モデルは、3.2.1項の3次元モデルにリブのモデル化を追加したもので、上下炉心支持板、底板より下に位置するリブを含む炉内構造物、連結管の一部および間隔棒からなり、構造物の対称性から3次元 $60^\circ$ セクターモデルとし、4節点四辺形シェル要素QFLA4Rおよび3節点三角形平板シェル要素TFLA3を使用した。

##### (2) 境界条件

- ① 炉内構造物底板の中心は、Z方向以外の移動および全方向の回転を固定とした。
- ② 追加したリブを含め扇形の弦の部分は、 $\theta$ 方向の移動およびRとZ方向の回転を固定とした。
- ③ コアサポートの変位および傾きを考慮するため、下フランジの外側先端と一列内側の節点に対し、原子炉容器・コアサポートの2次元軸対称モデルでの解析で得られたRおよびZ方向の変位量を与えた上で、全方向の移動およびRとZの回転を固定とした。
- ④ 炉心支持板の外周部先端は、リブなしモデルと同様に、炉内構造物の突起部先端に対して、Z方向の移動を等しくした。

##### (3) 荷重条件

3.2.1項と同様に、下部プレナムに $3.24 \text{ kg/cm}^2$ 、高圧プレナムに $3.14 \text{ kg/cm}^2$ および低圧プレナムに $0.347 \text{ kg/cm}^2$ の圧力を与え、自重および集合体重量は考慮しない。

##### (4) 材料特性

3.1項と同様に、縦弾性係数 $1.84 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、ポアソン比0.31の値を使用した。

FINAS

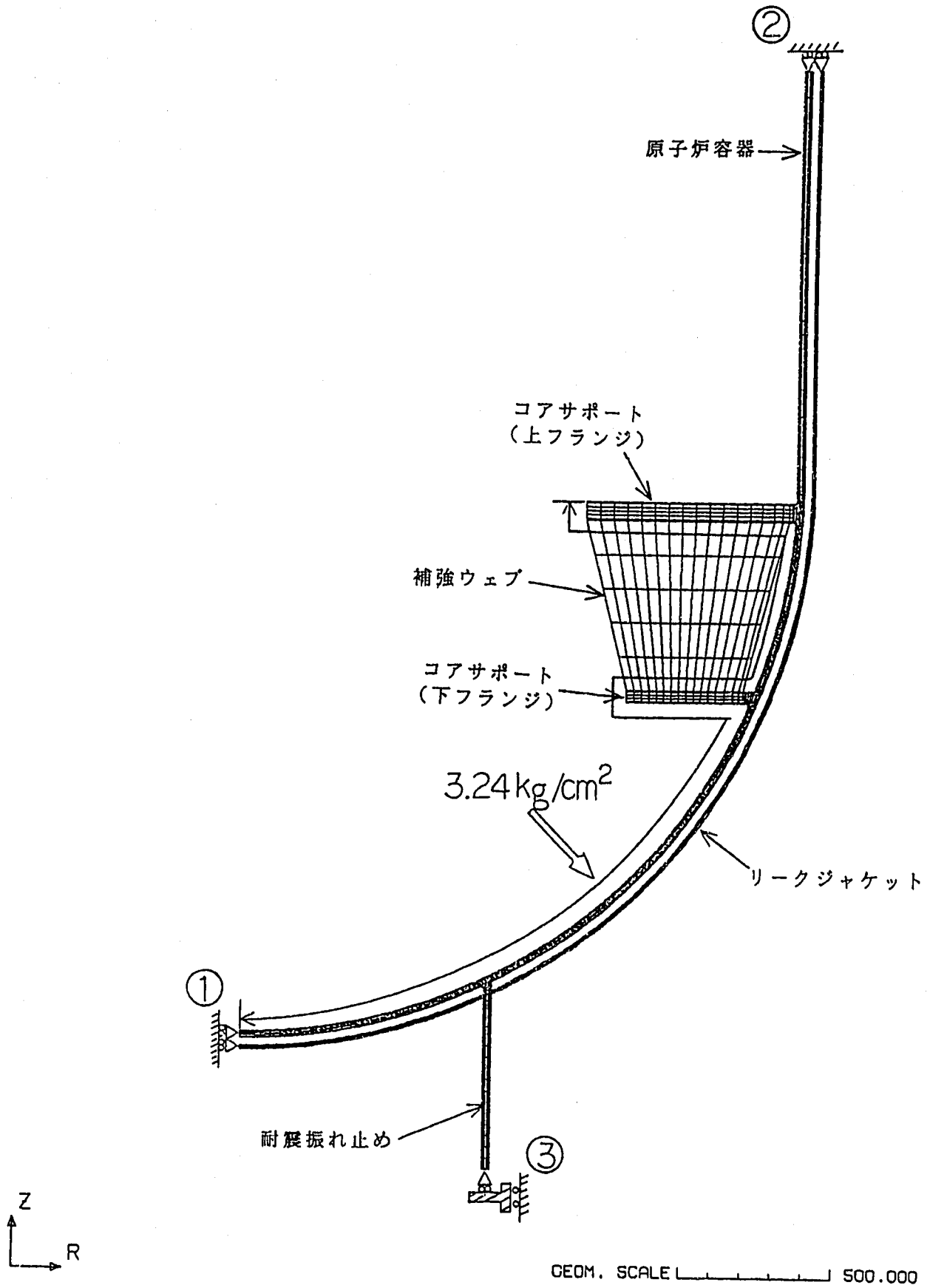


図3.1 原子炉容器とコアサポートの2次元軸対称モデル

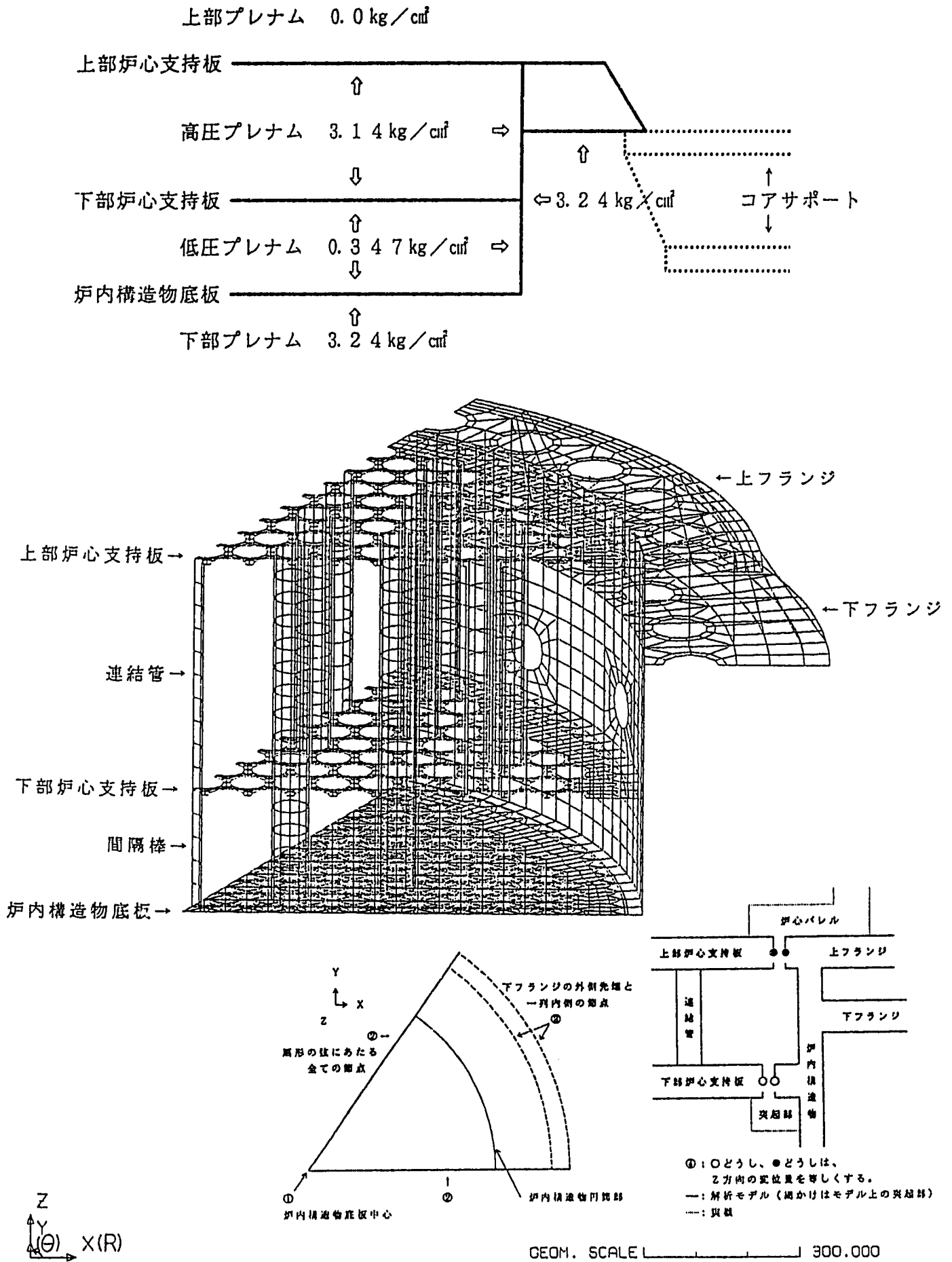
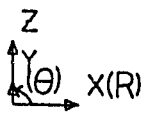
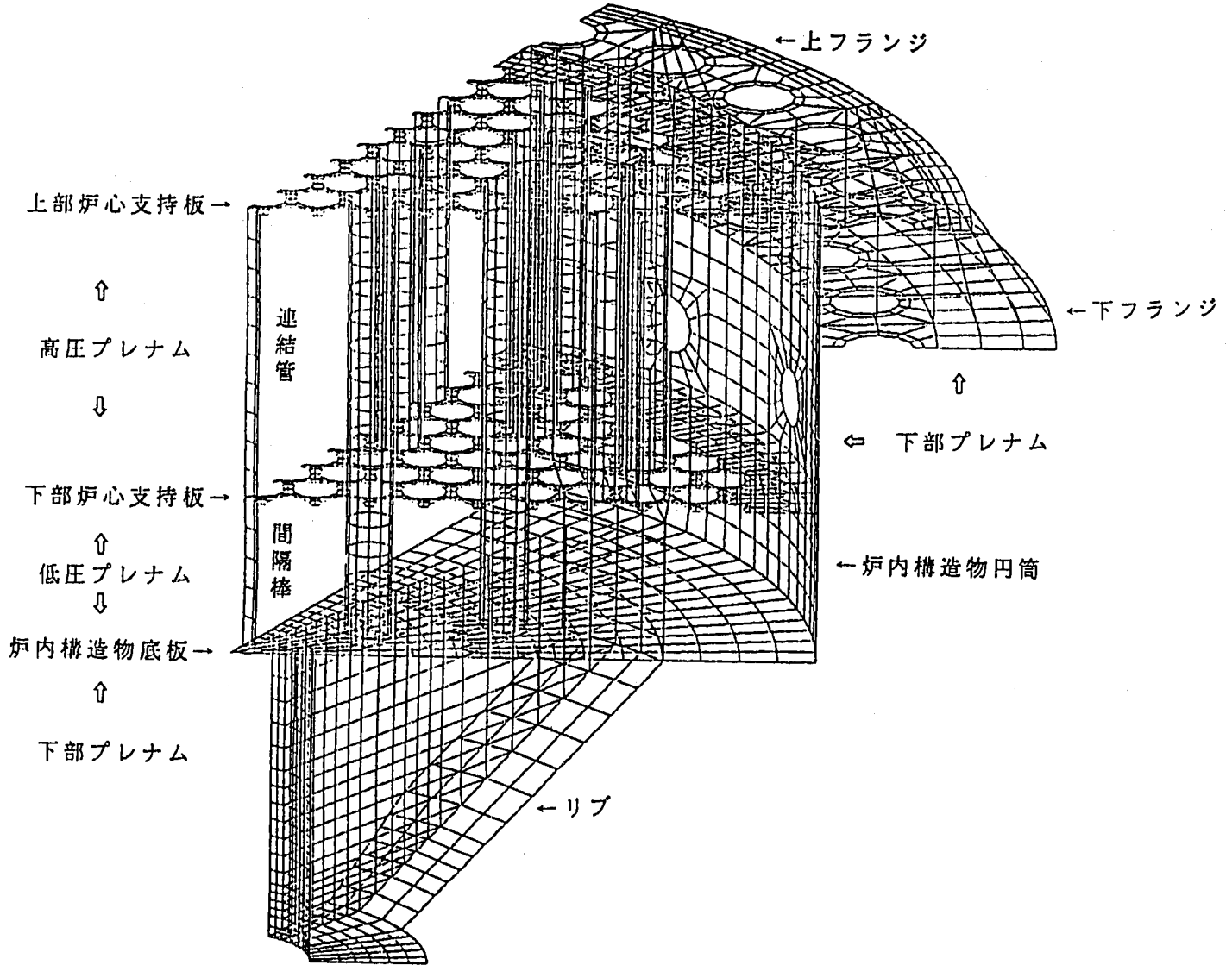


図3.2 リブなし炉内構造物と炉心支持板の3次元モデル

FINAS



GEOM. SCALE 1 \_\_\_\_\_ 300.000

図3.3 リブ付き炉内構造物と炉心支持板の3次元モデル

## 4. 解析結果

それぞれのモデルでの解析結果を以下に示す。

### 4.1 2次元軸対称モデル

図4.1に、原子炉容器とコアサポートの変位図を示す。

下部プレナム内面に与えた圧力により、原子炉容器のコアサポート上フランジ接合部から下の部分に変形し、コアサポートは、原子炉容器側から中心に向かって高くなるように傾斜している。その変位量は、炉内構造物との接合点で上方向に約0.07mm、原子炉容器側の上フランジ付け根部で下方向に約0.03mmであり、その変位差は約0.10mm程度であることから、次の3次元モデルの入力条件となる上フランジの変位と傾きは極めて小さいものであった。

### 4.2 3次元モデル

#### 4.2.1 リブを考慮しない場合

図4.2に、炉心支持板と炉内構造物の変位図を示す。本図では、図が煩雑となるため、便宜上、連結管と間隔棒を除いている。

下部プレナムの圧力が炉内構造物底板を押し上げることにより、その変位が間隔棒や連結管を介して上下支持板を押し上げ、その結果モデル全体が上方向に変位したと考えられる。

図4.3に、炉心支持板の各集合体列における平均変位量を示す。

この結果、上部炉心支持板の変位量は、中心で約1.28mm、制御棒位置に当たる第3列で約1.23mmであった。また、高圧プレナムの圧力により、上下の炉心支持板は、炉心中心から第7列までは約0.01mm、第10列では約0.04mm程度相対的に抜がる方向に変位していることが分かった。

#### 4.2.2 リブを考慮する場合

図4.4に、炉心支持板と炉内構造物の変位図を示す。本図では、図が煩雑となるため、便宜上、連結管と間隔棒を除いている。

リブなしモデルと同様に、下部プレナムの圧力が炉内構造物底板を押し上げ、その変位が間隔棒や連結管を介して上下炉心支持板を押し上げて、モデル全体が上方向に変位

している。

図 4. 5 に、炉心支持板の各集合体列における平均変位量を示す。

上部炉心支持板の変位量は、中心で約 0. 3 9 mm、制御棒位置にあたる第 3 列で約 0. 4 1 mm となった。リブを考慮したことにより、変位の傾向は、最大変位量を示すポイントが中心ではなくなり、第 5 列の約 0. 4 3 mm を最大として、中心および第 1 0 列に向かって小さくなっている。また、高圧プレナムの圧力による上下の炉心支持板の相対的な変位は、炉心中心から第 7 列までは約 0. 0 1 mm、第 1 0 列では約 0. 0 3 mm 程度であり、リブなしモデルの解析結果とほぼ同じであった。

さらに、図 4. 6 に示す炉内構造物底板の変位図において、リブおよび炉内構造物円筒部との接合部付近（図中太線部分）より、これらの接合部から離れた位置（図中○内）の方が大きく変位していることが確認できる。これを、下部炉心支持板の各集合体列の平均変位量の最大値を示した第 5 列で見ると、リブに近いポイントで最小約 0. 4 0 mm、リブから離れたポイントで最大約 0. 4 4 mm であり、その差は約 0. 0 4 mm であった。また、同列の最小と最大の差が最も大きいのは第 9 列で、約 0. 0 9 mm であった。このことから、リブの効果により、同じ集合体列においても変位量は一様ではないことが分かった。

なお、炉内構造物底板より下に位置するリブは 6 0° 間隔で配置されているが、本モデルのリブは、リブなしモデルに追加したために、本モデルの中心に位置していない。したがって、ここで示した最大値は、リブがモデルの中心位置にある場合より大きい値となっていると思われる。

#### 4. 3 まとめ

図 4. 7 に、リブなしモデルとリブ付きモデルの各集合体列の平均変位量の比較を示す。リブ付きモデルの変位量はリブなしモデルの変位量に対して、中心から第 4 列付近までは約 1 / 3、第 8 列から第 1 0 列では約 1 / 2 と小さくなり、また、全体的に平坦な変位の分布を示した。

以上より、炉内構造物と炉心支持板の変形は、全体的に上方に変位すると共に、上部炉心支持板炉心中心部での変位量は、より詳細なモデル化を行なったリブ付き 3 次元モデルによる解析結果より、約 0. 3 9 mm 程度となることが分かった。

「常陽」では、流量を変化させる運転方法をとっていないため、これらの変形が問題とはならないが、この変位によって相対的に制御棒が挿入されたものとしてその反応度変化量を評価すると、約 2. 1 ϕ 程度（定格運転時、全制御棒が均等挿入されているとした場合）に相当することになる。



FINAS  
DEFORMED SHAPE

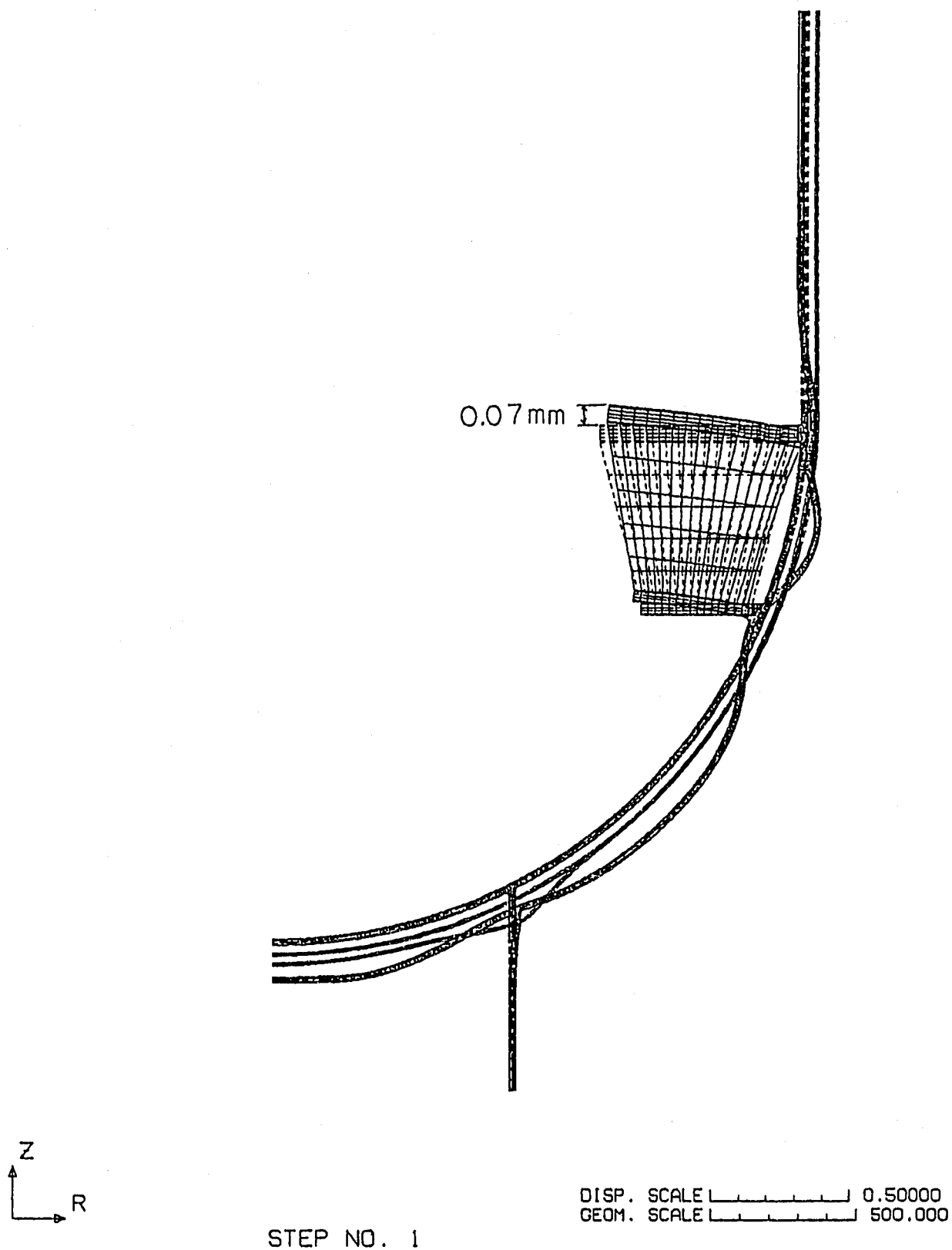
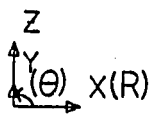
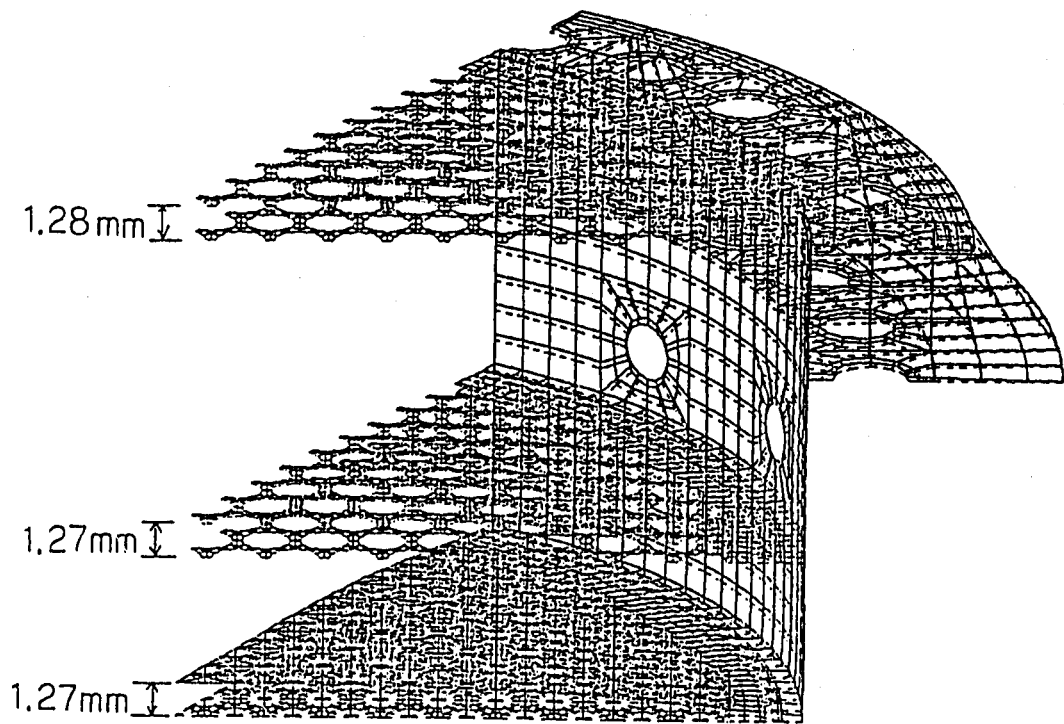


図4.1 原子炉容器とコアサポートの変位図

FINAS  
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 1


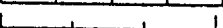
DISP. SCALE  8.00000  
GEOM. SCALE  300.000

図4.2 リブなし炉内構造物と炉心支持板の変位図

	上部支持板	下部支持板
中心	1.28	1.27
1列	1.27	1.26
2列	1.26	1.25
3列	1.23	1.23
4列	1.18	1.17
5列	1.12	1.11
6列	1.05	1.05
7列	0.94	0.95
8列	0.83	0.83
9列	0.71	0.69
10列	0.59	0.55

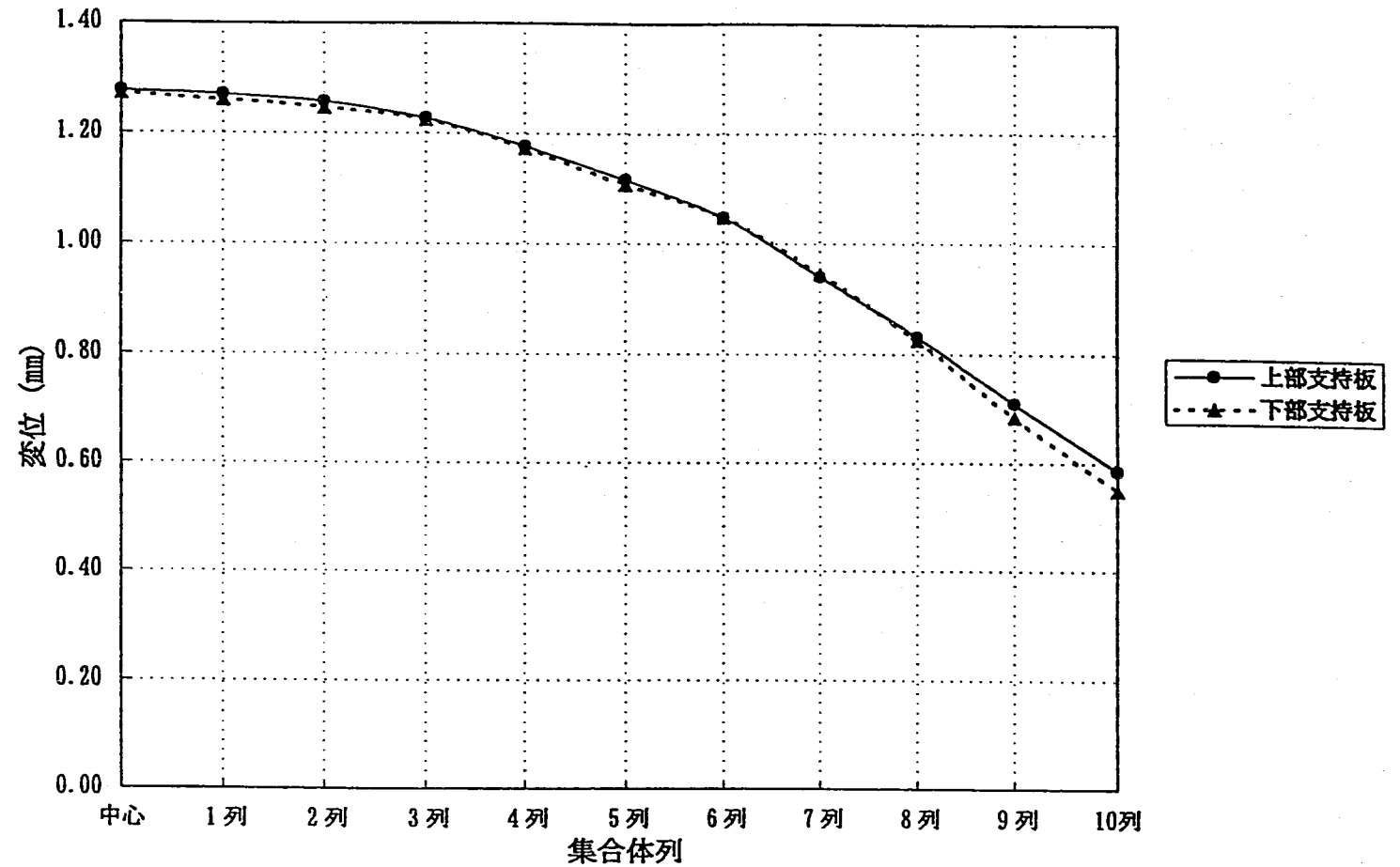


図4.3 リブなしモデルの各集合体列における炉心支持板変位量

FINAS  
DEFORMED SHAPE

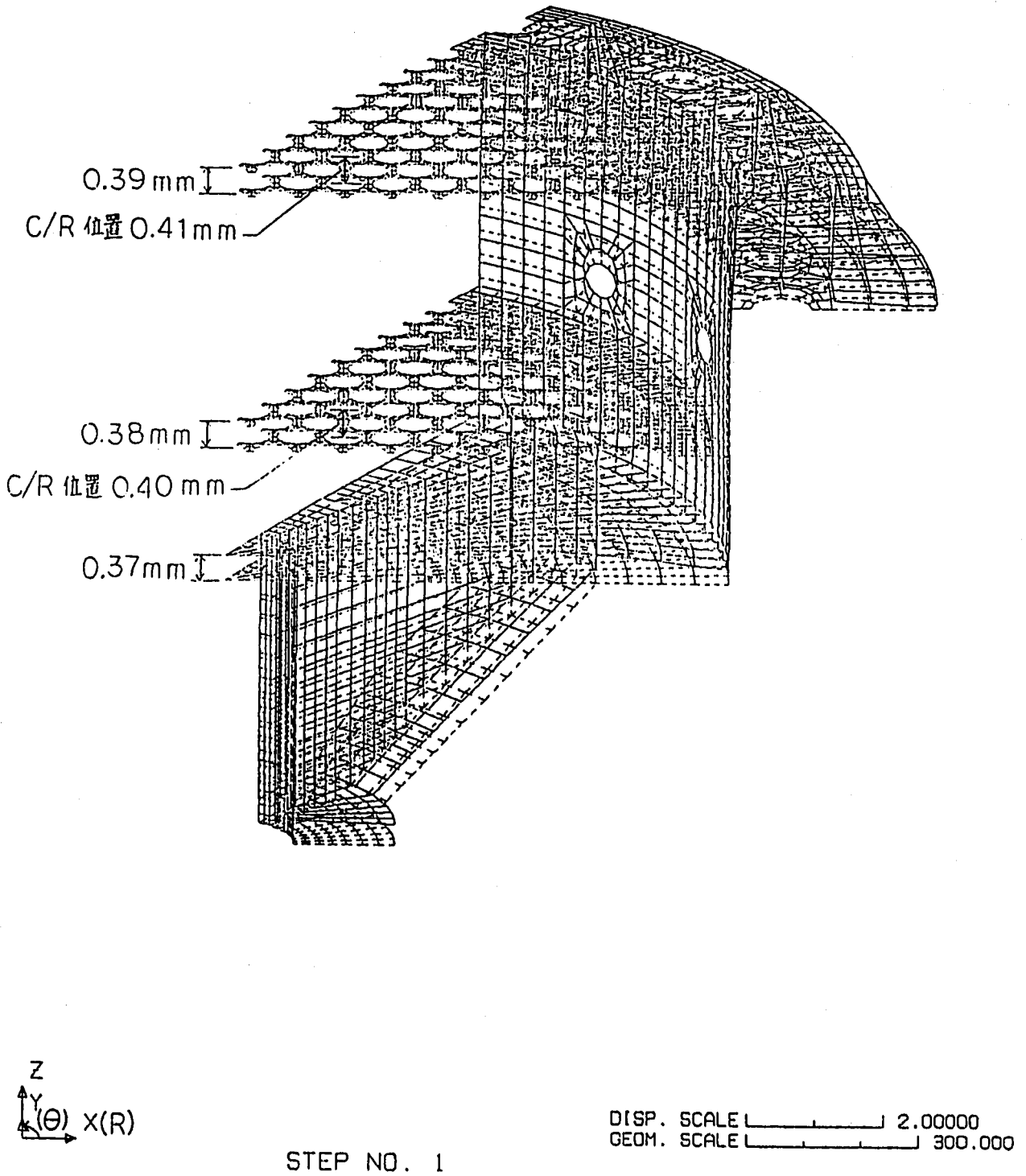


図4.4 リブ付き炉内構造物と炉心支持板の変位図

	上部支持板	下部支持板
中心	0.39	0.38
1列	0.39	0.38
2列	0.40	0.39
3列	0.41	0.40
4列	0.42	0.41
5列	0.43	0.42
6列	0.43	0.42
7列	0.41	0.40
8列	0.39	0.37
9列	0.36	0.34
10列	0.34	0.31

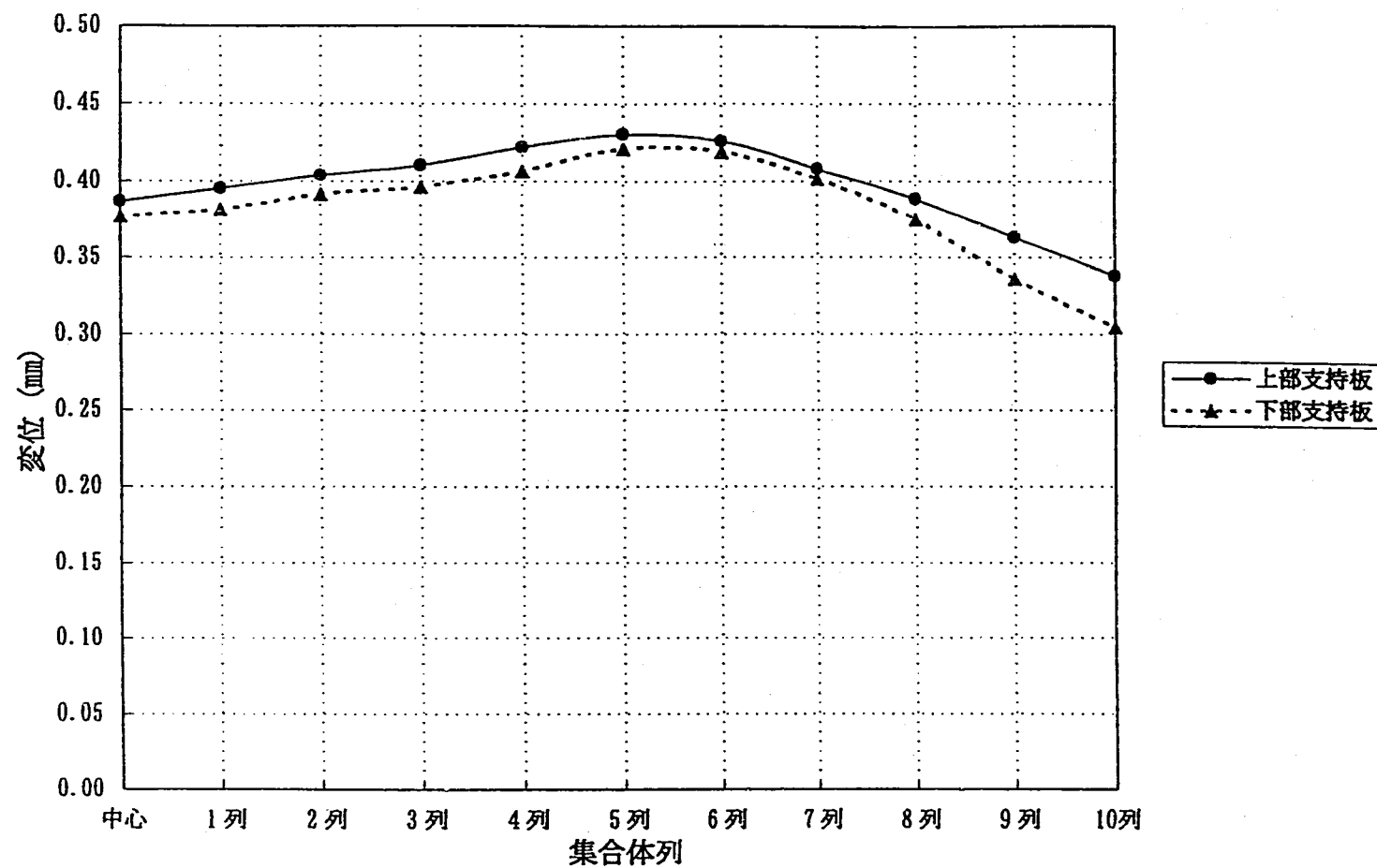
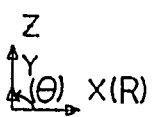
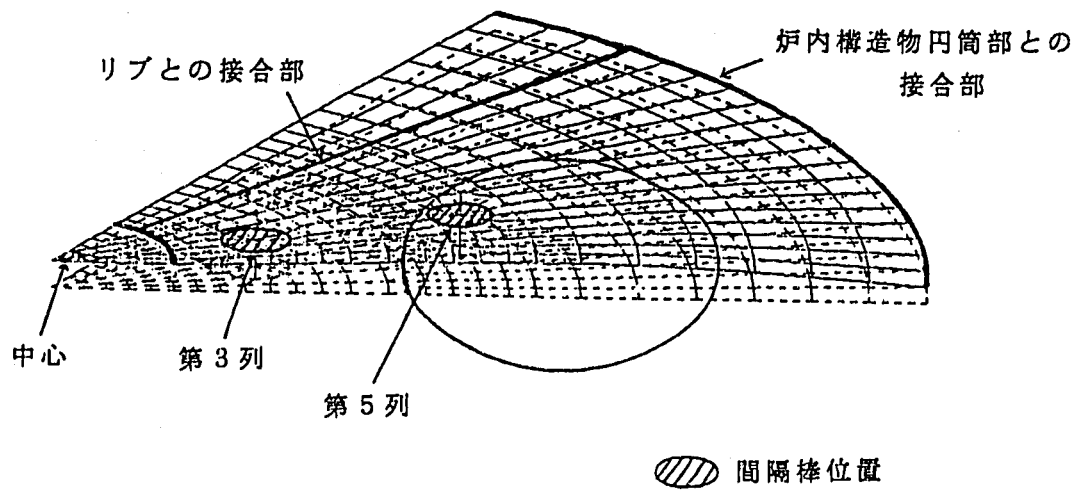


図4.5 リブ付きモデルの各集集体列における炉心支持板変位量

FINAS  
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 1

DISP. SCALE | 3.00000  
GEOM. SCALE | 200.000

図4.6 リブ付き炉内構造物底板の変位図

	上部支持板		下部支持板	
	リブなし	リブ付き	リブなし	リブ付き
中心	1.28	0.39	1.27	0.38
1列	1.27	0.39	1.26	0.38
2列	1.26	0.40	1.25	0.39
3列	1.23	0.41	1.23	0.40
4列	1.18	0.42	1.17	0.41
5列	1.12	0.43	1.11	0.42
6列	1.05	0.43	1.05	0.42
7列	0.94	0.41	0.95	0.40
8列	0.83	0.39	0.83	0.37
9列	0.71	0.36	0.69	0.34
10列	0.59	0.34	0.55	0.31

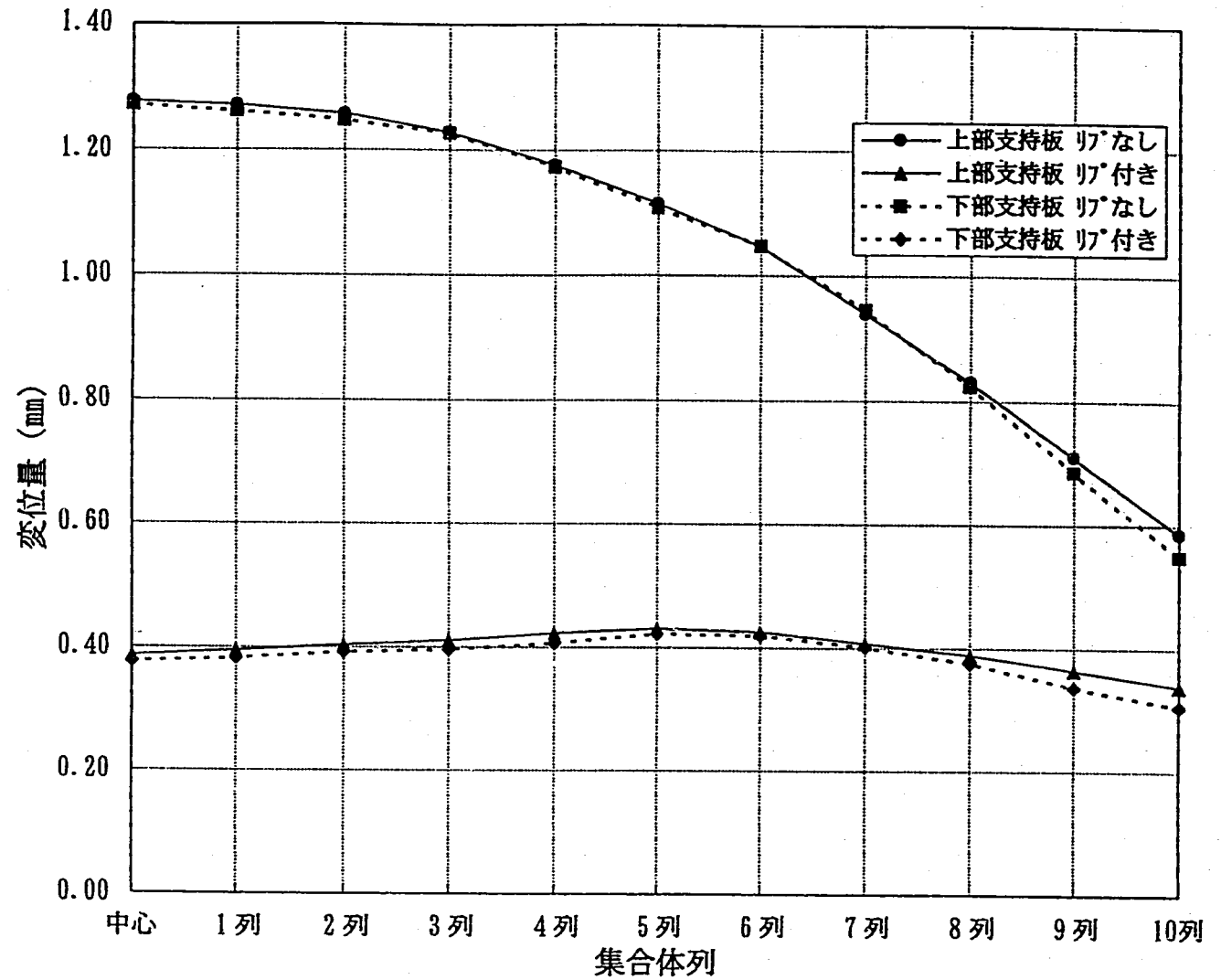


図4.7 リブなしモデルとリブ付きモデルの各集合体列における炉心支持板変位量の比較

## 5. 結 言

「常陽」の定格運転時と停止時の、冷却材流体圧力差によって生じる原子炉容器内炉心支持板の変位量を求めるため、汎用非線形構造解析コード "FINAS" を用いて変形解析を行った。

まず、2次元軸対称モデルによって、炉容器コアサポートと炉内構造物との接合点の変位量を求め、これを境界条件として、炉心支持板を含む炉内構造物の3次元60°セクタモデルを作成し変位量を求めた。

2次元軸対称モデルによる解析の結果、炉内構造物を支持するコアサポート上フランジは、接合部の先端で上方向に0.07mm、炉容器付け根部で下方向に0.03mm変位した。この結果を3次元モデルの境界条件として、炉内構造物を3次元の60°セクタモデルにモデル化し解析を行った。モデル化に当たっては、炉内構造物の内下部のリブを考慮したものとししないものの2種類を作成した。

3次元モデルによる解析の結果、炉内構造物中の上部炉心支持板の変位量は、炉内構造物下部のリブをモデル化しない場合、炉心中心位置で約1.28mm上方に変位するが、リブをモデル化するとその効果によって炉心中心部の変位が抑制され、炉心中心位置で約0.39mm、第5列で最大変位量の約0.43mmと変位量が大幅に小さくなると共に、変位の分布が平坦になることが分かった。この結果から、炉内構造物の変形解析を実施するに当たっては、リブを考慮した詳細なモデルを作成する必要があることが分かった。

全体的な変形の傾向は、下部プレナムに作用する冷却材圧力により、炉心支持板を含む炉内構造物全体が上方に押し上げられると共に、上下の炉心支持板は、高圧プレナムの冷却材圧力で最大で約0.03mm押し広げられることが分かった。「常陽」では、流量を変化させる運転方法をとっていないため、定格運転中にこれらの変形を生じることはないが、この変位によって相対的に制御棒が挿入されたと仮定した場合の反応度変化量は、数 $\phi$ 程度（定格運転時、全制御棒が均等挿入されているとした場合）となる。



## 6. 参考文献

- (1) 岩田 耕司 著, 汎用非線形構造解析システム“FINAS”使用説明書VERSION 12.0  
: PNC TN9520 92-006 (1993年3月)
- (2) 辰野 国光 他著, 「常陽」MK-III冷却系改造に係わる機器・配管構造健全性評価  
-原子炉容器- : PNC ZN9410 93-036 (1993年1月)
- (3) 高須 宏雄 他著, ナトリウム技術実用物性値表 (Na, Ar, He, 304SS, 316SS,  
2\*1/4Cr-1Mo 鋼) : PNC N941 81-87 (1981年4月)