

# 機器上下免震要素の免震周期変更の 影響に関する調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2004年11月

新型炉技術開発株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184

茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話 : 029-282-1122 (代表)

ファックス : 029-282-7980

電子メール : jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section

Technology Management Division

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

(N)

## 機器上下免震要素の免震周期変更の影響に関する調査

(契約業務報告書)

神島 吉郎\*

横井 忍\*

## 要旨

本研究では、上下免震要素の周期変更に伴う影響（要素設計の柔軟性、設計合理化の可能性）に関する調査を行うとともに、機器上下免震システムの成立性検討及び機器上下免震方式のプラント建屋配置検討を行った。

主な検討結果を以下に示す。

(1) 上下免震要素の周期変更に伴う影響

皿ばね直列（枚数）削減による短周期化の可能性について検討を行った。皿ばね免震要素の合理化により、上下免震システムとしての減衰装置及び水平支持装置をコンパクトにまとめることができた。

また、皿ばね免震要素合理化に伴う建屋配置への影響の検討を行った。皿ばね径縮小によるコモンデッキサイズへの削減効果は小さく、建屋配置合理化への効果も小さい見通しである。

(2) 機器上下免震システムの成立性検討

ナトリウム中型炉を対象にコモンデッキ方式の機器上下免震システムの成立性に関する検討を行った。検討結果を以下に示す。

- ・ナトリウム中型炉に採用するコモンデッキ形状として以下を選定した。  
コモンデッキ高さ 2.25m、鋼板板厚 50mm、皿ばね 1 基の支持重量 301 トン
- ・コモンデッキの上下の重量アンバランスはロッキング振動に大きな影響を与えるため、上下の重量アンバランスは小さく抑える必要がある。
- ・コモンデッキ水平面内での重量アンバランスはロッキング振動に大きな影響を与えるため、水平面内での重量アンバランスは小さく抑える必要がある。

---

\* 新型炉技術開発株式会社

本報告書は、新型炉技術開発株式会社が核燃料サイクル開発機構殿との契約により実施した業務の成果である。

機構担当課室：要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

- ・皿ばね剛性を大きくすると全体上下動による変位は小さくなるが、ロッキングによる変位が大きくなる傾向があり、皿ばねの剛性を高くすることによるコモンデッキ変位の抑制効果は期待できない。
- ・コモンデッキの上下変位差は 25mm まで許容できる。（コモンデッキの上下変位を 100mm 以下に制限する場合）

(3) プラント建屋配置検討

ナトリウム中型炉を対象にコモンデッキ方式の機器上下免震システムを採用した場合の建屋配置の検討を行った。検討の結果、建屋水平免震条件に比べ建屋容積の増加割合を 3.4%に抑えることができた。

The investigation about the impact of the vibration period change in the vertical isolation element.

Yoshio Kamishima\*

Shinobu Yokoi\*

## ABSTRACT

In this study, the investigation about the impact (: flexibility of the component design and possibility of the design rationalization) of the vibration period change in the vertical isolation element was carried out. Furthermore, the feasibility studies of the vertical isolation system and configuration of the vertical isolation system in the Fast Reactor Plants were examined.

- (1) The investigation about the impact of the vibration period change in the vertical isolation element.

The possibility of the short period by reduction of the coned disk spring series number in this system was examined. The possibility of the reduction of the coned disk spring series number was confirmed. As the result, it was confirmed that rationalization of coned disk spring isolation element and that the damper and the supporting structure for the seismic horizontal force are compacted. Furthermore, the impact on configuration in the plant with the rationalization of the coned disk spring elements was examined. It was anticipated that the effect to common deck size by the coned disk spring diameter reduction was small and the effect of the rationalization by the configuration in the plant is also small.

---

\* Advanced reactor technology Co., Ltd

This study has been performed by Advanced reactor technology Co., Ltd. under the sponsorship of Japan nuclear cycle development institute.

The division of contract : Structural Mechanics Research Group, Advanced technology division, O-arai Engineering Center

(2) Examination of the vertical isolation system.

The examination about realization of the vertical isolation system was carried out for the sodium cooled medium size reactor plant.

- The common deck shape at the sodium medium size furnace is the following A common deck height of 2.25m, 50m of steel plate board thickness, 301ton of a support weight of a coned disk spring.
- It is necessary to make weight imbalance of the common deck small, because the rocking vibration is affected by the weight imbalance.
- When the coned disk spring rigidity is increased, the displacement of vertical motion decreases but the displacement by the locking increases. The depression effect of the element displacement in vertical direction by the increase of the rigidity of coned disk spring can not be expected.
- The displacement difference of top and bottom of the common deck can be allowed to 25mm.

(3) Plant arrangement examination

The configuration of the vertical isolation system in the Fast Reactor Plants was examined. As the result, it was possible to keep rate of increase of the building volume to 3.4% in comparison with the horizontal base isolation system condition.

## 目 次

1. 目的 .....	1
2. 検討内容 .....	2
2.1 機器上下免震要素の免震周期変更の影響に関する調査 .....	2
2.1.1 免震振動数変更に伴う皿ばね免震要素の組合せ及びダンパの 検討 .....	2
2.1.2 皿ばね免震要素合理化に伴う建屋配置への影響検討 .....	24
2.2 機器上下免震システムの検討 .....	26
2.2.1 2次系配管の許容変位の検討 .....	26
2.2.2 コモンデッキの地震応答解析 .....	37
2.2.2.1 検討開始形状での地震応答解析 .....	37
2.2.2.2 機器の上下移設量の検討 .....	51
2.2.2.3 コモンデッキ剛性の検討 .....	58
2.2.2.4 皿ばね剛性に関する影響検討 .....	71
2.2.2.5 水平内重量バランスに関する影響検討 .....	76
2.3 プラント配置検討 .....	91
3. まとめ .....	101

## 表リスト

表 2.1.1-1 皿ばね免震振動数と直列数の関係	6
表 2.1.1-2 解析ケースとその要求条件	6
表 2.1.1-3 検討結果一覧	7
表 2.2.1-1 2次系ホットレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 0mm)	28
表 2.2.1-2 2次系ホットレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 10mm)	29
表 2.2.1-3 2次系ホットレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 20mm)	30
表 2.2.1-4 2次系ホットレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 25mm)	31
表 2.2.1-5 2次系ホットレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 30mm)	32
表 2.2.1-6 2次系ホットレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 40mm)	33
表 2.2.2.1-1 固有振動数及び入力加速度	39
表 2.2.2.1-2 コモンデッキ上下変位	40
表 2.2.2.3-1 コンクリート鋼板構造の自重による静解析結果	61
表 2.2.2.3-2 コンクリート鋼板構造の等価ヤング率	61

## 図リスト

図 2.1.1-1	5並列14直列の応答結果	8
図 2.1.1-2	合理化検討用減衰装置の寸法形状	9
図 2.1.1-3	合理化検討用減衰装置配置置上のメリット	9
図 2.1.1-4	材軸方向のひずみ分布	10
図 2.1.1-5	FEMによる解析結果の例	10
図 2.1.1-6	減衰装置の荷重特性	11
図 2.1.1-7	5並列2直列の応答結果（ケース1）	12
図 2.1.1-8	5並列2直列の応答結果（ケース2）	13
図 2.1.1-9	5並列3直列の応答結果（ケース3）	14
図 2.1.1-10	5並列4直列の応答結果（ケース4）	15
図 2.1.1-11	5並列5直列の応答結果（ケース5）	16
図 2.1.1-12	5並列5直列の応答結果（ケース5'）	17
図 2.1.1-13	5並列5直列の応答結果（ケース6）	18
図 2.1.1-14	5並列6直列の応答結果（ケース7）	19
図 2.1.1-15	5並列6直列の応答結果（ケース8）	20
図 2.1.1-16	5並列6直列の応答結果（ケース9）	21
図 2.1.1-17	5並列6直列の減衰装置配置例（ケース9）	22
図 2.1.1-18	機器上下免震システムの合理化イメージ	23
図 2.1.2-1	ナトリウム中型炉コモンデッキ形状	25
図 2.2.1-1	ナトリウム中型炉2次系ホットレグ配管引き回し	34
図 2.2.1-2	2次系ホットレグ配管解析モデル	35
図 2.2.1-3	エルボ1（ポンプ組込型 IHX 出口部エルボ）の発生応力	36
図 2.2.2.1-1	コモンデッキ位置床応答曲線	41
図 2.2.2.1-2	解析モデル	42
図 2.2.2.1-3(1/8)	振動モード	43
図 2.2.2.1-3(2/8)	振動モード	44
図 2.2.2.1-3(3/8)	振動モード	45

図 2.2.2.1-3(4/8) 振動モード	46
図 2.2.2.1-3(5/8) 振動モード	47
図 2.2.2.1-3(6/8) 振動モード	48
図 2.2.2.1-3(7/8) 振動モード	49
図 2.2.2.1-3(8/8) 振動モード	50
図 2.2.2.2-1 搭載機器の上方移動方法と 上下モーメント偏差比の関係	53
図 2.2.2.2-2 地震によるコモンデッキ上下変位と 上下モーメント偏差比の関係	54
図 2.2.2.2-3 地震によるコモンデッキ面外変位と 上下モーメント偏差比の関係	55
図 2.2.2.2-4 地震によるコモンデッキ上下変位と 上下移設量の関係	56
図 2.2.2.2-5 地震によるコモンデッキ面外変位と 上下移設量の関係	57
図 2.2.2.3-1 コモンデッキ系応答解析モデル	62
図 2.2.2.3-2 自重によるコモンデッキ上下変位と コモンデッキ等価ヤング率の関係	63
図 2.2.2.3-3 地震によるコモンデッキ上下変位と コモンデッキ等価ヤング率の関係	64
図 2.2.2.3-4 地震によるコモンデッキ面外変位と コモンデッキ等価ヤング率の関係	65
図 2.2.2.3-5 ナトリウム中型炉コモンデッキ形状	66
図 2.2.2.3-6 コモンデッキの自重による静解析モデル	67
図 2.2.2.3-7 等価ヤング率検討用解析モデル	68
図 2.2.2.3-8 コモンデッキ鋼板ヤング率と上下変位の関係	69
図 2.2.2.3-9 コモンデッキ鋼板板厚と等価ヤング率の関係	69
図 2.2.2.3-10 コモンデッキ重量と等価ヤング率の関係	70
図 2.2.2.4-1 全体上下動固有振動数と	

自重によるコモンデッキ上下変位の関係	73
図 2.2.2.4-2 全体上下動固有振動数と 地震によるコモンデッキ上下変位の関係	74
図 2.2.2.4-3 全体上下動固有振動数と 地震によるコモンデッキ面外変位の関係	75
図 2.2.2.5-1(1/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布	78
図 2.2.2.5-1(2/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布	79
図 2.2.2.5-1(3/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布	80
図 2.2.2.5-1(4/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布	81
図 2.2.2.5-1(5/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布	82
図 2.2.2.5-2 自重によるコモンデッキ上下変位と IHX 重量減少量の関係	83
図 2.2.2.5-3(1/5) 振動モード	84
図 2.2.2.5-3(2/5) 振動モード	85
図 2.2.2.5-3(3/5) 振動モード	86
図 2.2.2.5-3(4/5) 振動モード	87
図 2.2.2.5-3(5/5) 振動モード	88
図 2.2.2.5-4 地震によるコモンデッキ上下変位と IHX 重量減少量の関係	89
図 2.2.2.5-5 地震によるコモンデッキ上下変位差と IHX 重量減少量の関係	90
図 2.3-1 ナトリウム中型炉建屋概念図（平面）	92
図 2.3-2 ナトリウム中型炉建屋概念図（立面）	93
図 2.3-3 ナトリウム中型炉機器上下免震 原子炉施設建屋配置概念図（平面）	94
図 2.3-4 ナトリウム中型炉機器上下免震 原子炉施設建屋配置概念図（立面）	95
図 2.3-5(1/4) ナトリウム中型炉機器上下免震 原子炉建屋配置図(1/4)	96

図 2.3-5(2/4) ナトリウム中型炉機器上下免震	.....	
原子炉建屋配置図(2/4)	.....	97
図 2.3-5(3/4) ナトリウム中型炉機器上下免震	.....	
原子炉建屋配置図(3/4)	.....	98
図 2.3-5(4/4) ナトリウム中型炉機器上下免震	.....	
原子炉建屋配置図(4/4)	.....	99
図 2.3-6 ナトリウム中型炉機器上下免震	.....	
原子炉建屋配置図(容積)	.....	100

## 1. 目的

核燃料サイクル開発機構殿において、高速炉プラントに適用する 3 次元免震構造の有望な案として、コモンデッキ方式機器上下免震構造システムの開発を進めている。本件においては、上下免震要素の免震周期変更に伴う要素設計の柔軟性、設計合理化の可能性に関する調査を行うとともに機器上下免震システムの成立性検討及び機器上下免震方式の建屋配置について検討を行う。

## 2. 検討内容

### 2.1 機器上下免震要素の免震周期変更の影響に関する調査

コモンデッキ方式機器上下免震構造は、上下免震振動数の設定値によって免震性能、必要な減衰力が変わるとともに、皿ばね免震要素の形状も大きく異なってくる。本検討では、免震振動数（周期）の変更に伴う皿ばね免震要素の組合せ及びダンパの検討を行うとともに、皿ばね外径を縮小した場合の建屋配置への影響について検討を行う。

なお、2.1.1 項の免震振動数（周期）の変更に伴う皿ばね免震要素の組合せ及びダンパの検討については、株式会社大林組にて行った検討成果をベースに取りまとめたものである。

#### 2.1.1 免震振動数変更に伴う皿ばね免震要素の組合せ及びダンパの検討

##### (1) 検討目的及び狙い

現在検討している上下免震装置を構成する皿ばね免震要素は、外径 1000 φ の皿ばねを 5 並列 14 直列に組合せ、1 装置当たり 2.75MN の支持力を有する。皿ばね免震要素の上下振動数は約 1Hz であり、これに鋼材系（R-0 型）のダンパと組合せ、ケーススタディ波 S2 に対して重要な機器設備（固有周期：0.1 秒近傍）が成立する目安となる加速度応答（1G 以下）及び応答変位（±100mm 以下）を抑えることを実現できる見込みを得ている。

図 2.1.1-1 に、検討のベースとなる上下免震装置（皿ばね免震要素 5 並列 14 直列、鋼材ダンパ 3 本組）の応答結果を示す。

一方、並行して進めてきたプラントへの適用性検討の結果、上下免震振動数が 3Hz まで機器設計が成立することが見出されている。免震振動数を現行の 1Hz から 3Hz 程度まで高く設定すれば応答変位が小さくなるので、設計ストロークも小さくできる。皿ばね免震要素の直列数と振動数は相関があり、直列数が少ないほど固有振動数は大きくなる。即ち、上下免震振動数の増加により皿ばね総数が低減されるので、装置の製造時品質管理・物量・コストについて大幅な低減・合理化が期待できることを意味する。

しかしながら、免震振動数を変更することにより必要な減衰力が変わるので、これまでのダンパが適用できるかを含めて検討する必要がある。

##### (2) 検討条件及び方法

###### a. 検討条件

皿ばねの形状は外径 1000 φ、内径 500 φ、板厚 27mm、自由高さ 34mm とし、1 つの皿ばね免震要素が支持する鉛直荷重は、現行と同じ 2.75MN とする。

入力地震動は、ケーススタディ波 S2 とする。建屋は Na 大型炉を対象とし、解析モデルは建屋と一体化したモデルを用いる。

#### b. 検討方法

皿ばね免震要素の上下振動数は、重要な機器設備の成立が見込まれる  $f_v=3\text{Hz} \sim 1.5\text{Hz}$  を目標とする。なお、上下振動数は、皿ばねの組合せを変えることにより実現できる。表 2.1.1-1 に、免震振動数と直列数の関係を示す。概ね目標とする振動数が得られている。また、表に示す皿ばねの合理化効果は、2 直列 ( $f_v=2.9\text{Hz}$ ) では 14.3%、6 直列 ( $f_v=1.6\text{Hz}$ ) では 42.9% にそれぞれ皿ばね枚数が低減される。

表 2.1.1-2 に、皿ばね免震要素の地震応答解析時要求条件を示す。皿ばねの直列数の減少（免震振動数増加）に伴い、S2 地震時の変位に対する許容値は小さくなる。

一方、皿ばね免震要素の高振動数化に伴って入力が増加するので、従来のダンパでは変位が許容値内に納まらないことが予想される。そこで、ダンパの減衰力を増大させるためには、ダンパの配置本数増加、または新たなダンパの設計（本体部アーム長の短縮）が必要となる。

なお、従来ダンパの板厚増による減衰力を増加させる方法も考えられるが、ボルト径アップ等により固定部の補強が必要となるため、本検討では暫定的に板厚増加と同じ効果が得られる配置本数を増加させる方法を採用する。また、新たなダンパの形状設計に際しては、取付方法及びメンテナンスを考慮して皿ばね免震要素と干渉しないことを念頭に検討した。

#### c. 新たなダンパの設計

本体部アーム長 600mm（加力芯—固定部間距離）である現行ダンパは、コモンデッキ上に固定していたので、皿ばね免震要素の上部加圧板と干渉していない。そこで、新たなダンパでは、ダンパの固定部を皿ばねユニット固定フランジ及びコモンデッキを跨ぐような配置を避けて皿ばね上部加圧板上に固定する。即ち、ダンパのアーム長を短くする。これにより、従来コモンデッキ上に減衰装置を固定していたが、皿ばねユニット上部フランジ上に配置が可能となり、コンパクト化が図れる。なお、ダンパの固定は、皿ばねとの荷重伝達を考慮し、上部加圧板のデッキへの取付けボルト及び皿ばねの座金近傍とする（曲げモーメントや上部加圧板の面外変形の発生を考慮すると、ダンパの固定を上部加圧板の中心に近づけるのは得策ではないと判断した）。

これらを踏まえ、図 2.1.1-2 に示す形状（短尺ダンパ：本体部アーム長 355mm）を設

定した。板厚は、従来と同じ 66mm とした。また、図 2.1.1-3 に、ダンパの配置例を示す。

短尺ダンパに対して、従来の材料特性 (SS400) を用い、FEM 解析による応力、ひずみ及び荷重特性を評価した。図 2.1.1-4～6 に、材軸方向のひずみ分布、変形 30mm 近傍での応力、ひずみの分布 (コンタ) 及び荷重特性をそれぞれ示す。

短尺ダンパについて、従来ダンパ (アーム長 600mm) と同等の疲労強度を保持させるためには S2 許容限界ひずみを 3%近傍に抑える必要があり、ひずみ 3%での変形 32mm が S2 地震に対する許容値の目安となると考えられる。また、短尺ダンパの荷重特性 (y 切片荷重 : 220kN) より、現行ダンパ (同 147kN) の概ね 1.5 倍の減衰力を有するダンパを設計したことが判る。なお、短尺ダンパの許容値は、表 2.1.1-2 より 5 並列 4 直列の皿ばね免震要素の許容値とほぼ同等であるので、これに対応するダンパの設計を行つたことになる。

### (3) 検討結果

本検討ではダンパの配置性を条件に 2 種類のダンパを設定し、皿ばね免震要素の上下振動数 (約 3Hz～1.5Hz) に対して地震応答解析による応答評価を行つた。表 2.1.1-3 に検討結果一覧を、また、図 2.1.1-7～16 に床応答及び荷重特性を示す。なお、ダンパの減衰力 (荷重、剛性) の大きさを表すため、グラフの最大目盛を統一した。また、ケース 4において、FEM による荷重特性と応答に用いたモデルとの整合性を重ね描きにて示した。

本検討では、ケーススタディ波 S2 入力に対してダンパの配置本数を増加することで、5 並列 3 直列～6 直列にて合理化 (システムとして成立する) の可能性があると判断される。

しかし、2 直列については、今回設定した短尺ダンパの本数をこれ以上増加しても応答変位は抑えられても、機器応答が増加する可能性が大きい。従つて、短尺ダンパでの成立は難しいと言える。これは、ダンパの履歴減衰が殆ど得られていない応答を示しているので、更に剛性が高く剛塑性型のようなダンパでないと成立の見込みが得られないと考えられる。

また、成立の見込みが得られた 6 直列のケースにおいても、現行のダンパや短尺ダンパの平面配置で得られる減衰力では制限値を満足せず、現行ダンパ 3 本セットを 2 段組するなどの減衰力増加 (合計 6 本、図 2.1.1-17 参照) によって応答が制限値に納まって

いるのが現状である。しかしながら、このようなダンパの2段配置は現実的な配置であるとは言えない。

今回の検討では、配置上の条件（皿ばね免震要素との一体化）にてダンパの形状を2種類設定し、機器応答及び免震要素としての地震時許容値を満足する解があることを示した。しかし、配置に捕われなければ、上下免震振動数3Hz（2直列）の場合も含め、上下免震振動数に適したダンパの設計を行うことにより、スマートなダンパの配置が可能であると考えられる。

#### (4) 考察

図2.1.1-18に、本検討で得られた上下免震装置のイメージ（具体化）を示す。皿ばね免震要素の合理化により、上下免震システムとして減衰装置及び水平支持装置をコンパクトにまとめることができる。

しかしながら、上下免震装置の配置により建屋レイアウトの拡大を招いている現状、皿ばね外径の縮小化を図るなどして配置への影響を小さくすること、また、外径縮小化に伴う支持力や変形ストロークの低下を直並列数の見直し（設計変更）によりカバーすることを、今後視野に入れることが必要であると考えられる。

なお、皿ばねユニットの高振動数化に伴い減衰力を増加させる必要がある場合は、鋼材ダンパの形状見直しだけでなく、荷重伝達する部材断面（減衰力伝達棒、ピン径）に対しても注意が必要である。

#### (5) まとめ

皿ばね直列（枚数）削減による短周期化の可能性について検討を行った。皿ばね免震要素の合理化により、上下免震システムとしての減衰装置及び水平支持装置をコンパクトにまとめることができた。

表 2.1.1-1 皿ばね免震振動数と直列数の関係

免震振動数	皿ばね免震要素 の直列数	合理化効果 (皿ばね枚数低減)	備考
1.1Hz	14	100.0	基本ケース
2.9Hz	2	14.3	最も短周期のケース
2.4Hz	3	21.4	
2.0Hz	4	28.6	
1.8Hz	5	35.7	
1.6Hz	6	42.9	

(注) 固有振動数は、皿ばね並列数を5とし、支持荷重を2.75MNとする。また、合理化効果は、皿ばねの枚数（物量）について示す。

表 2.1.1-2 解析ケースとその要求条件

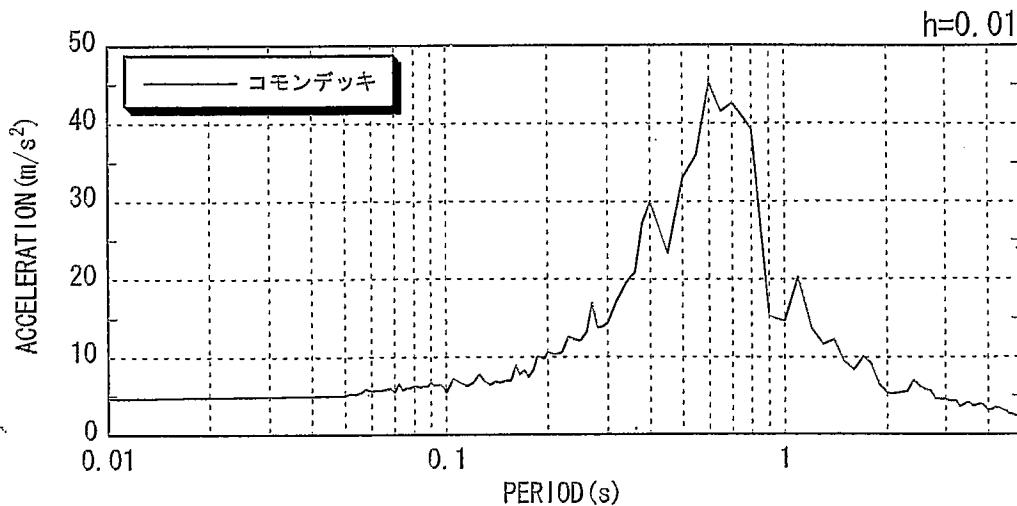
並列×直列	皿ばねユニット 最大ストローク (0.75ho. mm)	中立時変位 (mm)	S2 許容値 (mm)	備考
5×14	357.0	-151	±100	基本ケース
5×2	51.0	-21.6	±14.3	
5×3	76.5	-32.4	±21.4	
5×4	102.0	-43.1	±28.5	
5×5	127.5	-53.9	±35.7	
5×6	153.0	-64.7	±42.9	

(注) S2 許容値は、5並列 14直列時の皿ばね免震要素を基準として直列数に比例させた。

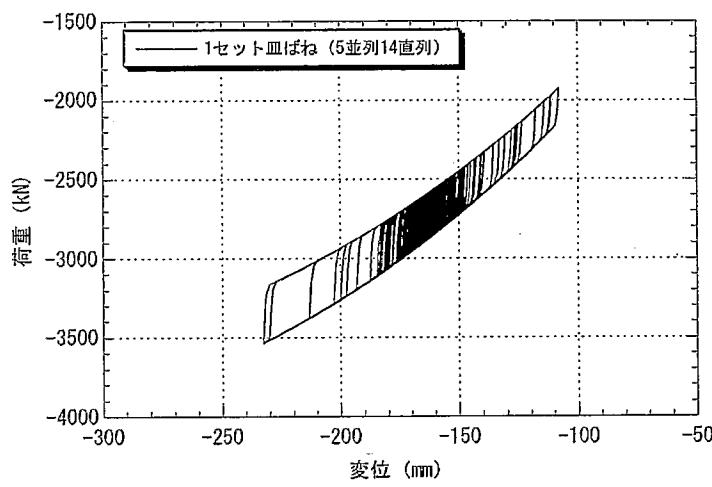
表 2.1.1-3 検討結果一覧

No.	直列 数	減衰装置	皿ばね S2 許容値 (mm)	減衰装置 S2 許容値 (mm)	応答 変位 (mm)	判定	FRS ヒーク 振動数	0.1秒 FRS (m/s <sup>2</sup> )	判定	評価
1	2	短尺ダンパ ×4本	14.3	32	18.9	×	4Hz	18.08	○	×
2	2	短尺ダンパ ×6本	14.3	32	16.8	×	5.1Hz	20.0	△	×
3	3	短尺ダンパ ×4本	21.4	32	20.2	○	3.7Hz	14.24	○	○
4	4	〃	28.6	32	24.6	○	3.7Hz	11.83	○	○
5	5	短尺ダンパ × 3本	35.7	32	35.6	△	2.8Hz	12.12	○	△
5'	5	短尺ダンパ ×4本	35.7	32	27.8	○	3.7Hz	11.53	○	○
6	5	従来ダンパ × 4本	〃	100	45.5	×	2.6Hz	9.29	◎	×
7	6	短尺ダンパ × 3本	42.9	32	38.3	×	2.8Hz	11.52	○	×
8	6	従来ダンパ × 4本	〃	100	53.1	×	2~2.5Hz	9.17	◎	×
9	6	従来ダンパ × 3本×2段	〃	100	38.9	○	2.6Hz	11.9	○	○

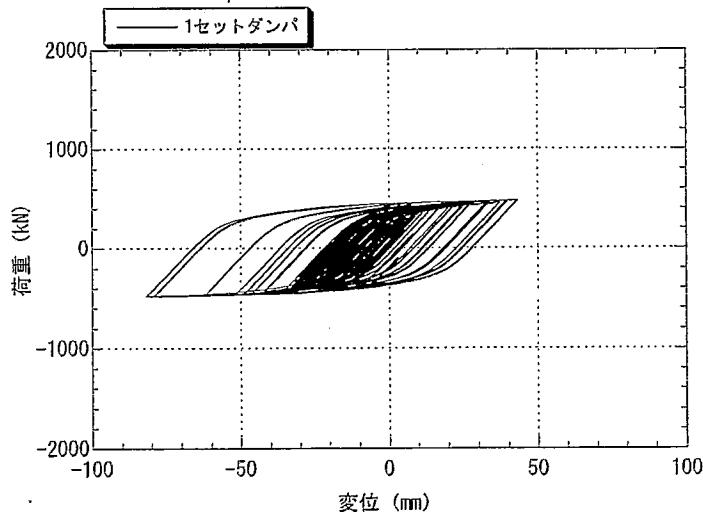
FRS 制限値 : 20m/s<sup>2</sup>以下○、10m/s<sup>2</sup>以下◎



(a) コモンデッキ上での床応答曲線



(b) 皿ばねの荷重特性



(c) 減衰装置の荷重特性 (板厚 66mm、4 体)

図 2.1.1-1 5 並列 14 直列の応答結果

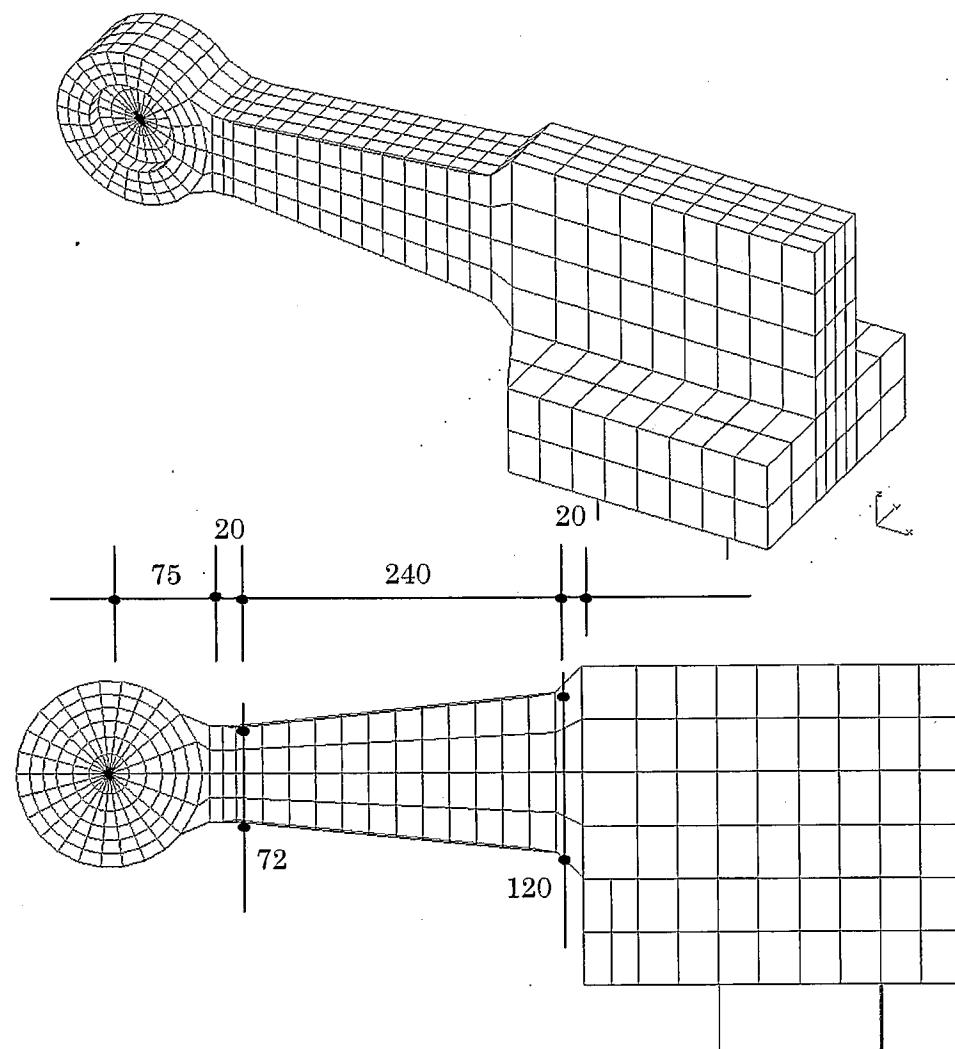
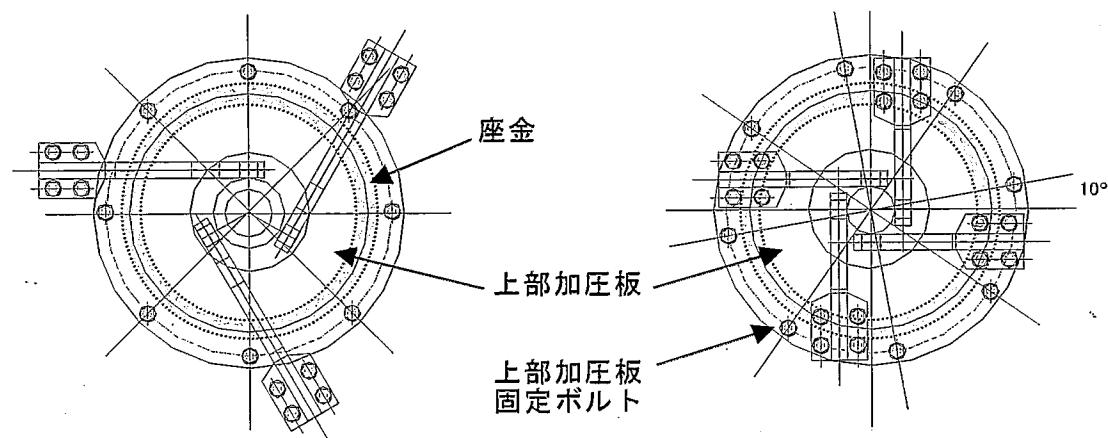


図 2.1.1-2 合理化検討用減衰装置の寸法形状



5並列 14直列用減衰装置の配置

合理化皿ばねユニットの減衰装置の配置

図 2.1.1-3 合理化検討用減衰装置配置上のメリット

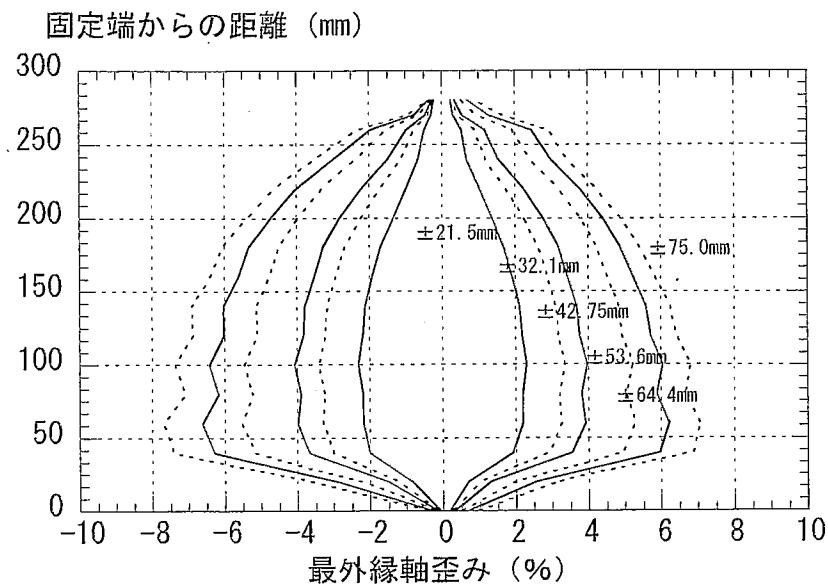
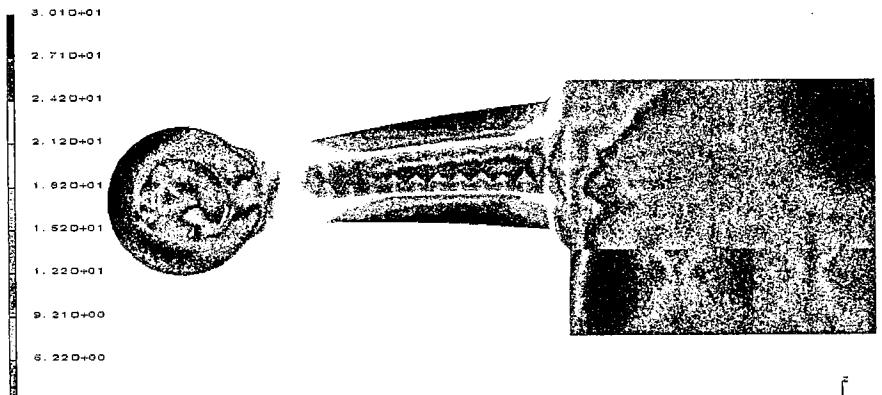
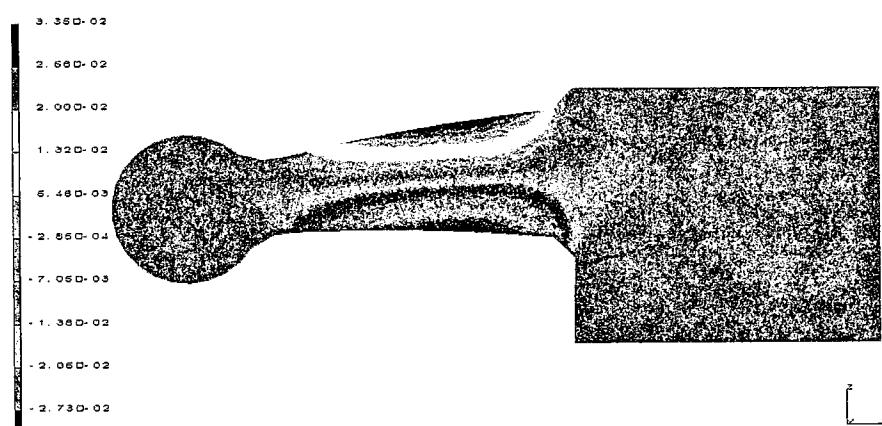


図 2.1.1-4 材軸方向のひずみ分布



応力分布 (Von Mises)



ひずみ分布

図 2.1.1-5 FEM による解析結果の例

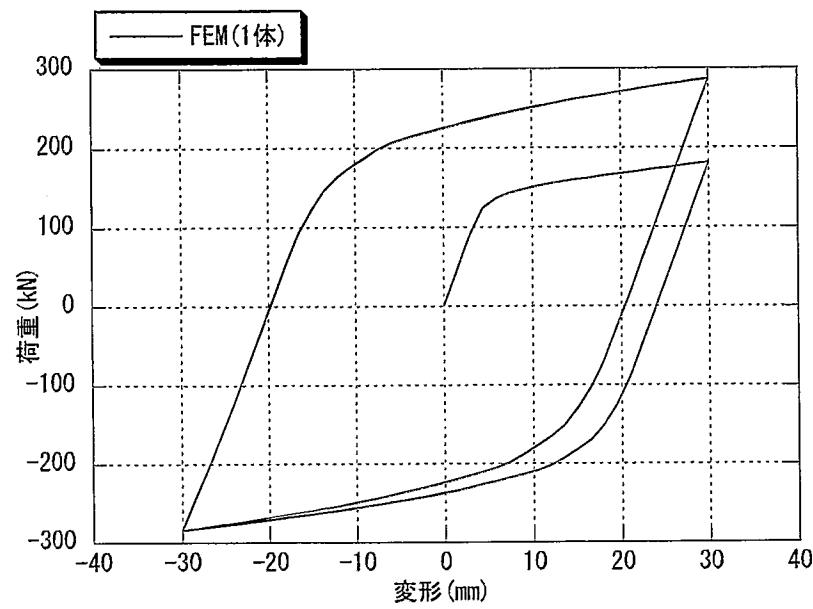
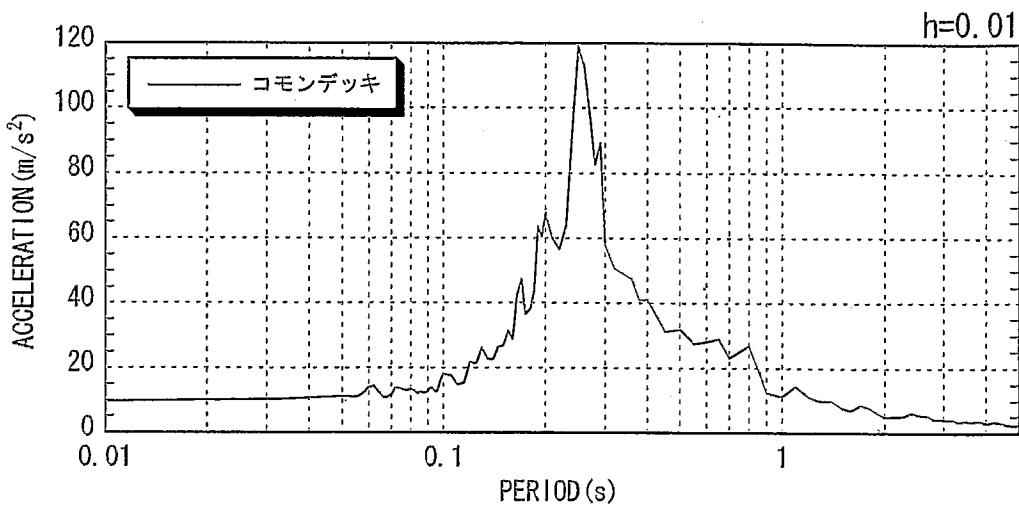
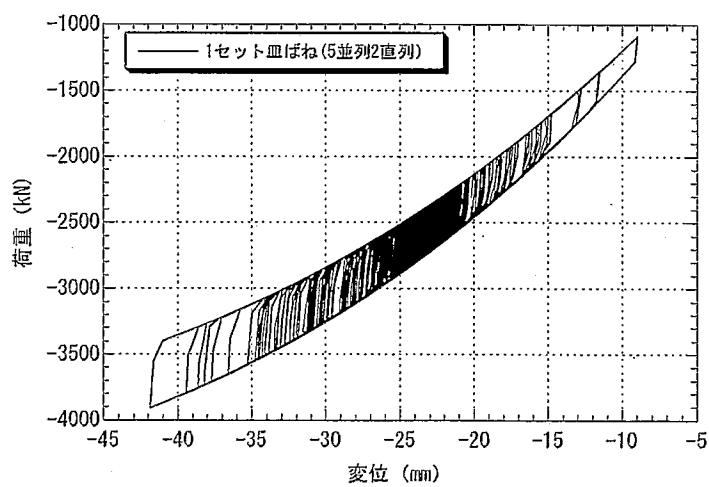


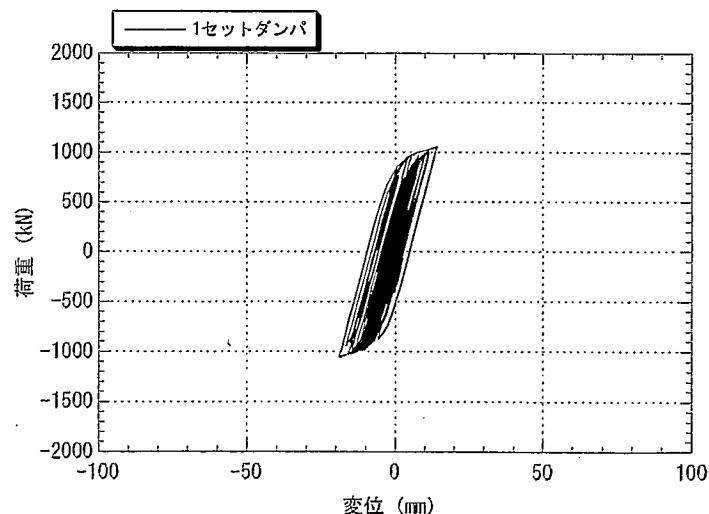
図 2.1.1-6 減衰装置の荷重特性（1体分）



(a) コモンデッキ上での床応答曲線

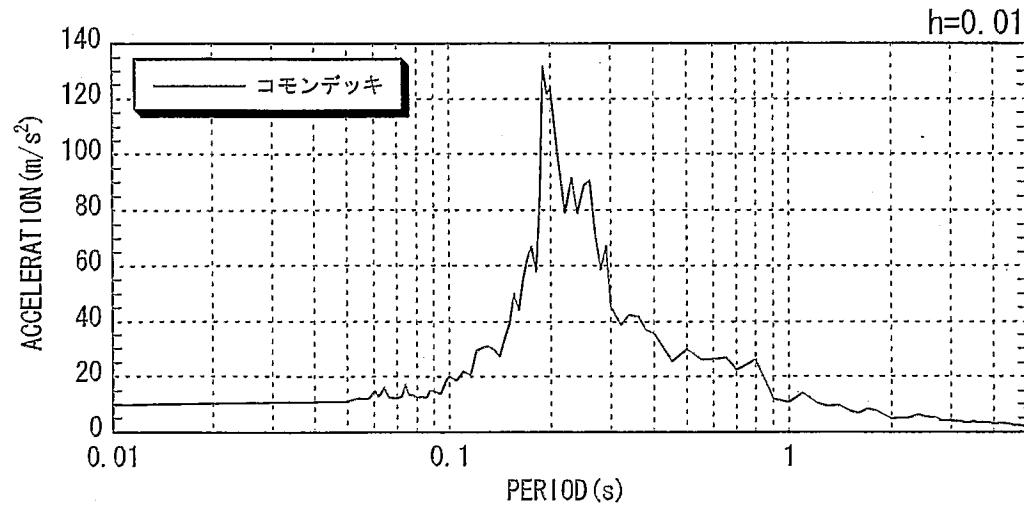


(b) 皿ばねの荷重特性

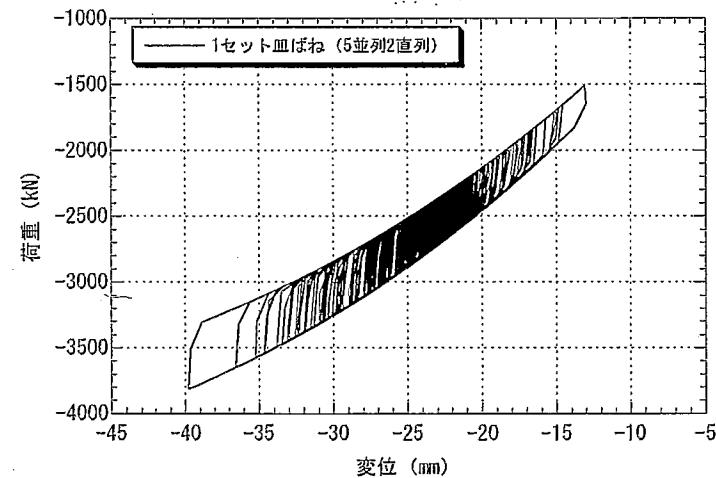


(c) 減衰装置の荷重特性（板厚 66mm、4 体）

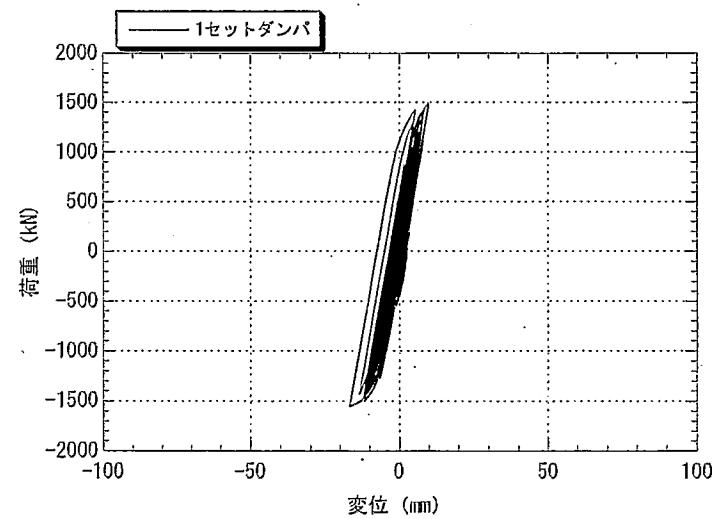
図 2.1.1-7 5 並列 2 直列の応答結果（ケース 1）



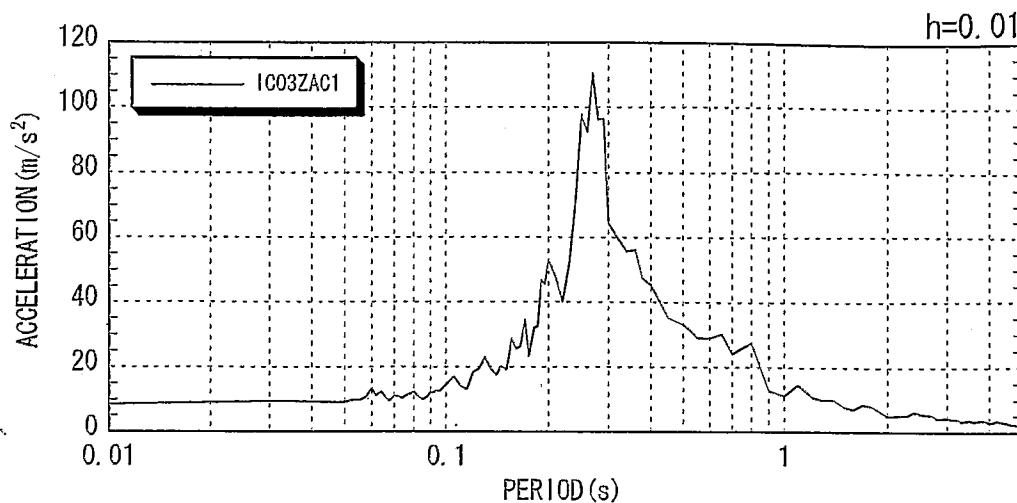
(a) コモンデッキ上での床応答曲線



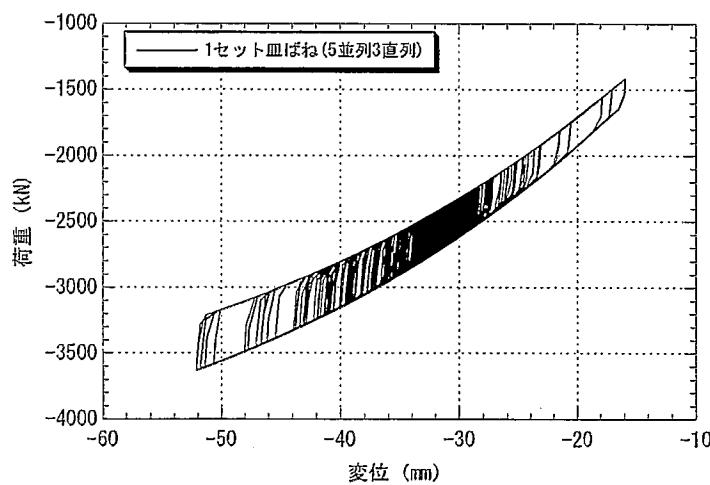
(b) 皿ばねの荷重特性



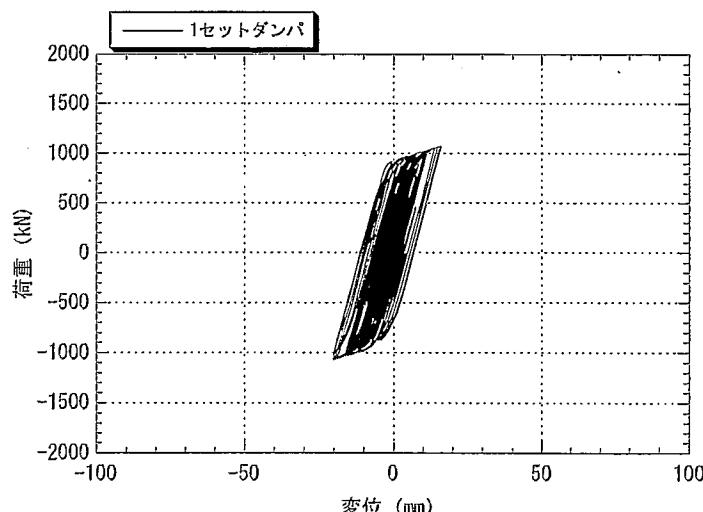
(c) 減衰装置の荷重特性（板厚 66mm、6 体）  
図 2.1.1-8 5 並列 2 直列の応答結果（ケース 2）



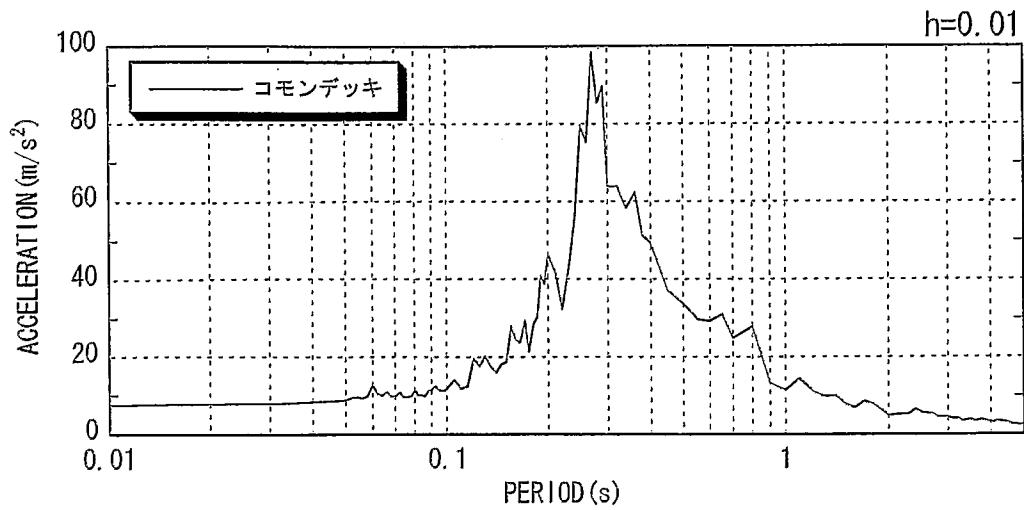
(a) コモンデッキ上での床応答曲線



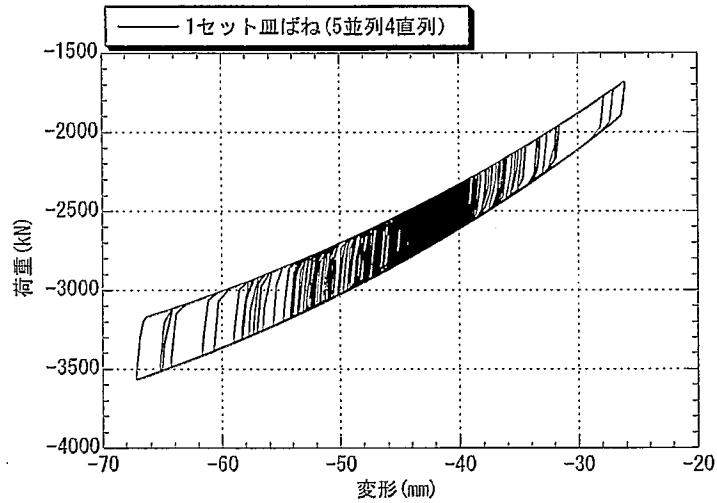
(b) 皿ばねの荷重特性



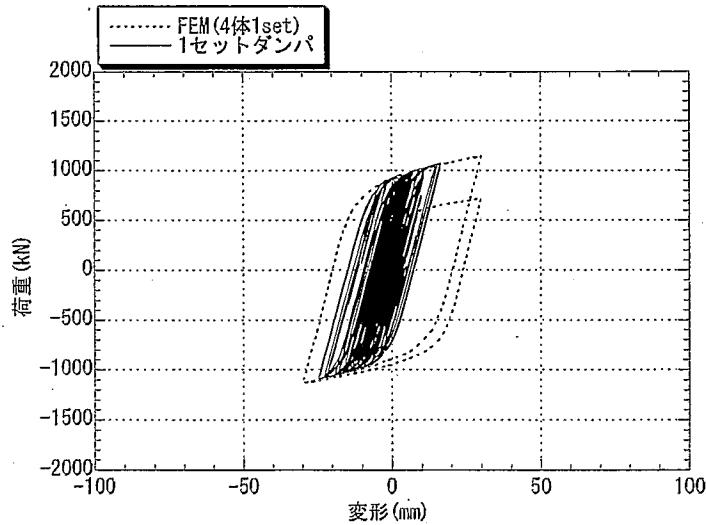
(c) 減衰装置の荷重特性 (板厚 66mm、4体)  
図 2.1.1-9 5 並列 3 直列の応答結果 (ケース 3)



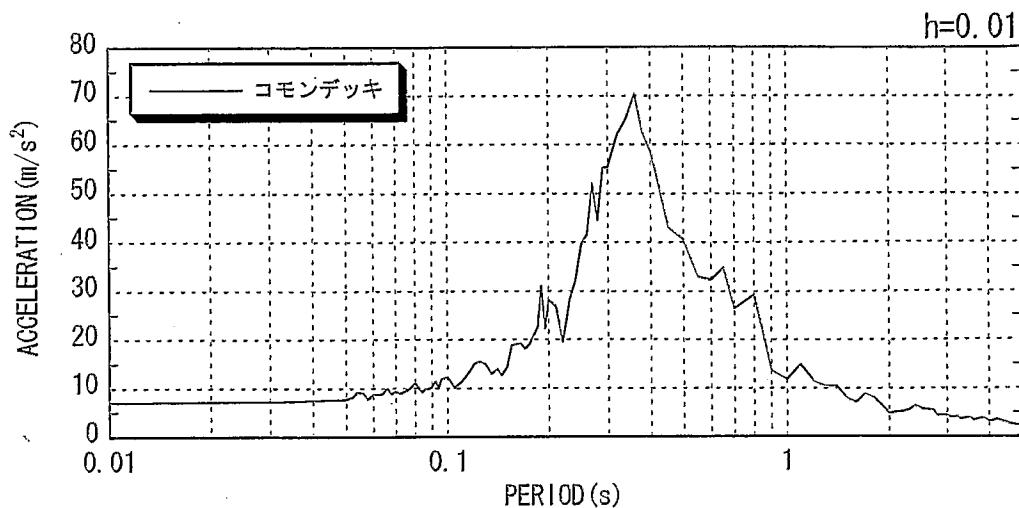
(a) コモンデッキ上での床応答曲線



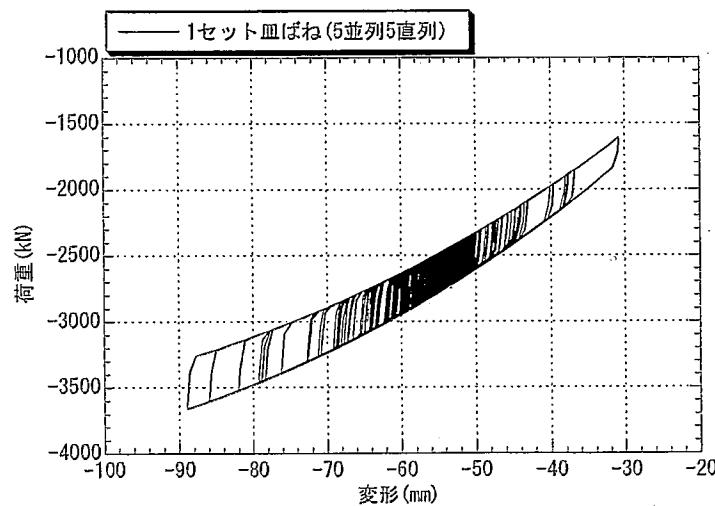
(b) 皿ばねの荷重特性



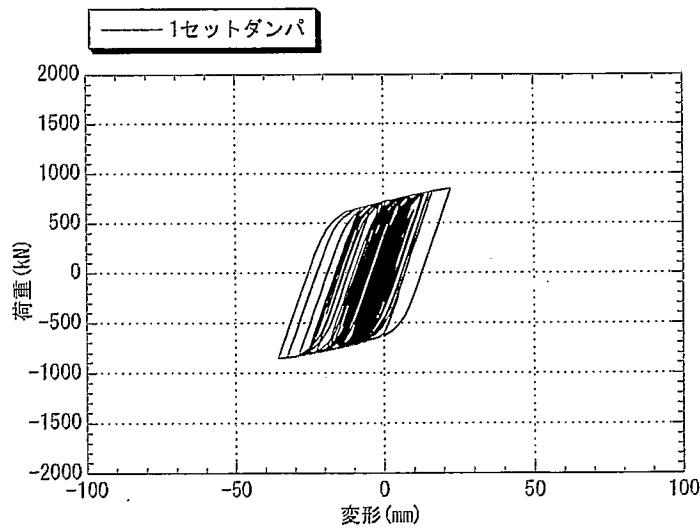
(c) 減衰装置の荷重特性 (板厚 66mm、4 体)  
図 2.1.1-10 5 並列 4 直列の応答結果 (ケース 4)



(a) コモンデッキ上での床応答曲線

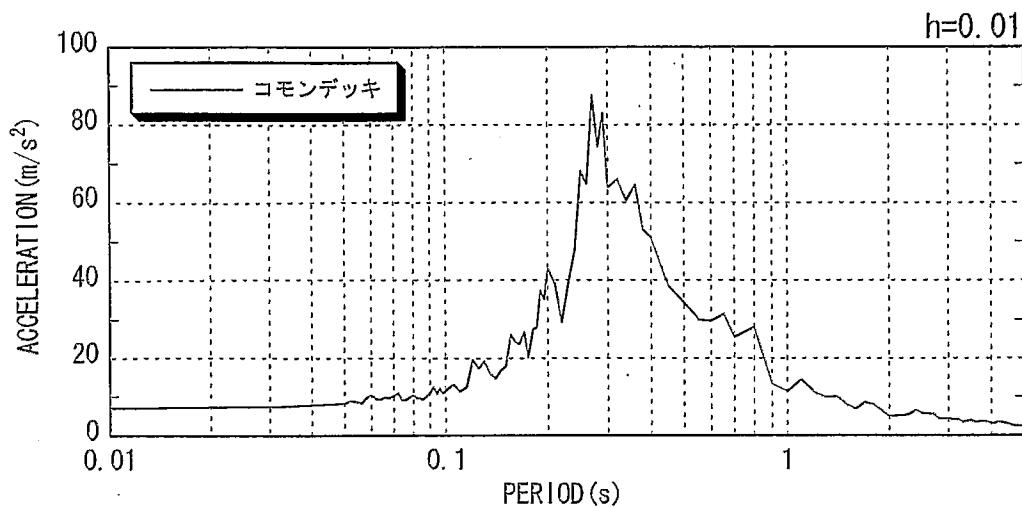


(b) 皿ばねの荷重特性

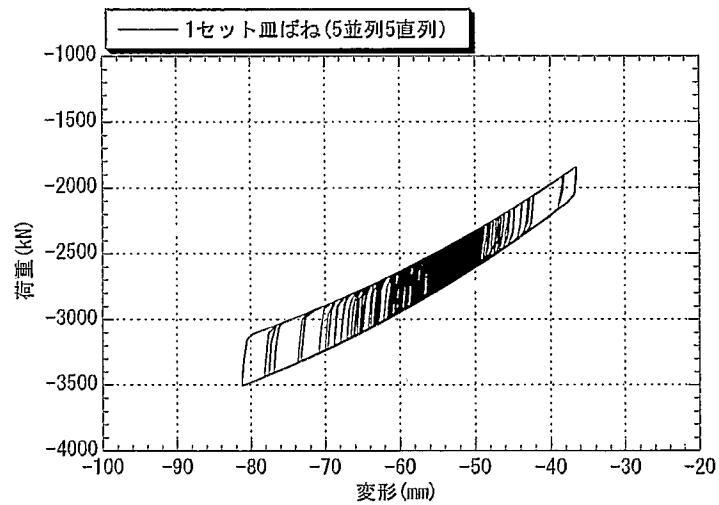


(c) 減衰装置の荷重特性（板厚 66mm、3 体）

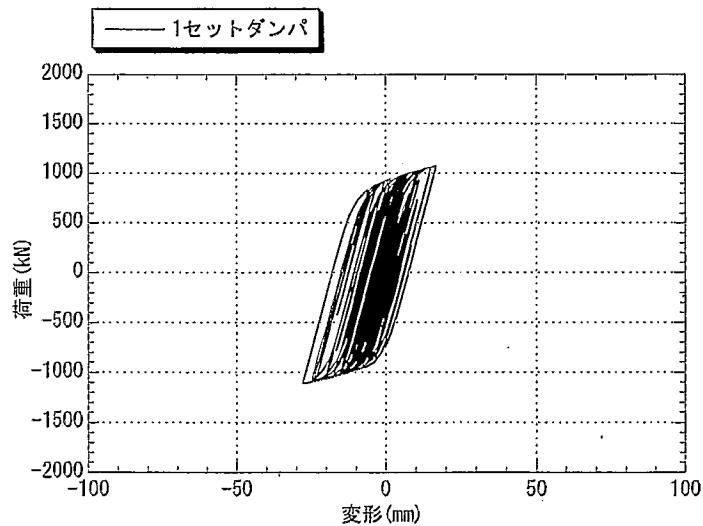
図 2.1.1-11 5 並列 5 直列の応答結果（ケース 5）



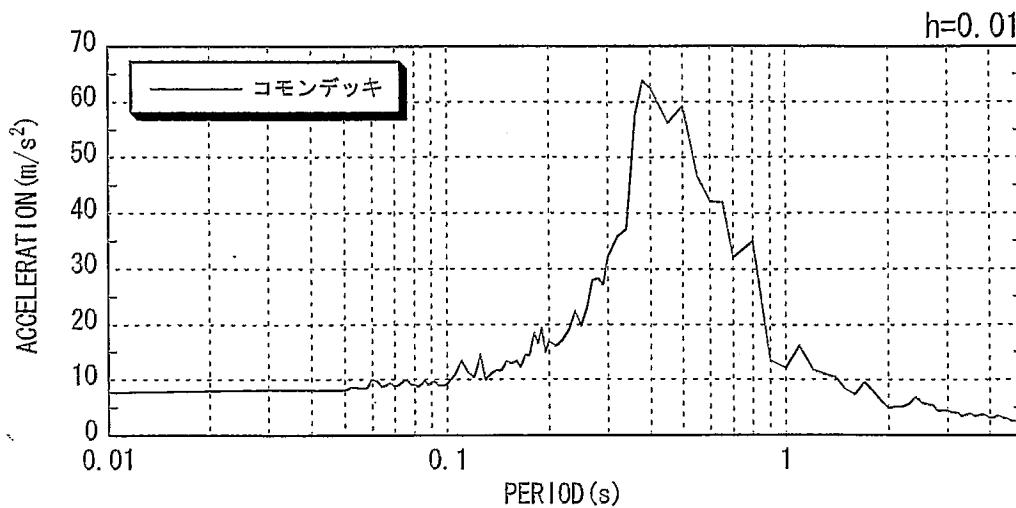
(a) コモンデッキ上での床応答曲線



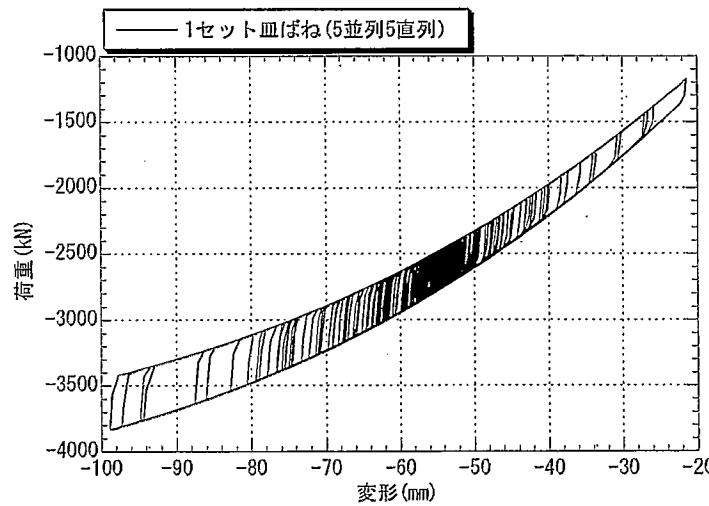
(b) 皿ばねの荷重特性



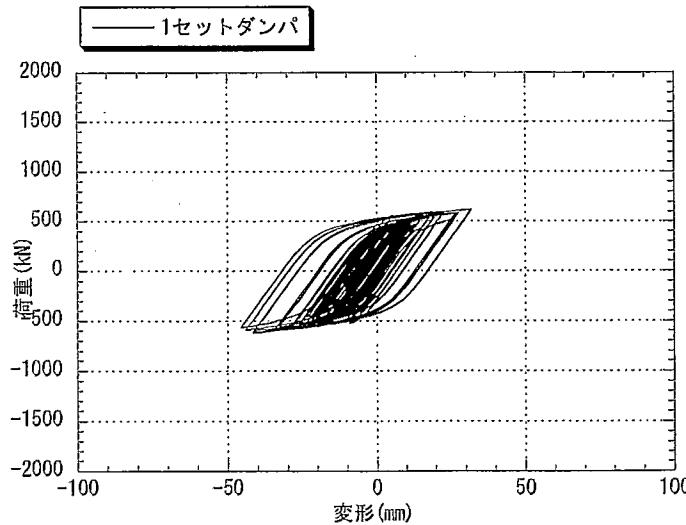
(c) 減衰装置の荷重特性（板厚 66mm、4 体）  
図 2.1.1-12 5 並列 5 直列の応答結果（ケース 5'）



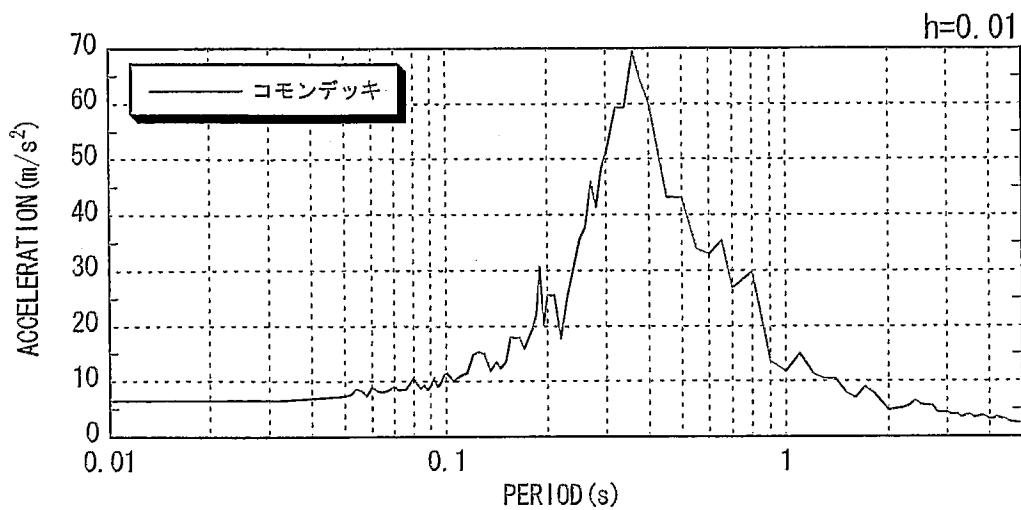
(a) コモンデッキ上での床応答曲線



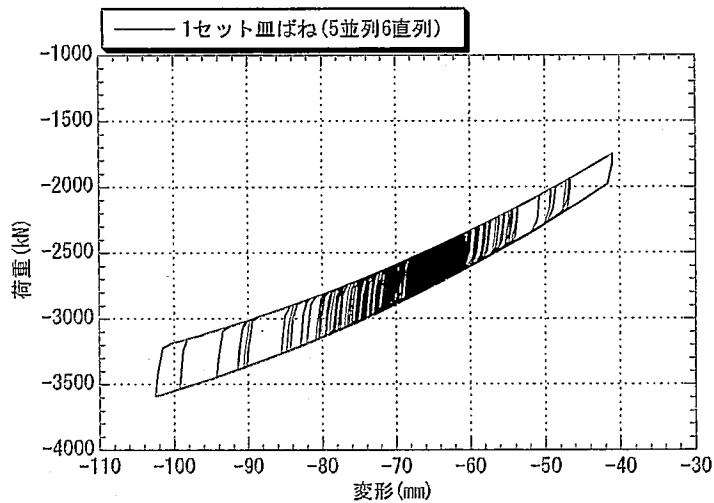
(b) 皿ばねの荷重特性



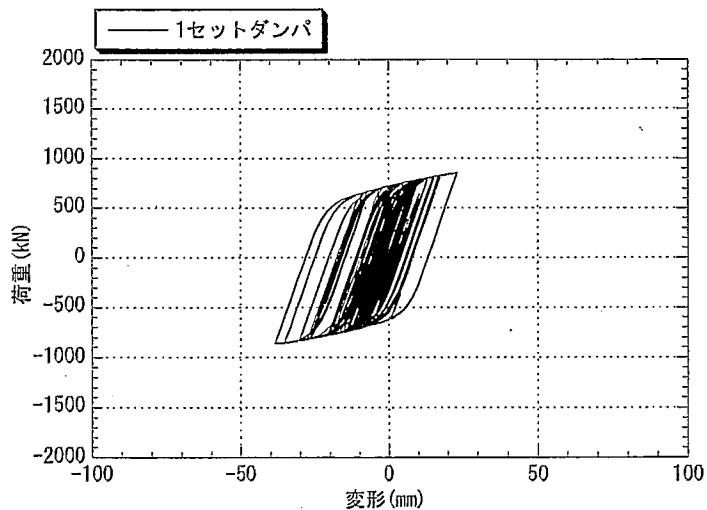
(c) 減衰装置の荷重特性（従来減衰装置 4体）  
図 2.1.1-13 5 並列 5 直列の応答結果（ケース 6）



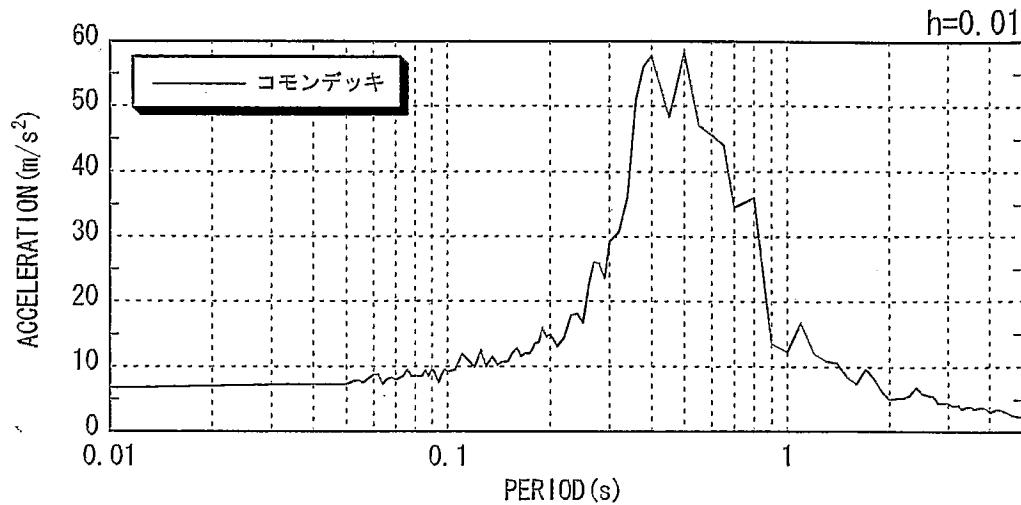
(a) コモンデッキ上での床応答曲線



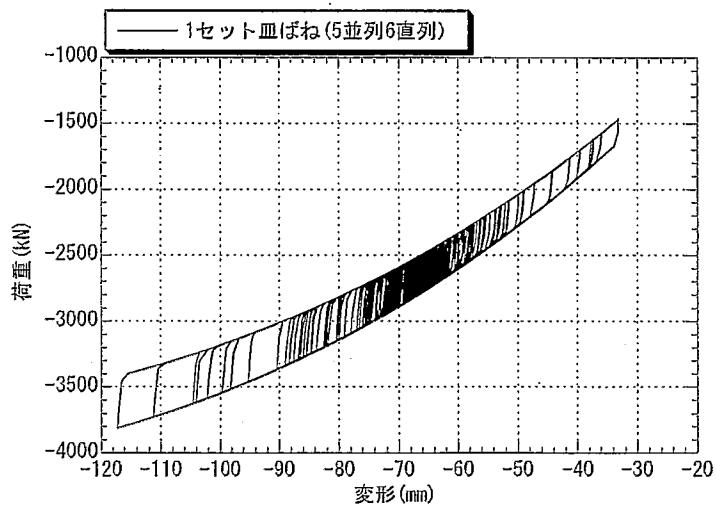
(b) 盤ばねの荷重特性



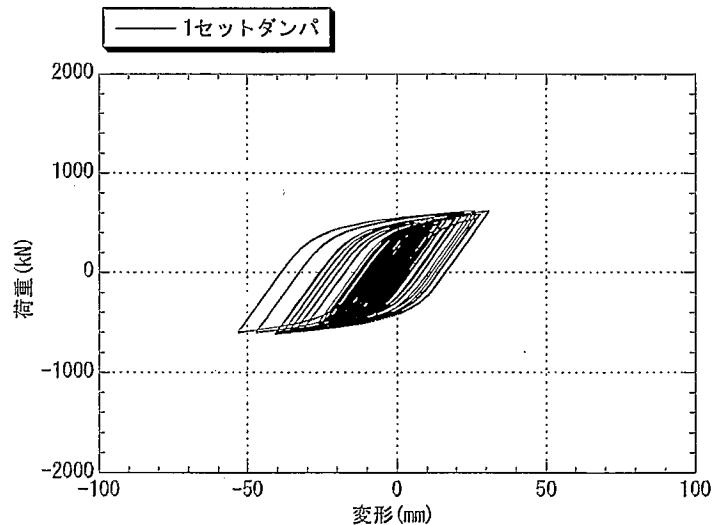
(c) 減衰装置の荷重特性（板厚 66mm、3 体）  
図 2.1.1-14 5 並列 6 直列の応答結果（ケース 7）



(a) コモンデッキ上での床応答曲線

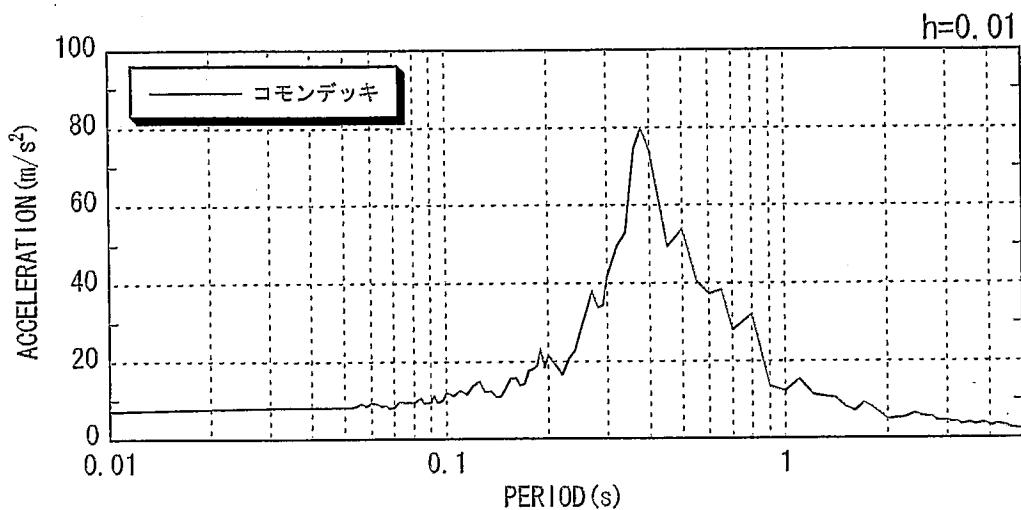


(b) 皿ばねの荷重特性

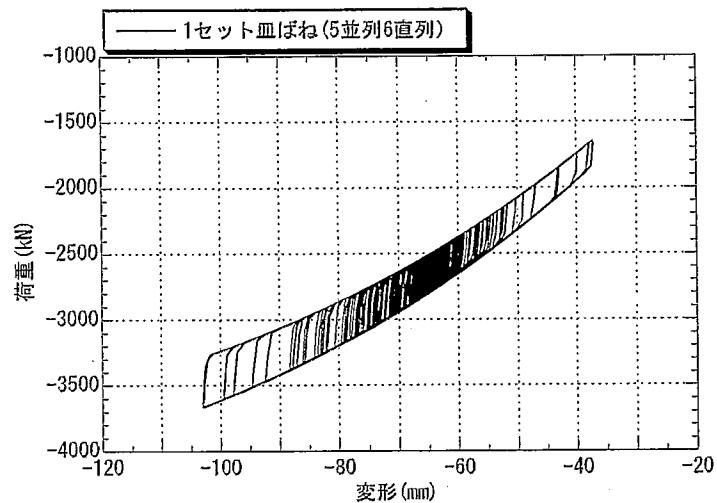


(c) 減衰装置の荷重特性 (従来減衰装置 4体)

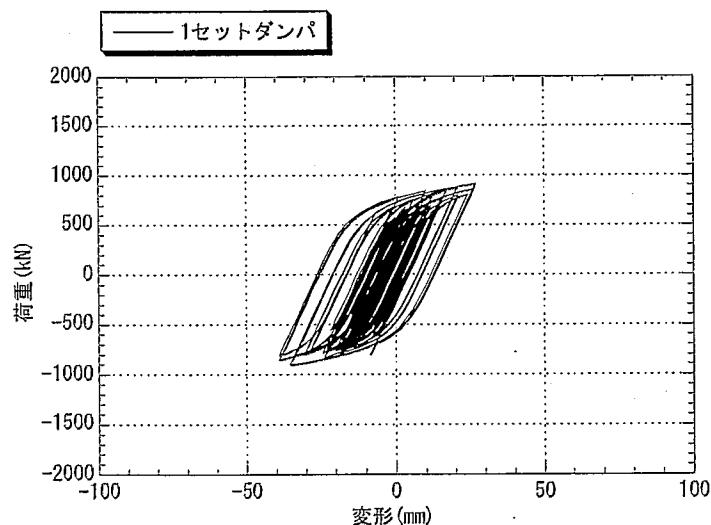
図 2.1.1-15 5並列6直列の応答結果 (ケース 8)



(a) コモンデッキ上での床応答曲線



(b) 皿ばねの荷重特性



(c) 減衰装置の荷重特性（従来減衰装置 6 体）

図 2.1.1-16 5 並列 6 直列の応答結果（ケース 9）

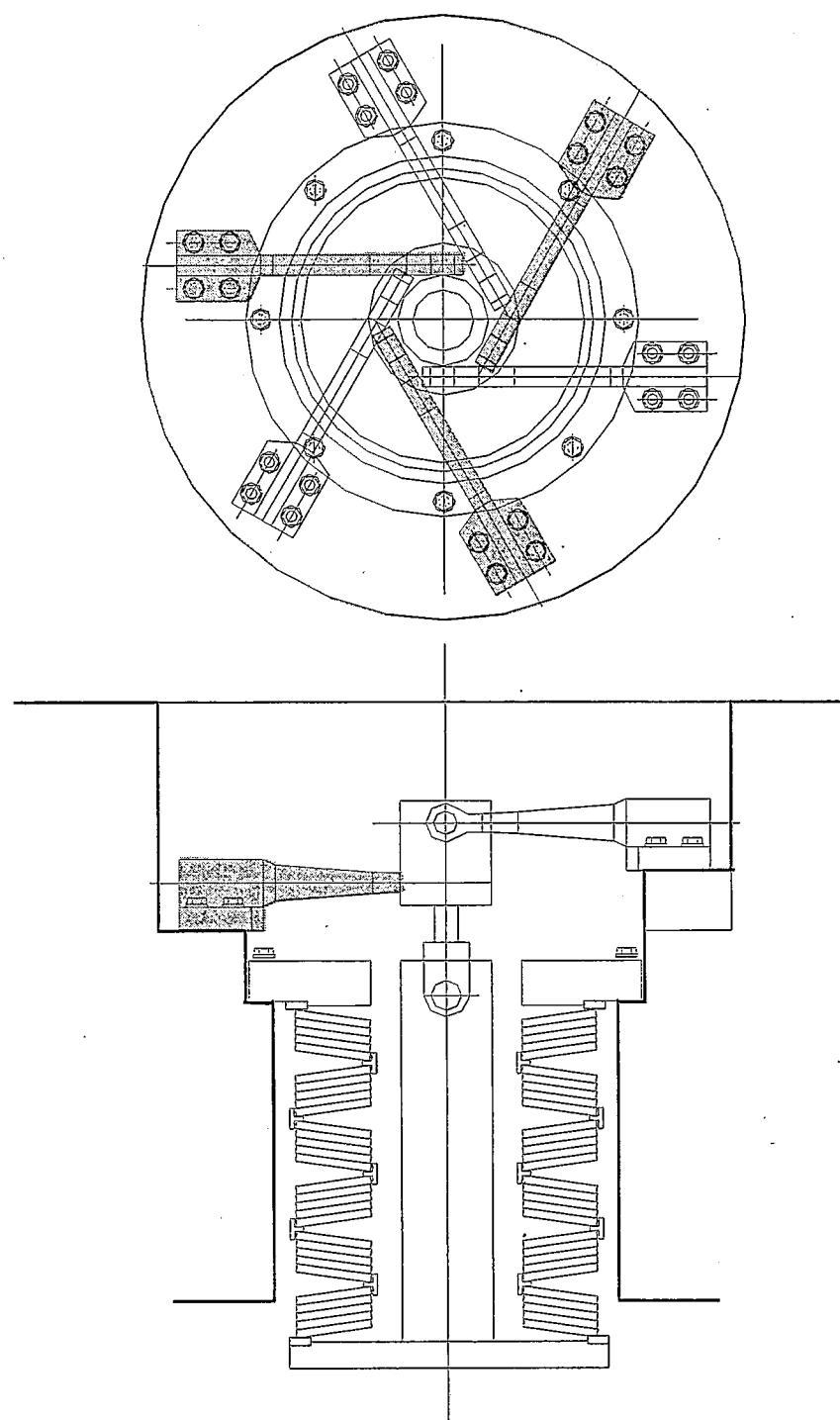


図 2.1.1-17 5並列 6直列の減衰装置配置例（ケース 9）

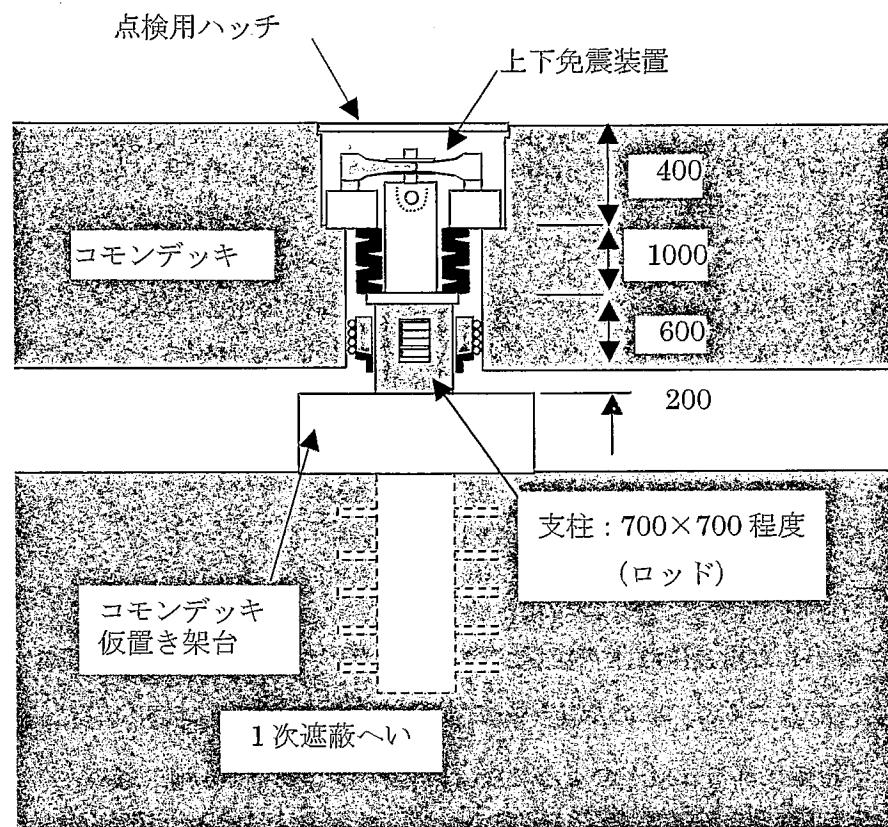


図 2.1.1-18 機器上下免震システムの合理化イメージ

## 2.1.2 盤ばね免震要素合理化に伴う建屋配置への影響検討

### (1) 目的

機器上下免震システムを採用した場合には、コモンデッキサイズが建屋容積に大きな影響を与える。コモンデッキサイズは盤ばね免震要素の配置から決まってくる。

図 2.1.2-1 にナトリウム中型炉のコモンデッキ形状と盤ばね免震要素の配置を示す。同図に示すように盤ばね免震要素の配置変更によるコモンデッキサイズの削減はほとんど見込めない。従って、本検討では盤ばね径の縮小及び盤ばね免震要素基数の削減に伴う建屋配置への影響を見通すことを目的に検討を行う。

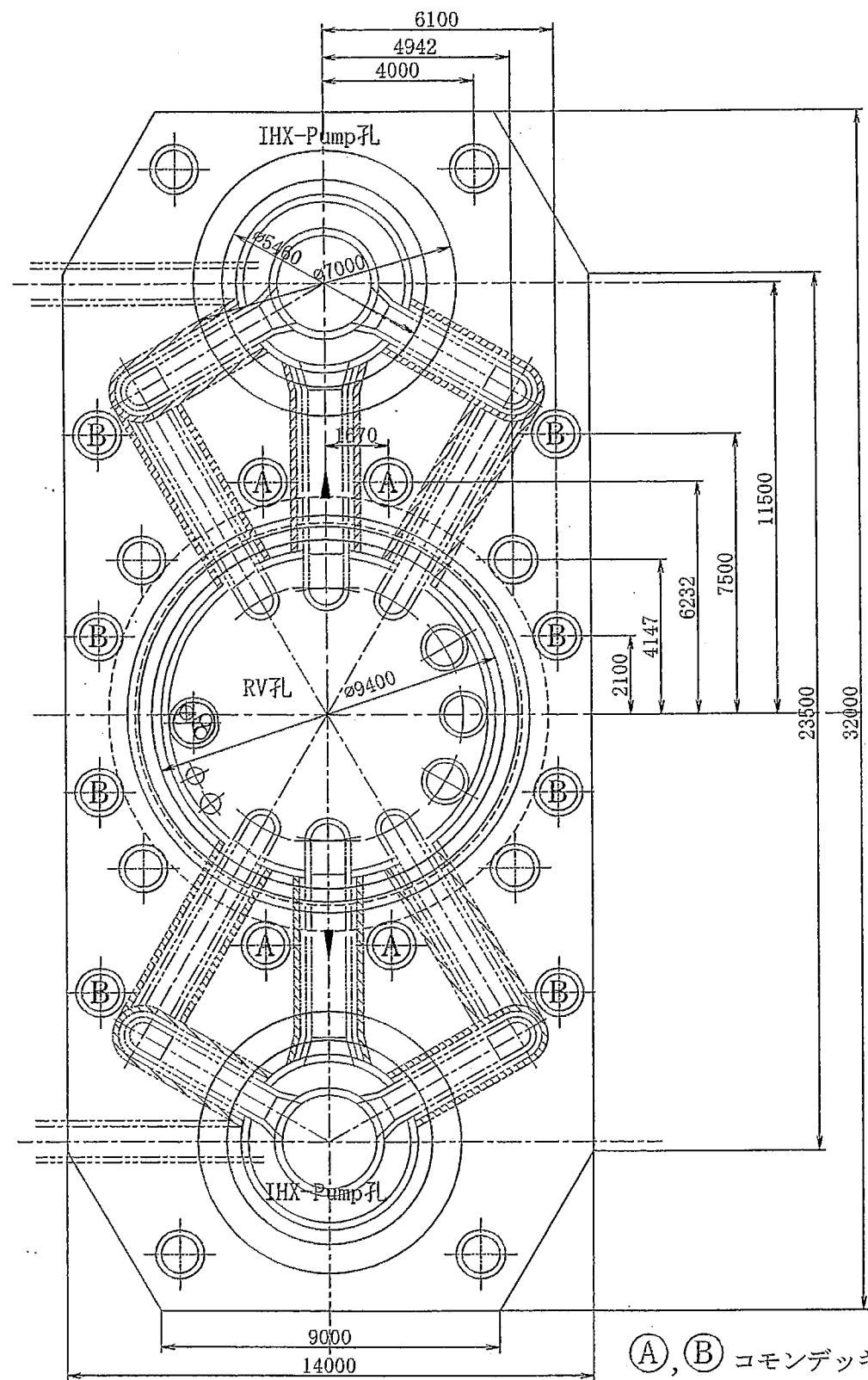
### (2) 検討内容

図 2.1.2-1 に盤ばね免震要素の配置を示す。同図は盤ばね外径 1m の盤ばね免震要素を想定して設定した形状である。盤ばね径縮小によるコモンデッキサイズへの影響があるのは図 2.1.2-1 に示す A 及び B の箇所である。仮に盤ばね径を 1m から 0.8m に縮小した場合には、A の位置ではコモンデッキの長辺長さは 32.0m から 31.6m に縮小される。一方、B の位置ではコモンデッキの短辺方向の長さは 14.0m から 13.6m に短縮される。以上のように盤ばね外径を 1m から 0.8m に縮小した場合にはコモンデッキサイズは  $32.0\text{m} \times 14.0\text{m}$  から  $31.6\text{m} \times 13.6\text{m}$  と若干コモンデッキサイズが小さくなる程度である。従って、盤ばね径縮小による建屋配置への効果は少ないと考えられる。

なお、上記の盤ばね径縮小の他に盤ばね免震要素基数の削減によるコモンデッキサイズの縮小が考えられる。図 2.1.2-1 から原子炉容器廻りの短辺側の盤ばねを削減できれば効果があるが、原子炉容器重量が重いことから削減は難しい。また、盤ばね免震要素基数が少ないと地震時にロッキングが生じやすくなることから現状よりも盤ばね免震要素の基数を削減するのは難しいと考えられる。

### (3) まとめ

盤ばね免震要素の合理化を想定した場合の建屋配置の検討を行った。盤ばね径縮小によるコモンデッキサイズの縮小効果は小さい見通しであり、建屋容積縮小への効果も小さいと考えられる。



(A), (B) コモンデッキサイズに  
影響がある皿ばね

図 2.1.2-1. ナトリウム中型炉コモンデッキ形状

## 2.2 機器上下免震システムの検討

ナトリウム中型炉を対象にコモンデッキ方式の機器上下免震システムの成立性に関する検討を行う。

### 2.2.1 2次系配管の許容変位の検討

#### (1) 概要

機器上下免震システムでは2次系配管が渡り配管となる。地震時には2次系配管のノズル部に鉛直方向の強制変位とコモンデッキの上下変位差により生じる回転角が負荷される。本検討では下向きに強制変位100mmが負荷された状態で許容できるコモンデッキの上下変位差について検討を行う。

#### (2) 検討内容

2次系ホットレグ配管を対象に強制変位を与えた場合の応答解析を実施し、現実的な引き廻し条件で許容できる変位量を求める。図2.2.1-1に2次系ホットレグ配管の概念図を示す。

##### a. 検討条件

###### (a) 制限値

上下変位による応力の制限値は以下とする。

直管 :  $1.27 \times S_y / 1.5 = 280 \text{ MPa}$  以下<sup>1)</sup> (HCM12A,  $S_y = 333 \text{ MPa}$ ,  $550^\circ\text{C}$ )

エルボ :  $1.5 \times 1.27 \times 0.9 S_y = 570 \text{ MPa}$  以下<sup>1)</sup> (HCM12A,  $S_y = 333 \text{ MPa}$ ,  $550^\circ\text{C}$ )

1) 運転状態IVの座屈に対する制限値である。

###### (b) 解析条件

図2.2.1-2に解析モデルを示す。解析コードは汎用FEM解析コードFINASを使用した。解析はポンプ組込型IHX側ノズル部に下向きに強制変位100mmとコモンデッキ上下変位差により生じる回転角を入力する。コモンデッキの傾きによる上下変位差のパラメータは0mm、10mm、20mm、25mm、30mm、40mmとする。なお、解析は評価が厳しくなるコモンデッキの長辺方向について行う。

##### b. 解析結果

表2.2.1-1～表2.2.1-6に解析結果を示す。同表より評価が最も厳しい箇所について図2.2.1-3に整理して示す。これらよりコモンデッキ上下変位差は25mm以下であれば制限条件を満足できる。

(3) まとめ

検討の結果、2次系配管の引き廻しを若干変更することによりコモンデッキ上下  
変位差は25mmまで許容できる。

表 2.2.1-1 2 次系ホットレグ配管解析結果（コモンデッキ上下変位差：0mm）

		$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N-mm)	$M_y$ (N-mm)	$M_z$ (N-mm)	$F$ (N)	$M$ (N-mm)	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$B_2 \text{or} 0.6B_2$	$M/Z$ (MPa)
IHX側直管	端部	2.70E+03	-5.86E+04	-2.97E+05	-5.47E+08	1.46E+09	-3.26E+08	3.03E+05	1.59E+09	6.39E+06		249.77
エルボ1	中央	3.19E+03	5.86E+04	2.97E+05	-5.47E+08	-3.89E+07	4.63E+07	3.03E+05	5.50E+08	6.39E+06	3.70E+00	318.88
エルボ1	端部	-3.90E+04	4.38E+04	2.97E+05	-4.66E+08	-1.58E+08	-5.18E+06	3.03E+05	4.92E+08	6.39E+06	6.17E+00	475.07
エルボ2	端部	-5.86E+04	2.70E+03	2.97E+05	-3.18E+08	-1.88E+08	-2.84E+07	3.03E+05	3.71E+08	6.39E+06	3.70E+00	214.86
エルボ2	中央	2.24E+05	6.80E+05	2.70E+03	-2.78E+08	1.61E+08	6.09E+08	7.16E+05	6.88E+08	6.39E+06	4.85E+00	522.69
エルボ3	端部	-3.32E+05	6.35E+05	2.70E+03	-3.10E+08	-8.51E+07	1.58E+08	7.16E+05	3.58E+08	6.39E+06	8.08E+00	452.88
エルボ3	中央	3.42E+02	8.31E+02	7.52E+03	-4.06E+07	-1.77E+07	6.54E+06	7.57E+03	4.48E+07	6.39E+06	8.08E+00	56.67
エルボ4	端部	-3.78E+01	8.98E+02	7.52E+03	-3.13E+07	-2.87E+07	6.01E+06	7.57E+03	4.29E+07	6.39E+06	4.85E+00	32.57
エルボ4	中央	-3.65E+02	-8.21E+02	-7.52E+03	-4.91E+06	2.33E+06	-2.75E+06	7.57E+03	6.10E+06	6.39E+06	8.08E+00	7.72
エルボ5	端部	-3.78E+01	-8.98E+02	-7.52E+03	-3.64E+06	-3.96E+06	-2.25E+06	7.57E+03	5.82E+06	6.39E+06	4.85E+00	4.42
エルボ5	中央	5.51E+03	1.55E+04	6.62E+02	2.63E+06	1.67E+06	9.60E+06	1.65E+04	1.01E+07	6.39E+06	4.85E+00	7.66
エルボ5	端部	-4.35E+03	1.59E+04	6.62E+02	1.11E+06	3.18E+06	1.59E+06	1.65E+04	3.73E+06	6.39E+06	8.08E+00	4.72
SG側直管		-1.64E+04	-6.62E+02	6.08E+02	-3.24E+06	1.24E+07	2.68E+06	1.65E+04	1.31E+07	6.39E+06	2.05	

$$\text{直管} \quad \sigma = \frac{M}{Z} = \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$\text{エルボ端部} \quad \sigma = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$\text{エルボ中央} \quad \sigma = B_2 \cdot \frac{M}{Z} = B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$B_2 = \frac{1.30}{\lambda^{2/3}} \quad \lambda = \frac{tR}{r^2}$$

表 2.2.1-2 2 次系ホットレグ配管解析結果（コモンデッキ上下変位差：10mm）

	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N-mm)	$M_y$ (N-mm)	$M_z$ (N-mm)	$F$ (N)	$M$ (N-mm)	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$B_2 \text{or} 0.6B_2$	M/Z (MPa)
I-X側直管	3.27E+03	-5.82E+04	-3.05E+05	-5.87E+08	1.50E+09	-3.26E+08	3.10E+05	1.64E+09	6.39E+06		256.65
	3.75E+03	5.81E+04	3.05E+05	-5.87E+08	-3.42E+07	4.76E+07	3.10E+05	5.90E+08	6.39E+06	3.70E+00	341.81
エルボ1 中央	-3.83E+04	4.39E+04	3.05E+05	-5.00E+08	-1.76E+08	-3.64E+06	3.10E+05	5.30E+08	6.39E+06	6.17E+00	512.21
	-5.82E+04	3.27E+03	3.05E+05	-3.32E+08	-2.18E+08	-2.72E+07	3.10E+05	3.98E+08	6.39E+06	3.70E+00	230.97
エルボ2 端部	2.24E+05	6.80E+05	3.27E+03	-2.90E+08	1.68E+08	6.09E+08	7.16E+05	6.95E+08	6.39E+06	4.85E+00	527.68
	-3.31E+05	6.35E+05	3.27E+03	-3.23E+08	-8.90E+07	1.58E+08	7.16E+05	3.70E+08	6.39E+06	8.08E+00	468.93
エルボ3 端部	-5.45E+05	4.63E+05	3.27E+03	-2.67E+08	-2.02E+08	-2.38E+08	7.16E+05	4.11E+08	6.39E+06	4.85E+00	312.08
	8.29E+02	4.28E+02	7.86E+03	-4.59E+07	9.51E+06	7.17E+06	7.92E+03	4.74E+07	6.39E+06	4.85E+00	35.99
エルボ4 中央	3.53E+02	8.64E+02	7.86E+03	-4.26E+07	-1.84E+07	6.78E+06	7.92E+03	4.69E+07	6.39E+06	8.08E+00	59.35
	-4.11E+01	9.32E+02	7.86E+03	-3.28E+07	-3.00E+07	6.24E+06	7.92E+03	4.49E+07	6.39E+06	4.85E+00	34.13
エルボ5 端部	-8.82E+02	-3.05E+02	-7.86E+03	2.05E+05	1.02E+07	-3.27E+06	7.92E+03	1.07E+07	6.39E+06	4.85E+00	8.14
	-3.81E+02	-8.52E+02	-7.86E+03	-5.28E+06	2.46E+06	-2.86E+06	7.92E+03	6.49E+06	6.39E+06	8.08E+00	8.22
エルボ5 端部	-4.11E+01	-9.32E+02	-7.86E+03	-3.95E+06	-4.17E+06	-2.33E+06	7.92E+03	6.20E+06	6.39E+06	4.85E+00	4.71
	5.77E+03	1.63E+04	6.88E+02	2.68E+06	1.76E+06	1.01E+07	1.73E+04	1.06E+07	6.39E+06	4.85E+00	8.02
エルボ5 中央	-4.57E+03	1.66E+04	6.88E+02	1.09E+06	3.29E+06	1.66E+06	1.73E+04	3.85E+06	6.39E+06	8.08E+00	4.87
	-1.17E+04	1.26E+04	6.88E+02	-7.22E+05	3.82E+06	-8.39E+06	1.73E+04	9.25E+06	6.39E+06	4.85E+00	7.02
SG側直管	-1.72E+04	-6.88E+02	6.30E+02	-3.38E+06	1.30E+07	2.72E+06	1.73E+04	1.37E+07	6.39E+06	2.14	

$$\text{直管} \quad \sigma = \frac{M}{Z} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{Z}$$

$$\text{エルボ端部} \quad \sigma = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{Z}$$

$$\text{エルボ中央} \quad \sigma = B_2 \cdot \frac{M}{Z} = B_2 \cdot \frac{M \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{Z}$$

$$B_2 = \frac{1.30}{\lambda^{2/3}} \quad \lambda = \frac{lR}{r^2}$$

表 2.2.1-3 2次系ホットレグ配管解析結果（コモンデッキ上下変位差：20mm）

	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N-mm)	$M_y$ (N-mm)	$M_z$ (N-mm)	$F$ (N)	$M$ (N-mm)	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$B_2$ or $0.6B_2$	M/Z (MPa)
IHX側直管	3.84E+03	-5.77E+04	-3.12E+05	-6.27E+08	1.53E+09	-3.25E+08	3.18E+05	1.68E+09	6.39E+06		263.61
エルボ1 端部	4.32E+03	5.77E+04	3.12E+05	-6.27E+08	-2.95E+07	4.90E+07	3.18E+05	6.29E+08	6.39E+06	3.70E+00	364.79
中央	-3.76E+04	4.40E+04	3.12E+05	-5.35E+08	-1.94E+08	-2.09E+06	3.18E+05	5.69E+08	6.39E+06	6.17E+00	549.42
エルボ1 端部	-5.77E+04	3.84E+03	3.12E+05	-3.46E+08	-2.49E+08	-2.60E+07	3.18E+05	4.27E+08	6.39E+06	3.70E+00	247.56
エルボ2 端部	2.24E+05	6.79E+05	3.84E+03	-3.02E+08	1.74E+08	6.09E+08	7.15E+05	7.01E+08	6.39E+06	4.85E+00	532.82
中央	-3.30E+05	6.34E+05	3.84E+03	-3.37E+08	-9.29E+07	1.58E+08	7.15E+05	3.83E+08	6.39E+06	8.08E+00	485.10
エルボ2 端部	-5.45E+05	4.63E+05	3.84E+03	-2.78E+08	-2.11E+08	-2.38E+08	7.15E+05	4.22E+08	6.39E+06	4.85E+00	320.61
エルボ3 端部	8.59E+02	4.45E+02	8.21E+03	-4.79E+07	1.01E+07	7.42E+06	8.26E+03	4.95E+07	6.39E+06	4.85E+00	37.61
中央	3.64E+02	8.96E+02	8.21E+03	-4.46E+07	-1.91E+07	7.02E+06	8.26E+03	4.90E+07	6.39E+06	8.08E+00	62.03
エルボ3 端部	-4.44E+01	9.66E+02	8.21E+03	-3.44E+07	-3.13E+07	6.46E+06	8.26E+03	4.70E+07	6.39E+06	4.85E+00	35.68
エルボ4 中央	-9.15E+02	-3.14E+02	-8.21E+03	1.36E+05	1.08E+07	-3.38E+06	8.26E+03	1.13E+07	6.39E+06	4.85E+00	8.57
エルボ4 端部	-4.44E+01	-8.82E+02	-8.21E+03	-5.65E+06	2.59E+06	-2.96E+06	8.26E+03	6.89E+06	6.39E+06	8.08E+00	8.72
エルボ5 端部	6.03E+03	1.70E+04	7.15E+02	2.72E+06	1.85E+06	1.05E+07	1.81E+04	1.10E+07	6.39E+06	4.85E+00	4.99
中央	-4.79E+03	1.74E+04	7.15E+02	1.07E+06	3.41E+06	1.74E+06	1.81E+04	3.97E+06	6.39E+06	8.08E+00	5.03
エルボ5 端部	-1.23E+04	1.32E+04	7.15E+02	-7.97E+05	3.92E+06	-8.78E+06	1.81E+04	9.65E+06	6.39E+06	4.85E+00	7.33
SG側直管	-1.80E+04	-7.15E+02	6.52E+02	-3.51E+06	1.36E+07	2.76E+06	1.81E+04	1.43E+07	6.39E+06		2.24

直管  $\sigma = \frac{M}{Z} = \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$

エルボ端部  $\sigma = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$

$B_2 = \frac{1.30}{\lambda^{2/3}}$        $\lambda = \frac{tR}{r^2}$

表 2.2.1-4 2 次系ホットレグ配管解析結果（コモンデッキ上下変位差 : 25mm）

	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N-mm)	$M_y$ (N-mm)	$M_z$ (N-mm)	$F$ (N)	$M$ (N-mm)	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$B_2 \text{or} 0.6B_2$	$M/Z$ (MPa)
IHX側直管	4.13E+03	-5.75E+04	-3.16E+05	-6.47E+08	1.54E+09	-3.24E+08	3.21E+05	1.71E+09	6.39E+06		267.12
エルボ1 端部	4.60E+03	5.74E+04	3.16E+05	-6.47E+08	-2.71E+07	4.97E+07	3.21E+05	6.49E+08	6.39E+06	3.70E+00	376.30
エルボ1 中央	-3.72E+04	4.40E+04	3.16E+05	-5.52E+08	-2.03E+08	-1.32E+06	3.21E+05	5.88E+08	6.39E+06	6.17E+00	568.04
エルボ1 端部	-5.75E+04	4.13E+03	3.16E+05	-3.53E+08	-2.64E+08	-2.54E+07	3.21E+05	4.42E+08	6.39E+06	3.70E+00	256.00
エルボ2 端部	2.24E+05	6.79E+05	4.13E+03	-3.08E+08	1.77E+08	6.09E+08	7.15E+05	7.05E+08	6.39E+06	4.85E+00	535.46
エルボ2 中央	-3.30E+05	6.34E+05	4.13E+03	-3.43E+08	-9.48E+07	1.58E+08	7.15E+05	3.90E+08	6.39E+06	8.08E+00	493.22
エルボ2 端部	-5.45E+05	4.63E+05	4.13E+03	-2.83E+08	-2.15E+08	-2.38E+08	7.15E+05	4.28E+08	6.39E+06	4.85E+00	324.91
エルボ3 端部	8.74E+02	4.54E+02	8.38E+03	-4.89E+07	1.03E+07	7.55E+06	8.44E+03	5.06E+07	6.39E+06	4.85E+00	38.41
エルボ3 中央	3.70E+02	9.12E+02	8.38E+03	-4.56E+07	-1.95E+07	7.14E+06	8.44E+03	5.01E+07	6.39E+06	8.08E+00	63.37
エルボ3 端部	-4.61E+01	9.83E+02	8.38E+03	-3.52E+07	-3.19E+07	6.57E+06	8.44E+03	4.80E+07	6.39E+06	4.85E+00	36.46
エルボ4 端部	-9.31E+02	-3.19E+02	-8.38E+03	1.01E+05	1.10E+07	-3.44E+06	8.44E+03	1.16E+07	6.39E+06	4.85E+00	8.79
エルボ4 中央	-4.04E+02	-8.98E+02	-8.38E+03	-5.84E+06	2.66E+06	-3.01E+06	8.44E+03	7.09E+06	6.39E+06	8.08E+00	8.97
エルボ4 端部	-4.61E+01	-9.83E+02	-8.38E+03	-4.41E+06	-4.49E+06	-2.46E+06	8.44E+03	6.76E+06	6.39E+06	4.85E+00	5.13
エルボ5 端部	6.16E+03	1.74E+04	7.28E+02	2.74E+06	1.89E+06	1.08E+07	1.85E+04	1.13E+07	6.39E+06	4.85E+00	8.56
エルボ5 中央	-4.90E+03	1.78E+04	7.28E+02	1.06E+06	3.46E+06	1.78E+06	1.85E+04	4.03E+06	6.39E+06	8.08E+00	5.11
エルボ5 端部	-1.26E+04	1.35E+04	7.28E+02	-8.34E+05	3.98E+06	-8.98E+06	1.85E+04	9.85E+06	6.39E+06	4.85E+00	7.48
SG側直管	-1.84E+04	-7.28E+02	6.63E+02	-3.58E+06	1.39E+07	2.78E+06	1.85E+04	1.46E+07	6.39E+06	2.29	

$$\text{直管 } \sigma = \frac{M}{Z} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{Z}$$

$$\text{エルボ端部 } \sigma = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$\text{エルボ中央 } \sigma = B_2 \cdot \frac{M}{Z} = B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$B_2 = \frac{1.30}{\lambda^{2/3}} \quad \lambda = \frac{tR}{r^2}$$

表 2.2.1-5 2 次系ホックトレグ配管解析結果 (コモンデッキ上下変位差 : 30mm)

	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N-mm)	$M_y$ (N-mm)	$M_z$ (N-mm)	$F$ (N)	$M$ (N-mm)	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$B_2$ or $0.6B_2$	$M/Z$ (MPa)
IHX側直管	4.41E+03	-5.73E+04	-3.20E+05	-6.67E+08	1.56E+09	-3.24E+08	3.25E+05	1.73E+09	6.39E+06		270.64
エルボ 1 端部	4.89E+03	5.72E+04	3.20E+05	-6.67E+08	-2.48E+07	5.04E+07	3.25E+05	6.69E+08	6.39E+06	3.70E+00	387.82
エルボ 1 中央	-3.69E+04	4.40E+04	3.20E+05	-5.69E+08	-2.12E+08	-5.45E+05	3.25E+05	6.07E+08	6.39E+06	6.17E+00	586.68
エルボ 1 端部	-5.73E+04	4.41E+03	3.20E+05	-3.60E+08	-2.79E+08	-2.48E+07	3.25E+05	4.56E+08	6.39E+06	3.70E+00	264.54
エルボ 2 端部	2.24E+05	6.79E+05	4.41E+03	-3.15E+08	1.81E+08	6.09E+08	7.15E+05	7.08E+08	6.39E+06	4.85E+00	538.13
エルボ 2 中央	-3.30E+05	6.34E+05	4.41E+03	-3.50E+08	-9.68E+07	1.58E+08	7.15E+05	3.96E+08	6.39E+06	8.08E+00	501.37
エルボ 2 端部	-5.44E+05	4.63E+05	4.41E+03	-2.89E+08	-2.19E+08	-2.38E+08	7.15E+05	4.33E+08	6.39E+06	4.85E+00	329.25
エルボ 3 端部	8.88E+02	4.62E+02	8.55E+03	-4.99E+07	1.06E+07	7.68E+06	8.61E+03	5.16E+07	6.39E+06	4.85E+00	39.22
エルボ 3 中央	3.76E+02	9.28E+02	8.55E+03	-4.65E+07	-1.98E+07	7.26E+06	8.61E+03	5.11E+07	6.39E+06	8.08E+00	64.71
エルボ 3 端部	-4.77E+01	1.00E+03	8.55E+03	-3.60E+07	-3.26E+07	6.68E+06	8.61E+03	4.90E+07	6.39E+06	4.85E+00	37.23
エルボ 4 端部	-9.48E+02	-3.23E+02	-8.55E+03	6.63E+04	1.13E+07	-3.50E+06	8.61E+03	1.19E+07	6.39E+06	4.85E+00	9.01
エルボ 4 中央	-4.12E+02	-9.13E+02	-8.55E+03	-6.02E+06	2.72E+06	-3.07E+06	8.61E+03	7.29E+06	6.39E+06	8.08E+00	9.23
エルボ 4 端部	-4.77E+01	-1.00E+03	-8.55E+03	-4.57E+06	-4.60E+06	-2.50E+06	8.61E+03	6.95E+06	6.39E+06	4.85E+00	5.28
エルボ 5 端部	6.29E+03	1.78E+04	7.41E+02	2.76E+06	1.94E+06	1.10E+07	1.89E+04	1.15E+07	6.39E+06	4.85E+00	8.74
エルボ 5 中央	-5.01E+03	1.82E+04	7.41E+02	1.05E+06	3.52E+06	1.82E+06	1.89E+04	4.10E+06	6.39E+06	8.08E+00	5.18
エルボ 5 端部	-1.28E+04	1.38E+04	7.41E+02	-8.72E+05	4.03E+06	-9.17E+06	1.89E+04	1.01E+07	6.39E+06	4.85E+00	7.64
SG側直管	-1.88E+04	-7.41E+02	6.74E+02	-3.64E+06	1.42E+07	2.80E+06	1.89E+04	1.49E+07	6.39E+06		2.33

$$\text{直管} \quad \sigma = \frac{M}{Z} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{Z}$$

$$\text{エルボ端部} \quad \sigma = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$\text{エルボ中央} \quad \sigma = B_2 \cdot \frac{M}{Z} = B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$B_2 = \frac{1.30}{\lambda^{2/3}} \quad \lambda = \frac{tR}{r^2}$$

表 2.2.1-6 2 次系ホットレグ配管解析結果（コモンデッキ上下変位差：40mm）

		$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (N-mm)	$M_y$ (N-mm)	$M_z$ (N-mm)	$F$ (N)	$M$ (N-mm)	$Z$ (mm <sup>3</sup> )	$B_2$ or $0.6B_2$	M/Z (MPa)
IHX側直管	端部	4.98E+03	-5.68E+04	-3.28E+05	-7.06E+08	1.59E+09	-3.23E+08	3.33E+05	1.77E+09	6.39E+06		277.72
エルボ1	中央	5.45E+03	5.68E+04	3.28E+05	-7.07E+08	-2.01E+07	5.17E+07	3.33E+05	7.09E+08	6.39E+06	3.70E+00	410.86
エルボ1	端部	-3.61E+04	4.41E+04	3.28E+05	-6.03E+08	-2.30E+08	1.00E+06	3.33E+05	6.46E+08	6.39E+06	6.17E+00	623.96
エルボ2	中央	-5.68E+04	4.98E+03	3.28E+05	-3.74E+08	-3.10E+08	-2.36E+07	3.33E+05	4.86E+08	6.39E+06	3.70E+00	281.83
エルボ2	端部	2.25E+05	6.78E+05	4.98E+03	-3.27E+08	1.87E+08	6.08E+08	7.14E+05	7.16E+08	6.39E+06	4.85E+00	543.59
エルボ3	中央	-3.29E+05	6.34E+05	4.98E+03	-3.63E+08	-1.01E+08	1.58E+08	7.14E+05	4.09E+08	6.39E+06	8.08E+00	517.72
エルボ3	端部	-5.44E+05	4.63E+05	4.98E+03	-3.00E+08	-2.27E+08	-2.38E+08	7.14E+05	4.45E+08	6.39E+06	4.85E+00	338.00
エルボ4	中央	9.18E+02	4.80E+02	8.90E+03	-5.20E+07	1.12E+07	7.94E+06	8.96E+03	5.38E+07	6.39E+06	4.85E+00	40.84
エルボ4	端部	3.87E+02	9.61E+02	8.90E+03	-4.85E+07	-2.06E+07	7.51E+06	8.96E+03	5.32E+07	6.39E+06	8.08E+00	67.39
エルボ5	中央	-5.10E+01	1.03E+03	8.90E+03	-3.76E+07	-3.39E+07	6.90E+06	8.96E+03	5.11E+07	6.39E+06	4.85E+00	38.79
エルボ5	端部	-9.81E+02	-3.33E+02	-8.90E+03	-3.27E+03	1.19E+07	-3.62E+06	8.96E+03	1.24E+07	6.39E+06	4.85E+00	9.44
SG側直管	直管	-4.28E+02	-9.43E+02	-8.90E+03	-6.39E+06	2.85E+06	-3.17E+06	8.96E+03	7.69E+06	6.39E+06	8.08E+00	9.73

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$\text{エルボ端部} \quad \sigma = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} = 0.6 \times B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$\text{エルボ中央} \quad \sigma = B_2 \cdot \frac{M}{Z} = B_2 \cdot \frac{M}{Z} \sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}{Z}}$$

$$B_2 = \frac{1.30}{\lambda^{2/3}} \quad \lambda = \frac{tR}{r^2}$$

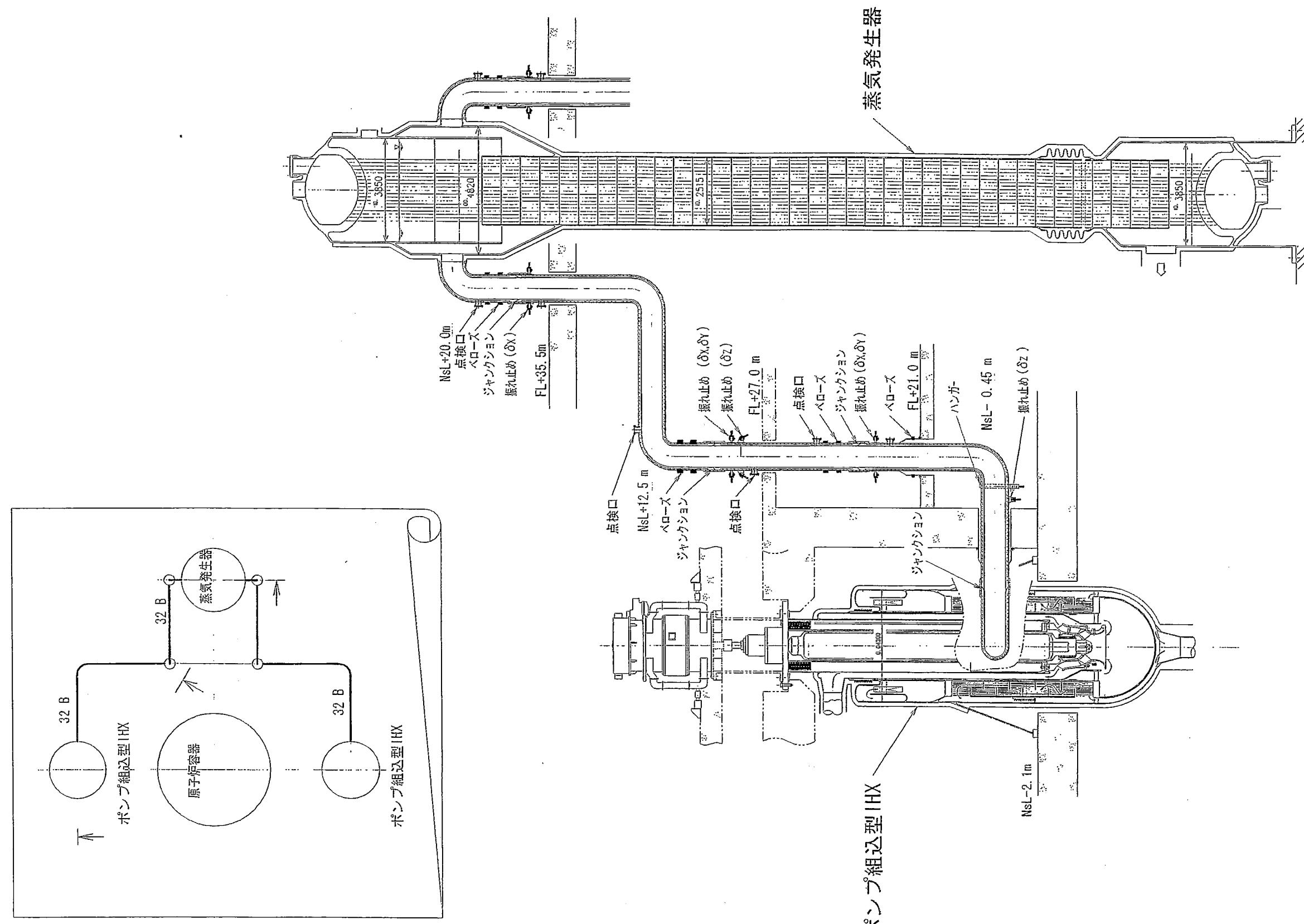


図 2.2.1-1 ナトリウム中型炉 2 次系ホットレグ配管引き回し

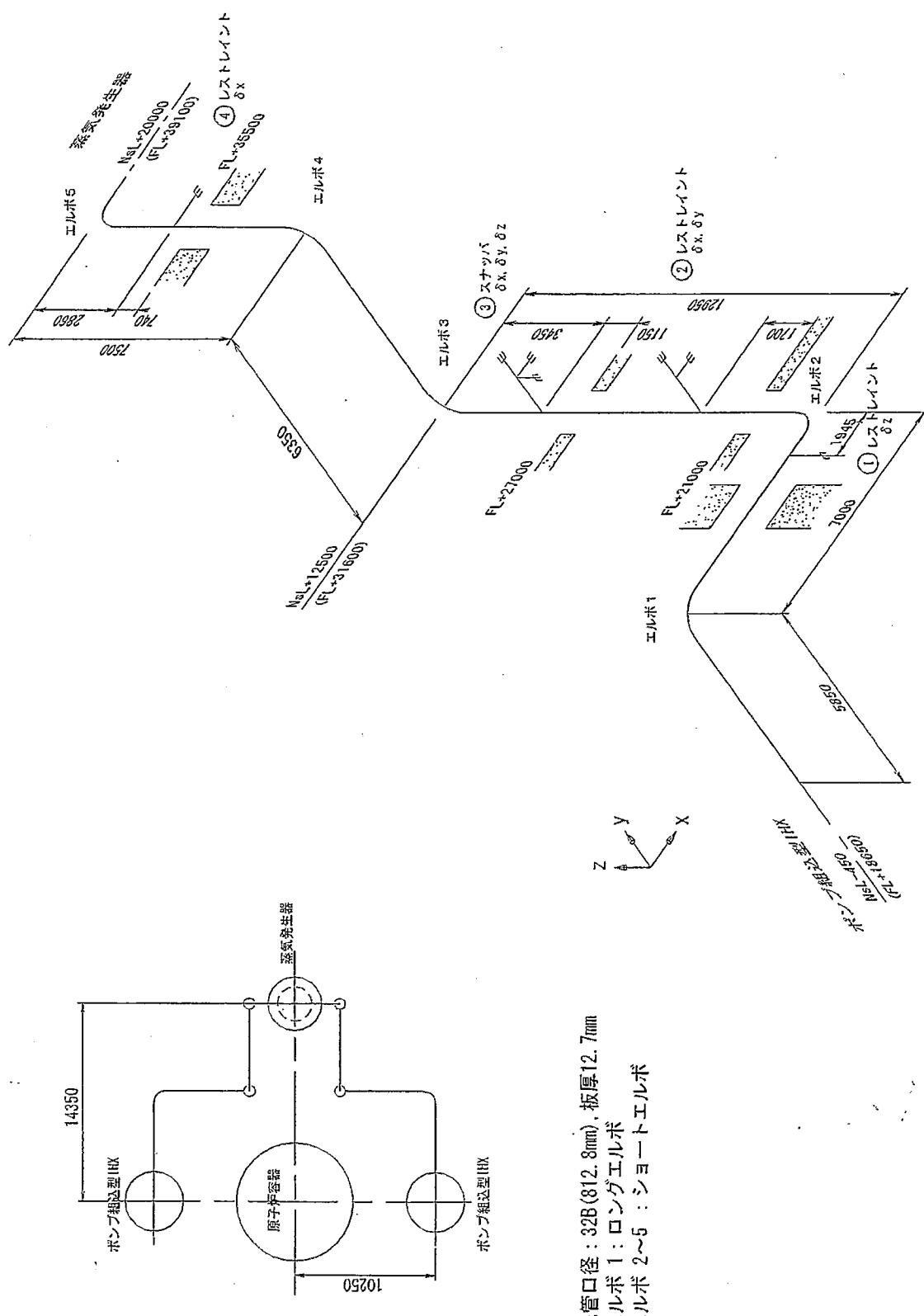


図 2.2.1-2 2 次系水ストレグ配管解析モデル

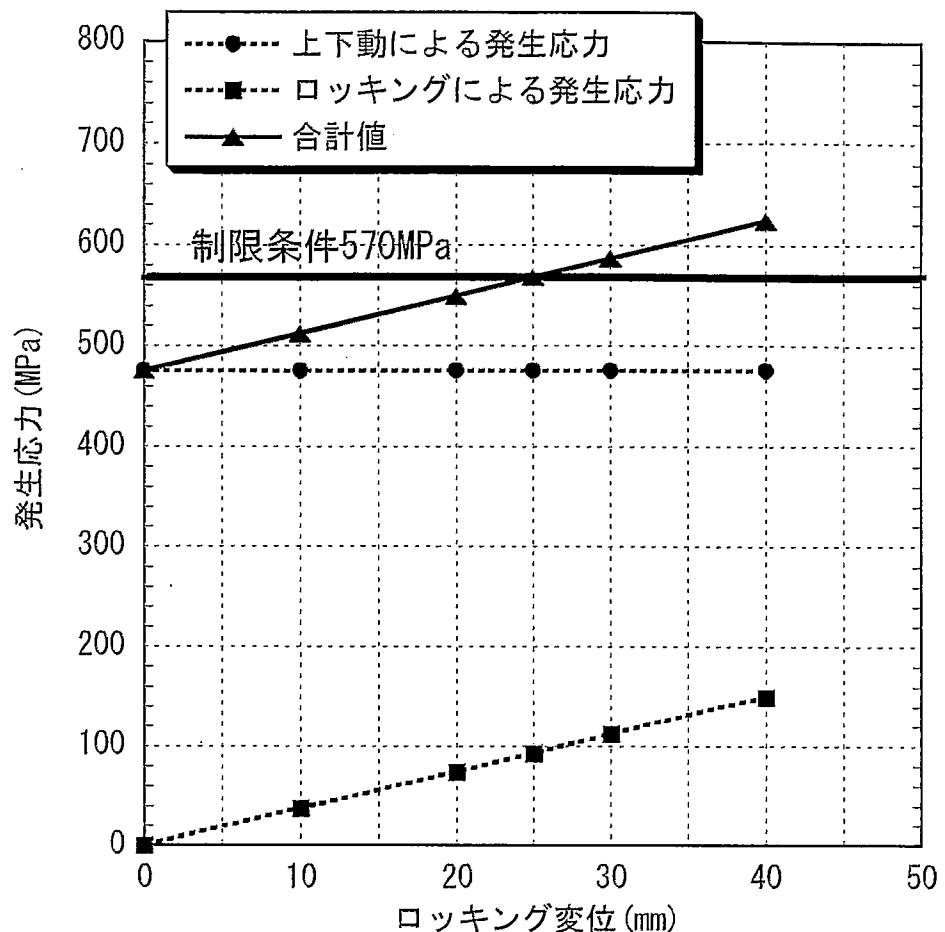


図 2.2.1-3 エルボ 1 (ポンプ組込型 IHX 出口部エルボ) の発生応力

## 2.2.2 コモンデッキの地震応答解析

### 2.2.2.1 検討開始形状での地震応答解析

#### (1) 概要

別途研究「機器上下免震構造の具体化に関する調査 平成15年度」の2.2.2項で設定した形状での地震応答解析を行い耐震成立性見通しの検討を行う。

#### (2) 検討条件

##### a. 地震条件

コモンデッキ取付部の床応答曲線を図2.2.2.1-1に示す。上下方向の床応答曲線は「機器上下免震システムの設計手法の調査及び皿ばねの試作（平成13年度）」で用いたコモンデッキ系の減衰率：10%のものである（コモンデッキ系の減衰率は10%以上確保できる見通しであり、ここでは減衰率：10%で検討を行った）。また、水平方向の床応答曲線は「炉システム共通技術の検討 免震システムの成立性・経済性評価に関する研究（その1）（免震システムの検討）平成13年度」で作成された減衰率：1%のものである。

##### b. 制限条件

S2地震による皿ばね変位 : 100mm以下

S2地震によるコモンデッキの上下変位差 : 25mm以下

#### (3) 検討内容

##### a. 解析モデル

図2.2.2.1-2に示す解析モデルを用いて地震応答解析を行う。解析は汎用FEM解析コードFINASを用いる。

##### b. 解析結果

振動モード図を図2.2.2.1-3に示す。コモンデッキに有意な変位を与える主要なモードは6次モードまでである。以下に主要なモードの説明を示す。

- ・1次モード：短辺方向のロッキングモード
- ・2次モード：長辺方向のロッキングモード
- ・3次モード：全体の上下モード
- ・4次モード：コモンデッキの曲げ変形モード
- ・5次モード：長辺方向のRV振動モード
- ・6次モード：短辺方向のRV振動モード

それぞれ主要なモードについての固有振動数、刺激係数及び固有振動数を床応答に適用して得られる加速度を表 2.2.2.1-1 に示す。また、刺激係数が高い方向に対して、対応した床応答加速度を入力した場合のコモンデッキの応答変位を表 2.2.2.1-2 に示す。同表より初期設定形状では S2 地震時の皿ばね変位が 114mm、コモンデッキの上下変位差が 140mm と成立見通しが得られなかった。初期設定形状の場合には 1 次、2 次モードで、ロッキング変位がそれぞれ 102mm、94mm 発生している。これは機器重量の上下のアンバランスが原因であり、上下のアンバランスを見直す必要がある。また、5 次、6 次の振動モードに対してもそれぞれ約 16mm と約 9mm 上下変位差があり決して小さくはなく注意が必要である。なお、4 次のコモンデッキ曲げ変形モードに対しては、応答変位は非常に小さく問題とはならない。

#### (4) まとめ

検討の結果から以下のことが言える。

- ・1 次、2 次モードで、ロッキング変位がそれぞれ 102mm、94mm 発生している。  
これは機器重量のアンバランスが原因であり、上下のアンバランスを見直す必要がある。
- ・5 次、6 次モードで、ロッキング変位がそれぞれ約 16mm、約 9mm 発生している。  
これは原子炉容器の水平振動に起因するモードであり、コモンデッキの剛性を上げることにより変位を低く抑えられると考えられる。

表 2.2.2.1-1 固有振動数及び入力加速度

モード次数	1	2	3	4	5	6
モード形状	短辺 X 方向 ロッキング	長辺 Y 方向 ロッキング	全体 上下動	デッキ 曲がり変形	長辺 Y 方向 RV 变形	短辺 X 方向 RV 变形
固有振動数(Hz)	1.29	1.35	1.58	4.05	4.23	7.33
固有周期(s)	0.775	0.740	0.632	0.247	0.237	0.136
刺激 係数	短辺 X 方向	0.313	0.000	0.000	0.000	1.404
	長辺 Y 方向	0.000	0.203	0.000	0.000	0.759
	上下 Z 方向	0.000	0.000	1.007	0.001	0.000
入力 加速度 (m/s <sup>2</sup> )	短辺 X 方向	16.70	16.70	13.88	7.80	7.83
	長辺 Y 方向	16.70	16.70	13.88	7.80	7.83
	上下 Z 方向	7.99	8.49	8.84	12.12	12.24
						18.65

表 2.2.2.1-2 コモンデッキ上下変位

		最大値	最小値	$\Delta$ 変位	備考
自重による変位(mm)		99.95	97.25	2.70	
地震力による変位(mm)	1次モード 短辺X方向 ロッキング	50.98	-50.98	101.96	短辺X方向入力応答値
	2次モード 長辺Y方向 ロッキング	46.96	-46.96	93.92	長辺Y方向入力応答値
	3次モード 全体 上下動	90.06	87.68	2.38	上下Z方向入力応答値
	4次モード デッキ 曲がり変形	0.02	-0.01	0.04	上下Z方向入力応答値
	5次モード 長辺Y方向 RV変形	7.94	-7.90	15.80	長辺Y方向入力応答値
	6次モード 短辺X方向 RV変形	4.74	-4.74	9.47	短辺X方向入力応答値
	SRSS 値	114.02		139.87	

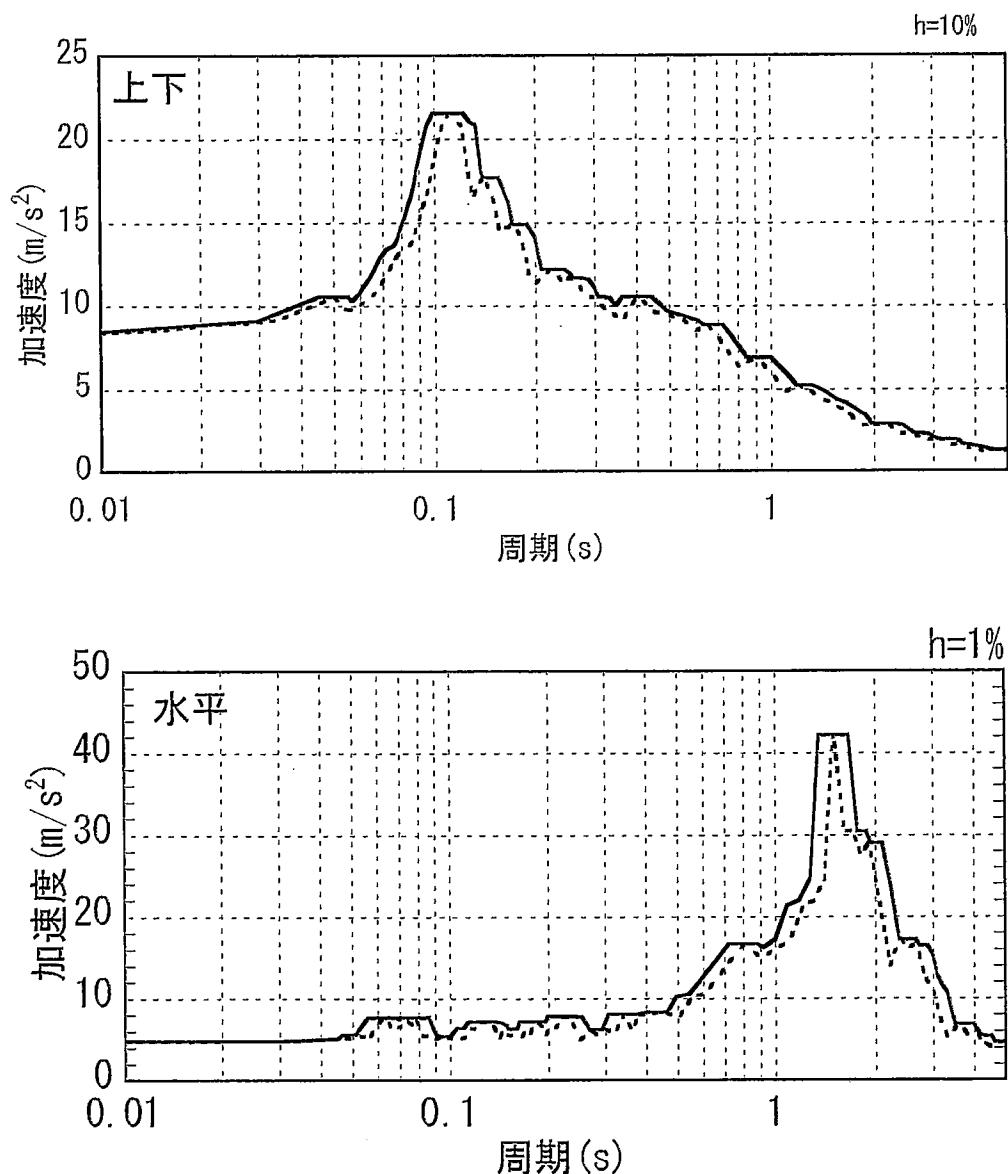
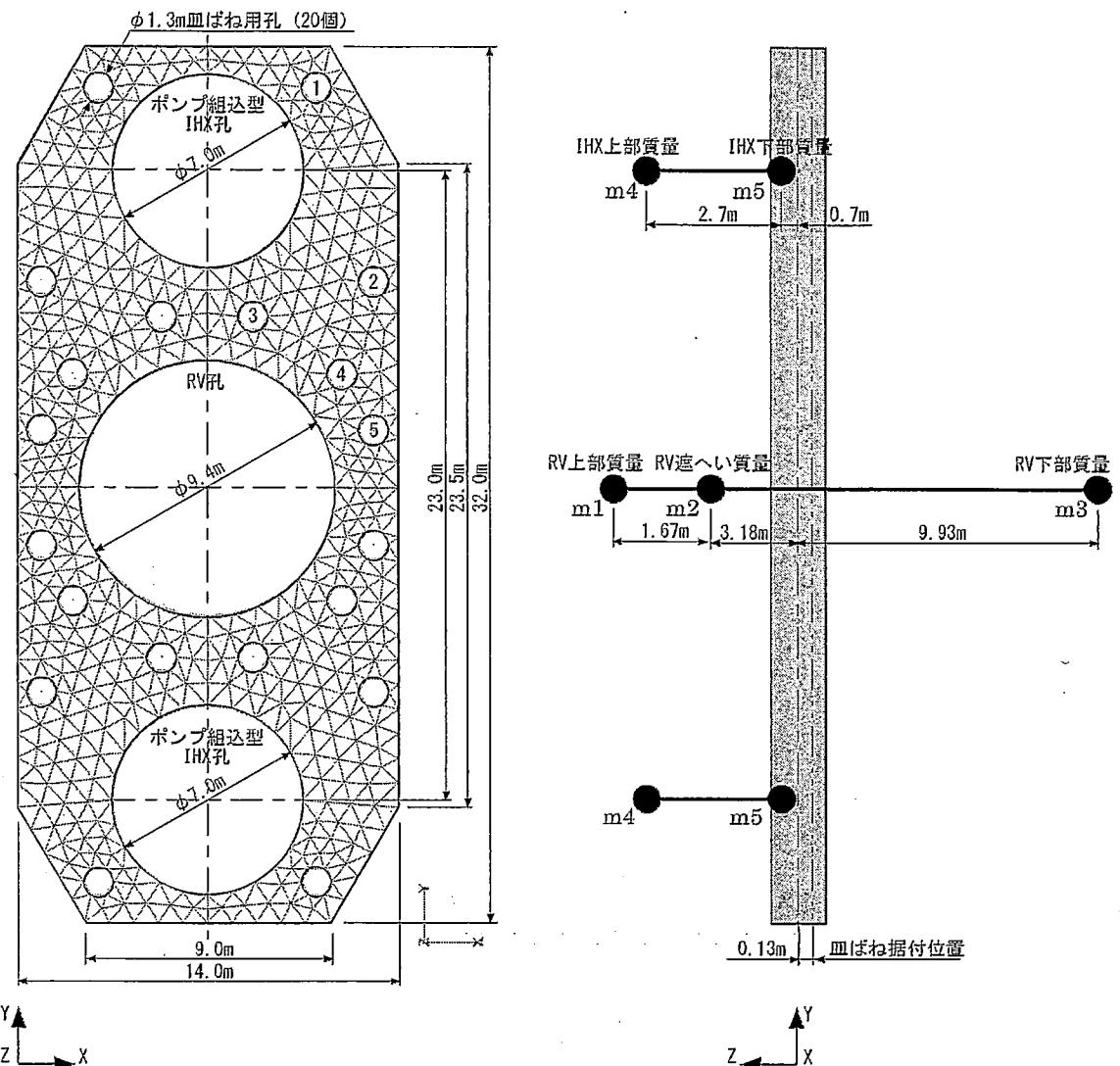


図 2.2.2.1-1 コモンデッキ位置床応答曲線

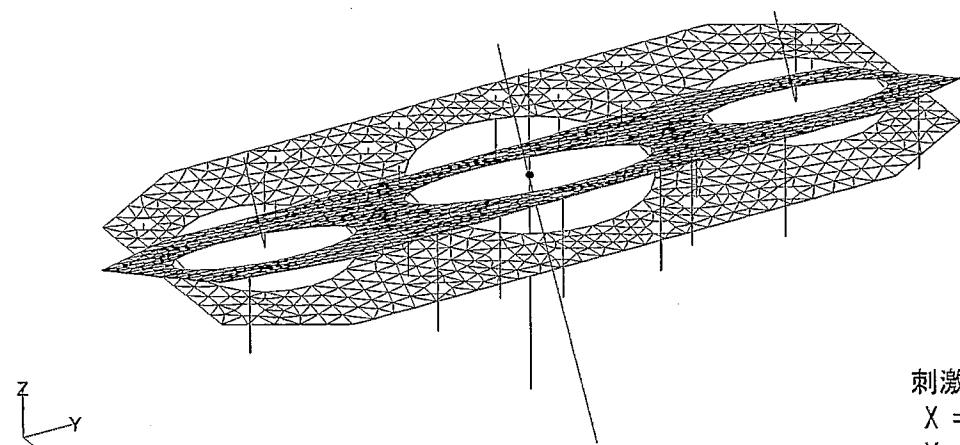


皿ばね位置		
番号	X 座標 (中心より) (m)	Y 座標 (中心より) (m)
1	4.000	14.500
2	6.100	7.500
3	1.670	6.232
4	4.942	4.147
5	6.100	2.100

項目	単位	値	備考
デッキ厚さ	m	2.0	
デッキ等価比重	ton/m <sup>3</sup>	2.702	
デッキ等価ヤング率	N/mm <sup>2</sup>	51000	
デッキ重量	ton	1420	
原子炉構造下部重量	ton	1430	m3
ルーフデッキ廻り遮へい重量	ton	370	m2
原子炉構造上部重量	ton	800	m1
IHX・配管重量	ton	900	m5 × 2
IHX廻り遮へい重量	ton	800	m4 × 2
総重量	ton	5720	
原子炉構造 1 次固有振動数	Hz	4.5	
皿ばね 基数	-	20	
皿ばね ばね定数	ton/mm	2.911	上下

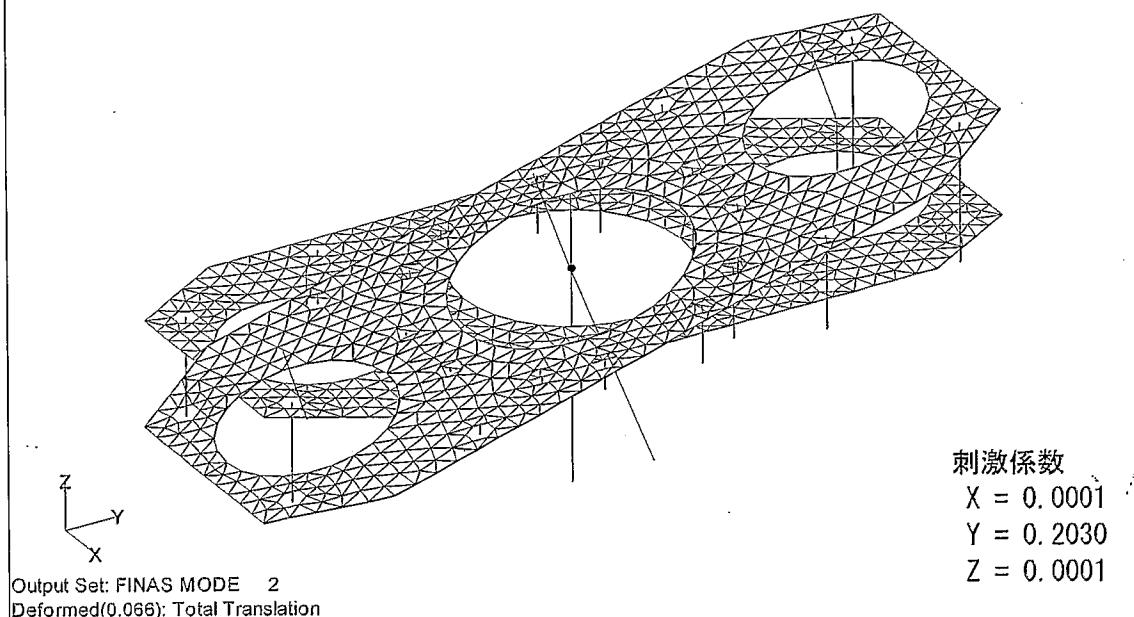
図 2.2.2.1-2 解析モデル

[短辺 X 方向ロッキングモード]



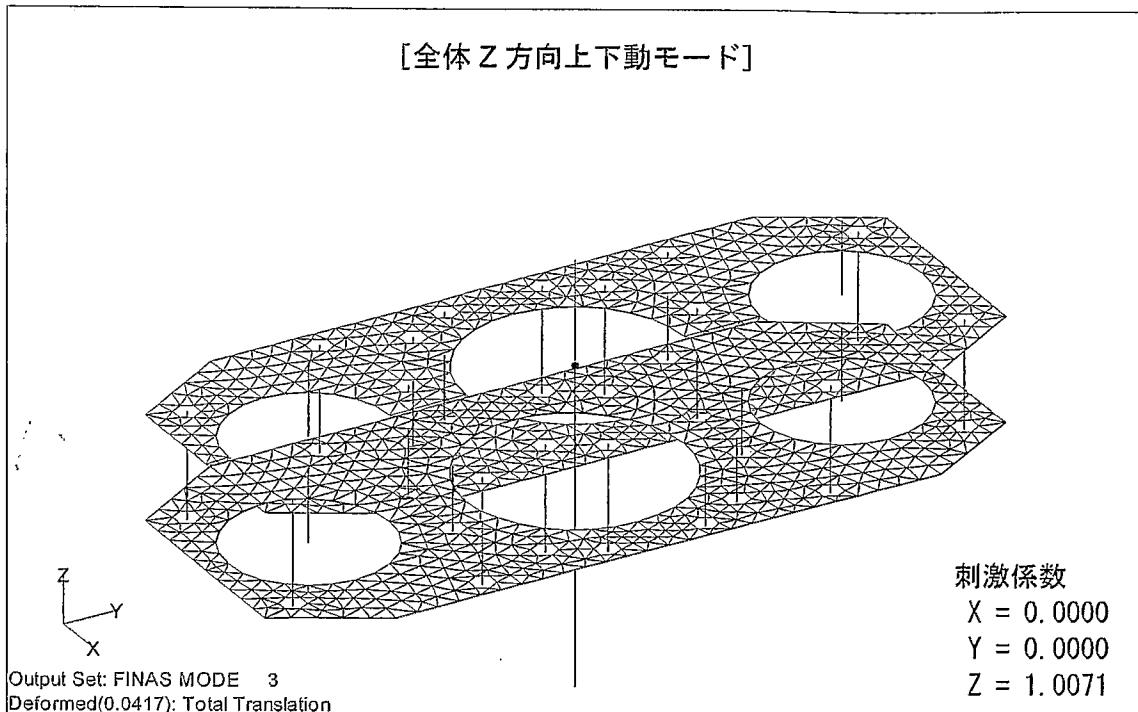
1 次 1.29Hz

[長辺 Y 方向ロッキングモード]

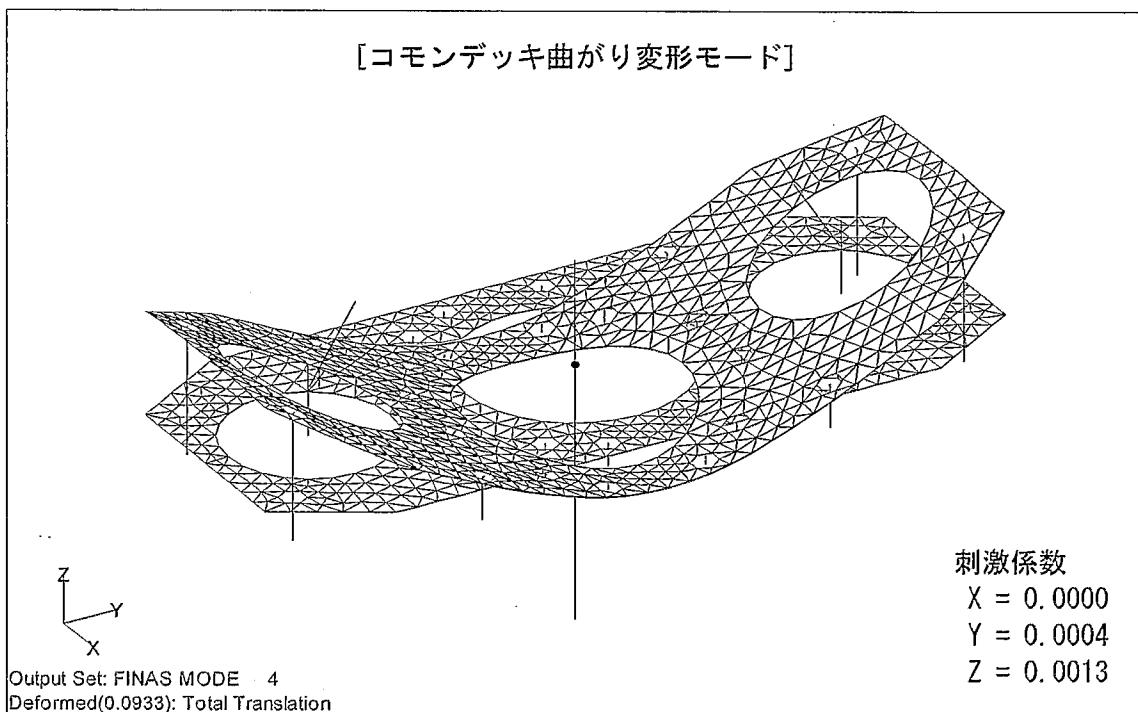


2 次 1.35Hz

図 2.2.2.1-3(1/8) 振動モード

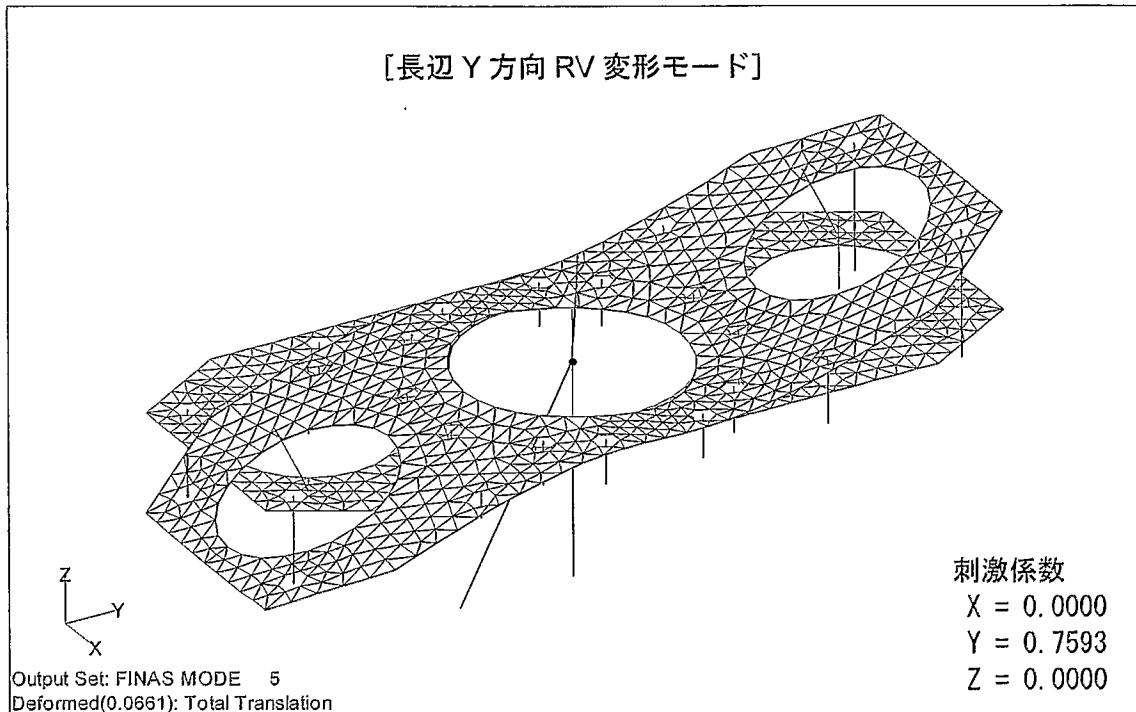


3次 1.58Hz

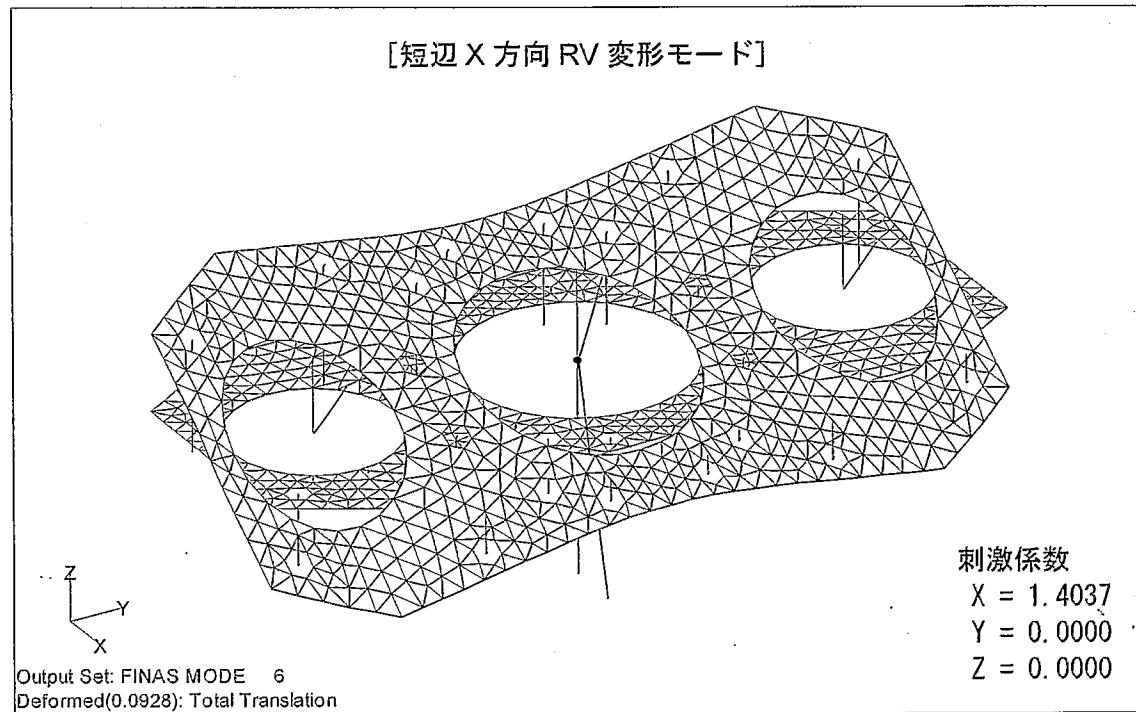


4次 4.05Hz

図 2.2.2.1-3 (2/8) 振動モード

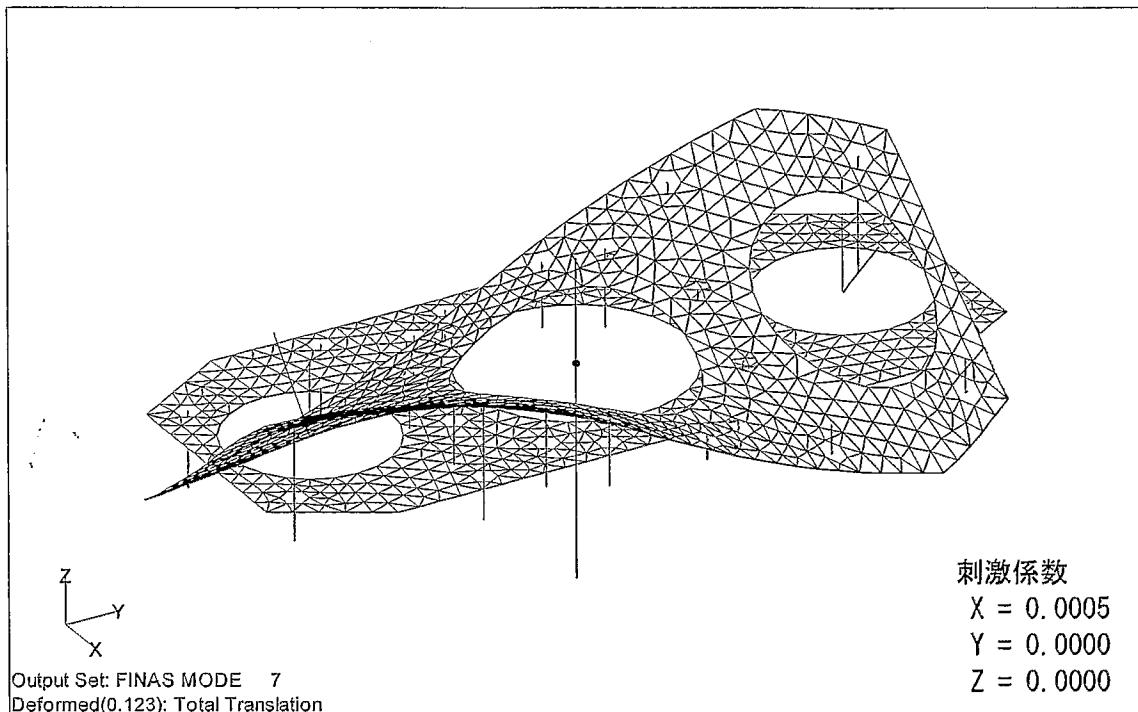


5 次 4.23Hz

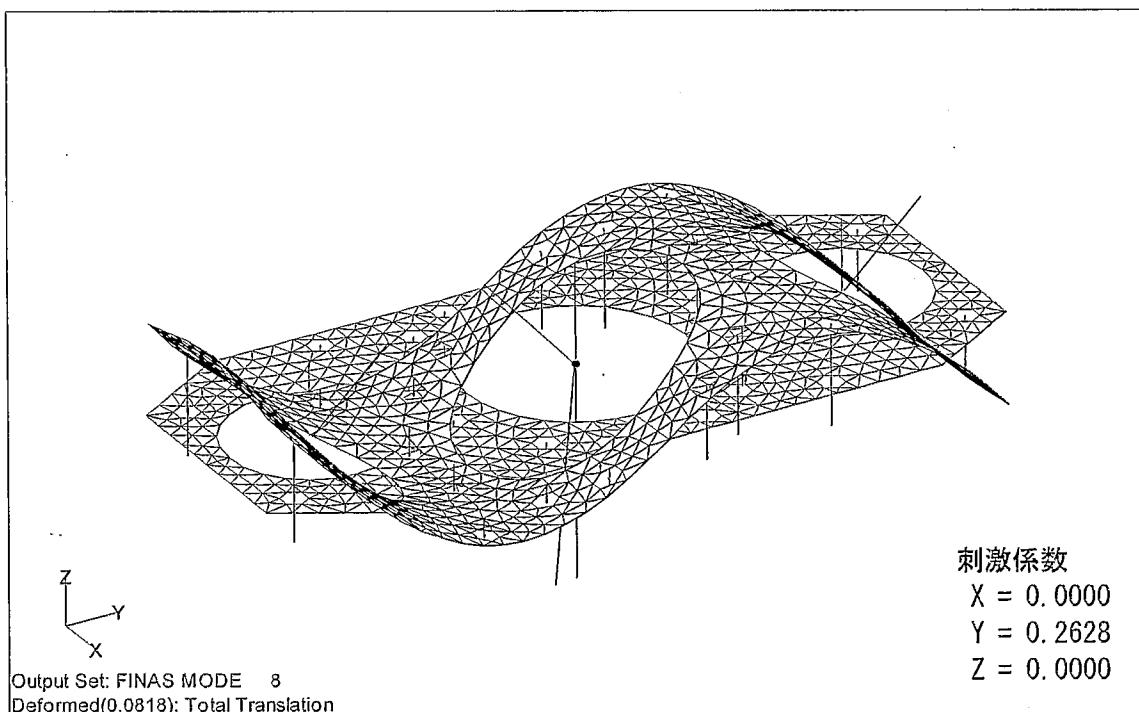


6 次 7.33Hz

図 2.2.2.1-3(3/8) 振動モード

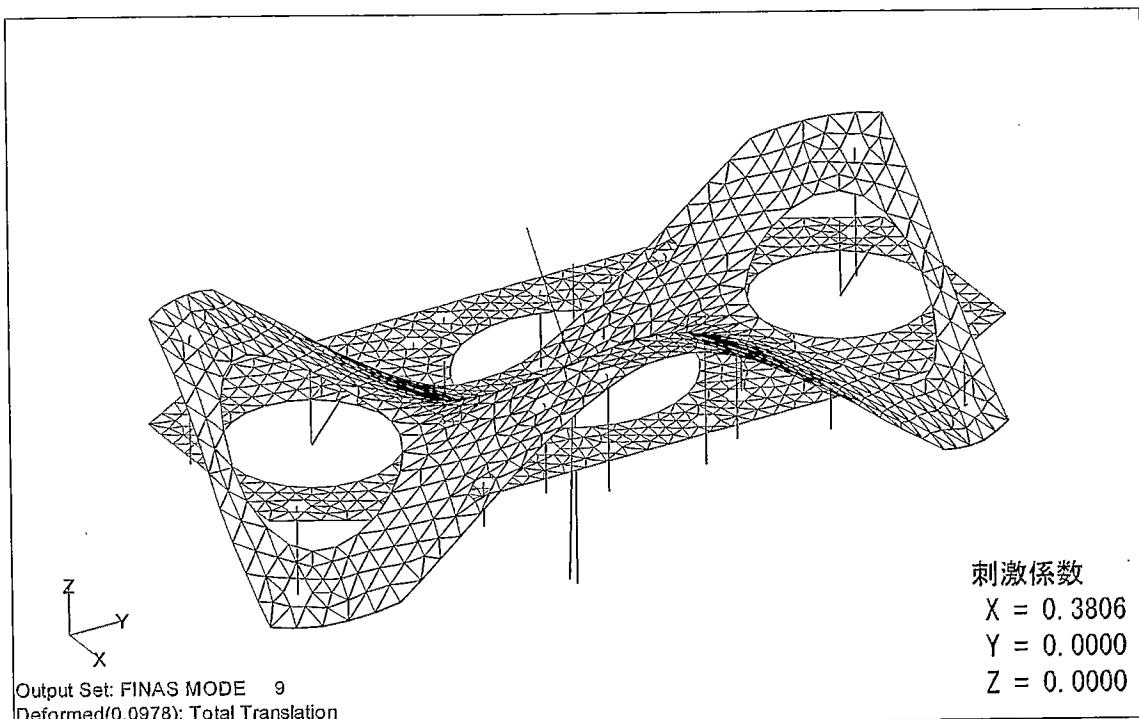


7 次 8.73Hz

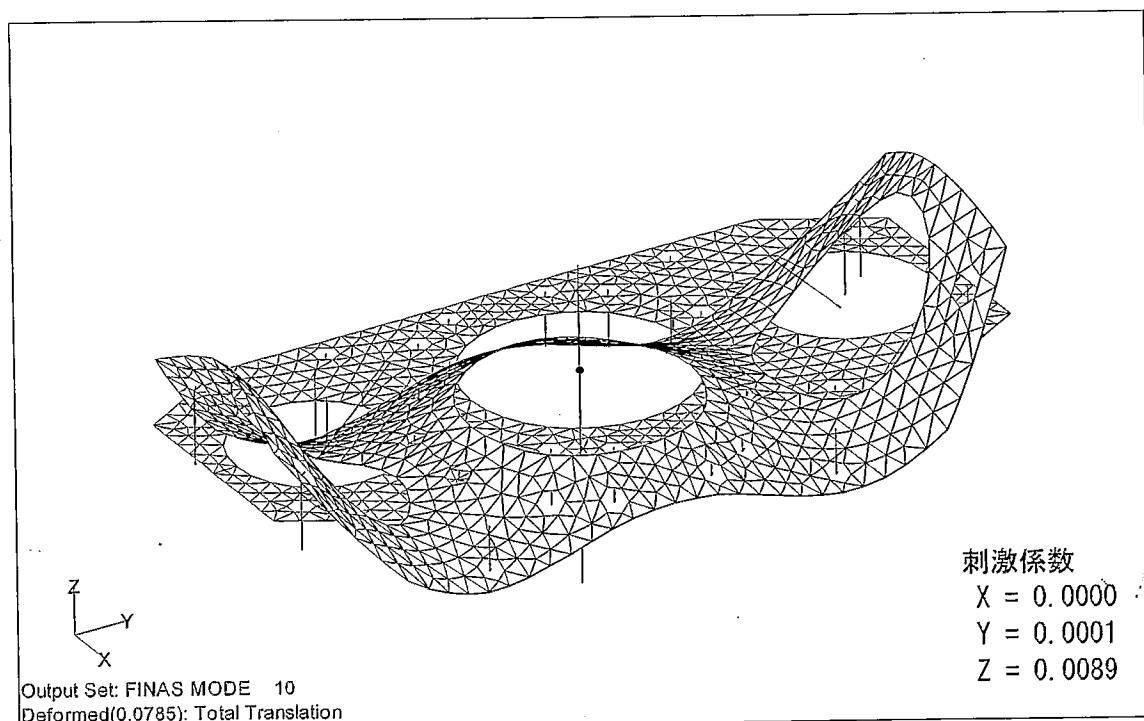


8 次 13.74Hz

図 2.2.2.1-3(4/8) 振動モード

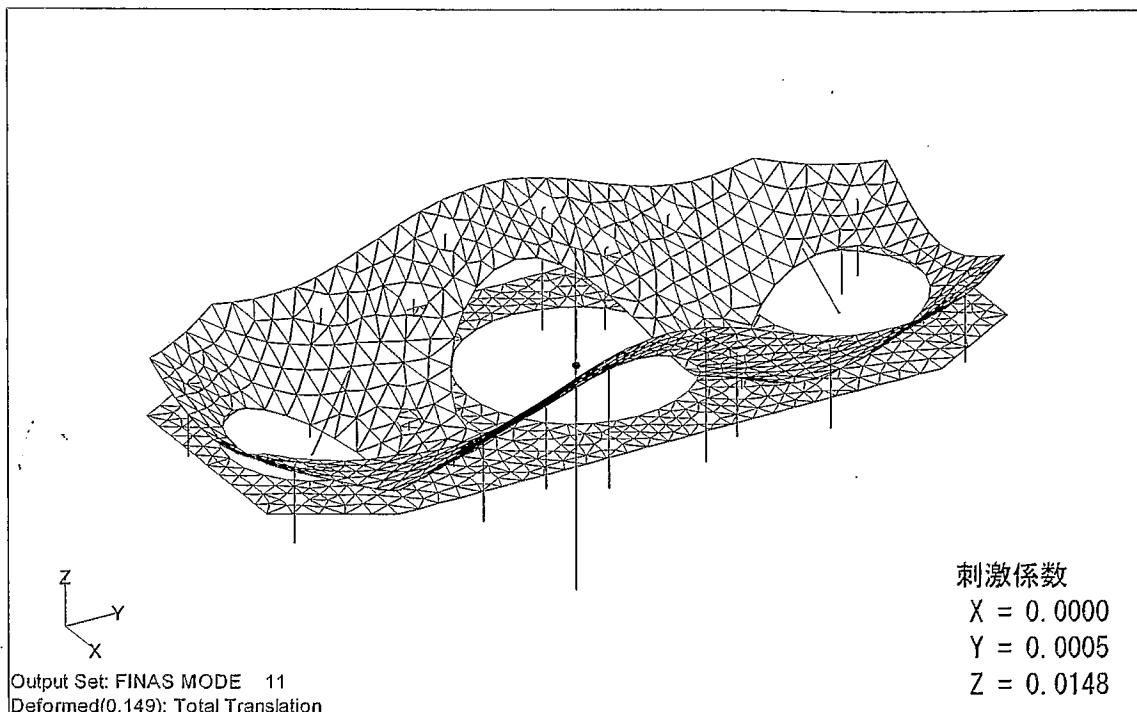


9 次 16.76Hz

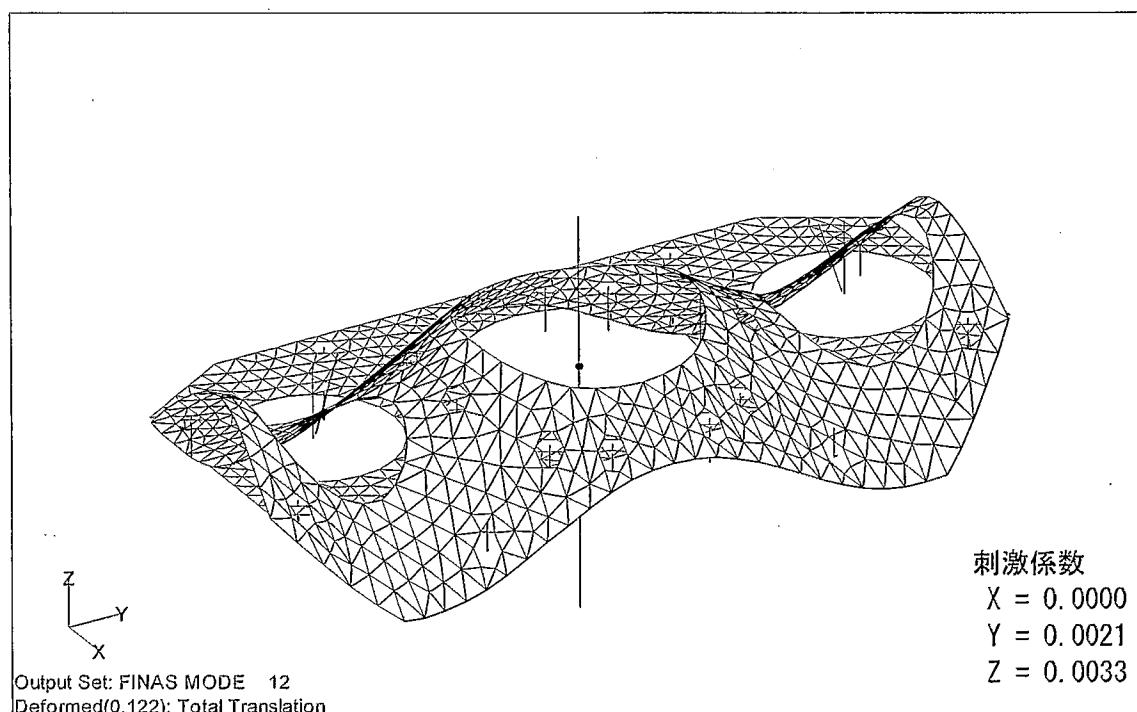


10 次 19.54Hz

図 2.2.2.1-3 (5/8) 振動モード

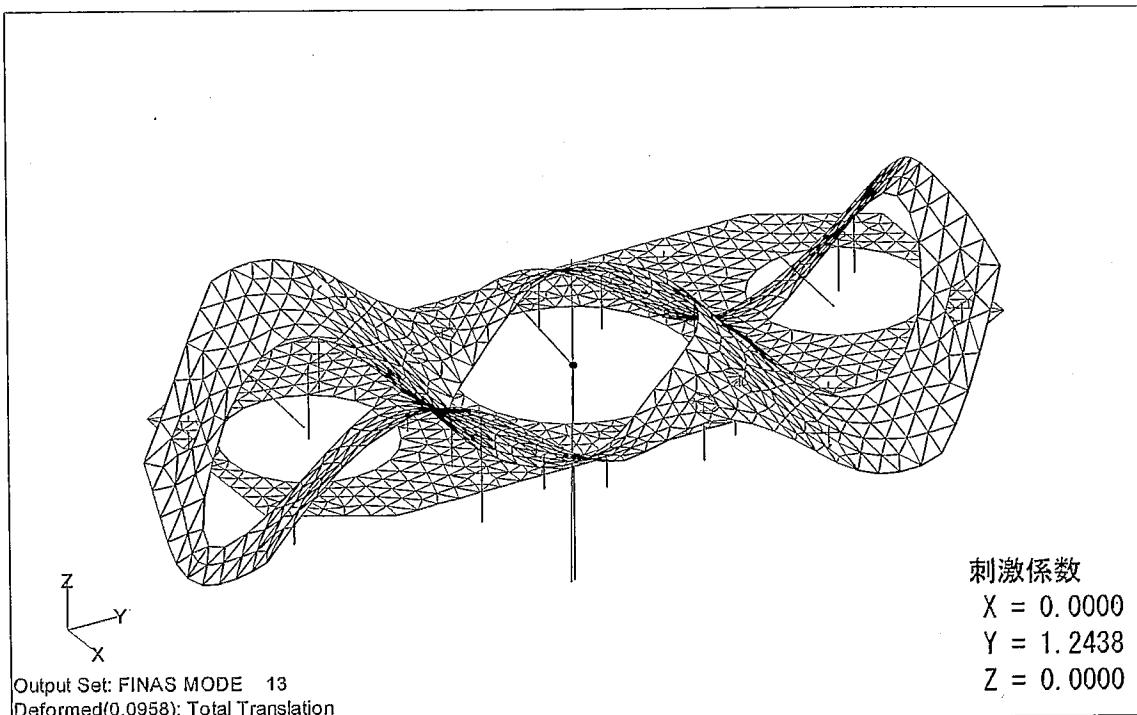


11 次 25.70Hz

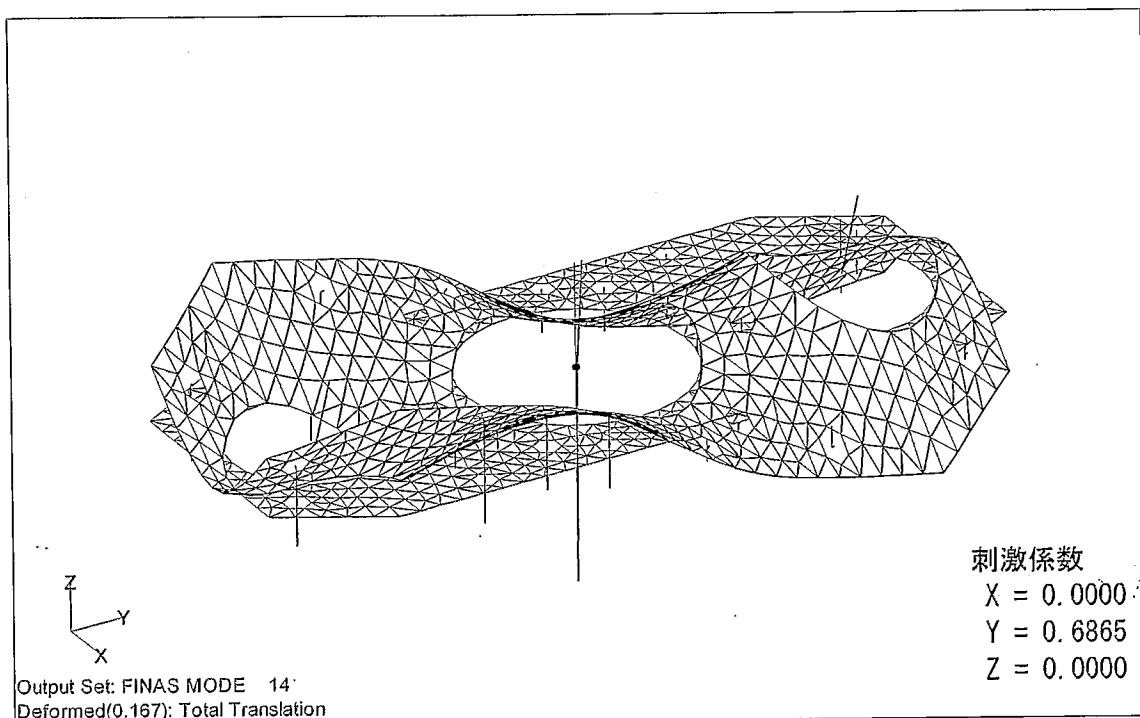


12 次 27.77Hz

図 2.2.2.1-3(6/8) 振動モード

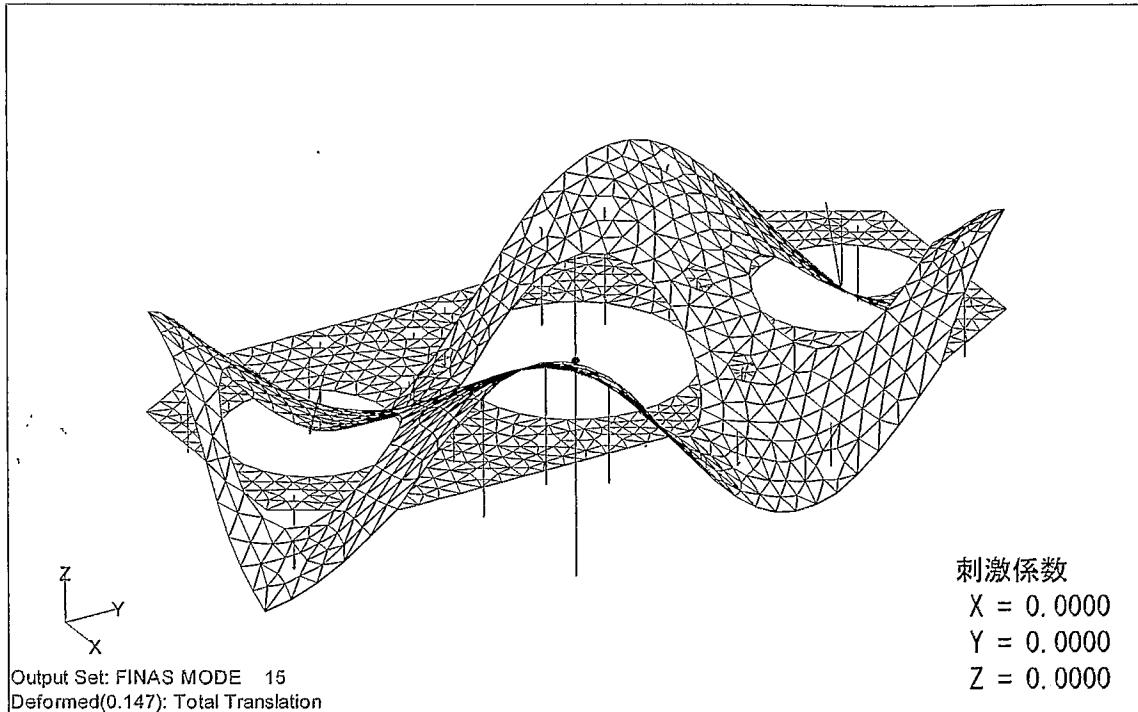


13 次 28.22Hz

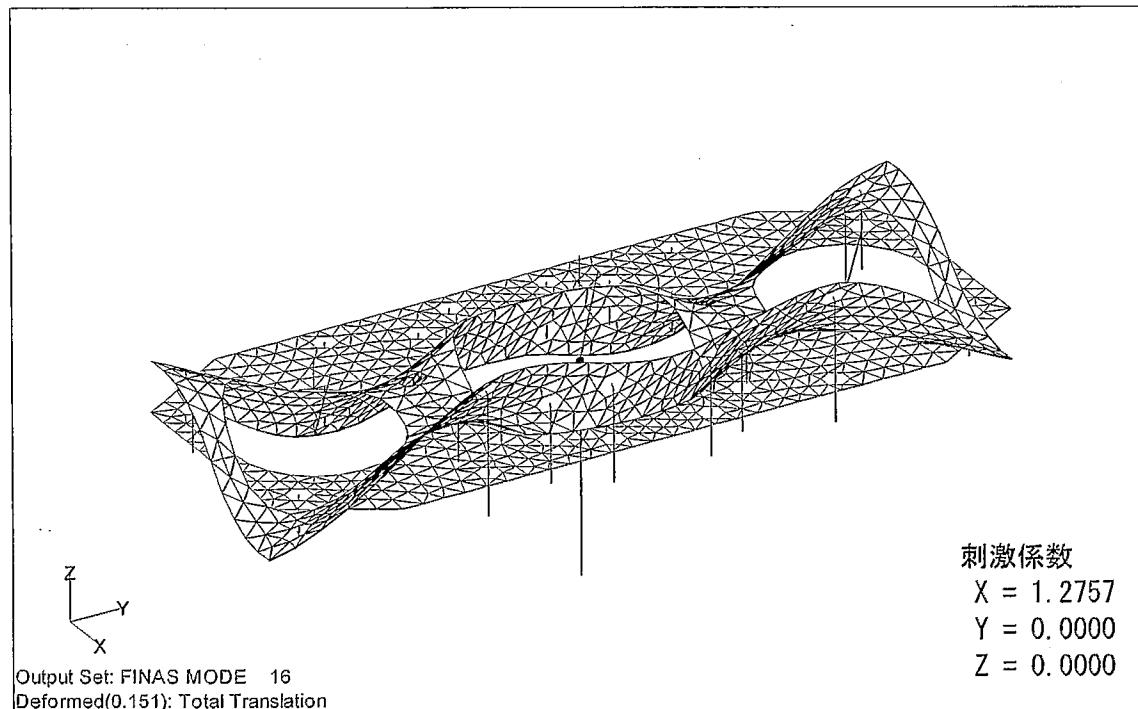


14 次 34.01Hz

図 2.2.2.1-3(7/8) 振動モード



15 次 35.79Hz



16 次 43.12Hz

図 2.2.2.1-3(8/8) 振動モード

### 2.2.2.2 機器の上下移設量の検討

#### (1) 概要

2.2.2.1 項の検討より初期設定形状は機器重量の上下のアンバランスが原因で 1 次と 2 次のロッキングモードによる応答変位が大きくなる結果となっている。本検討では上下の重量のバランスが最適となる上下移設量を設定する。

#### (2) 地震条件

地震条件を図 2.2.2.1-1 に示す。

#### (3) 検討内容

##### a. 解析モデル

図 2.2.2.1-2 に示す解析モデルに対して、コモンデッキ搭載機器を上方にシフトさせた場合のコモンデッキ板厚中心から見た上下のモーメントバランスを算出し、搭載機器の上下移動量とモーメント偏差の関係を求めた。搭載機器の上下移動量とモーメント偏差の関係及び解析モデルでの搭載機器の移動方法を図 2.2.2.2-1 に示す。この考え方では、搭載機器を上方に約 1.35m シフトさせると、コモンデッキ中心から見た上下のモーメントバランスが釣り合うことが分かる。

##### b. 解析結果

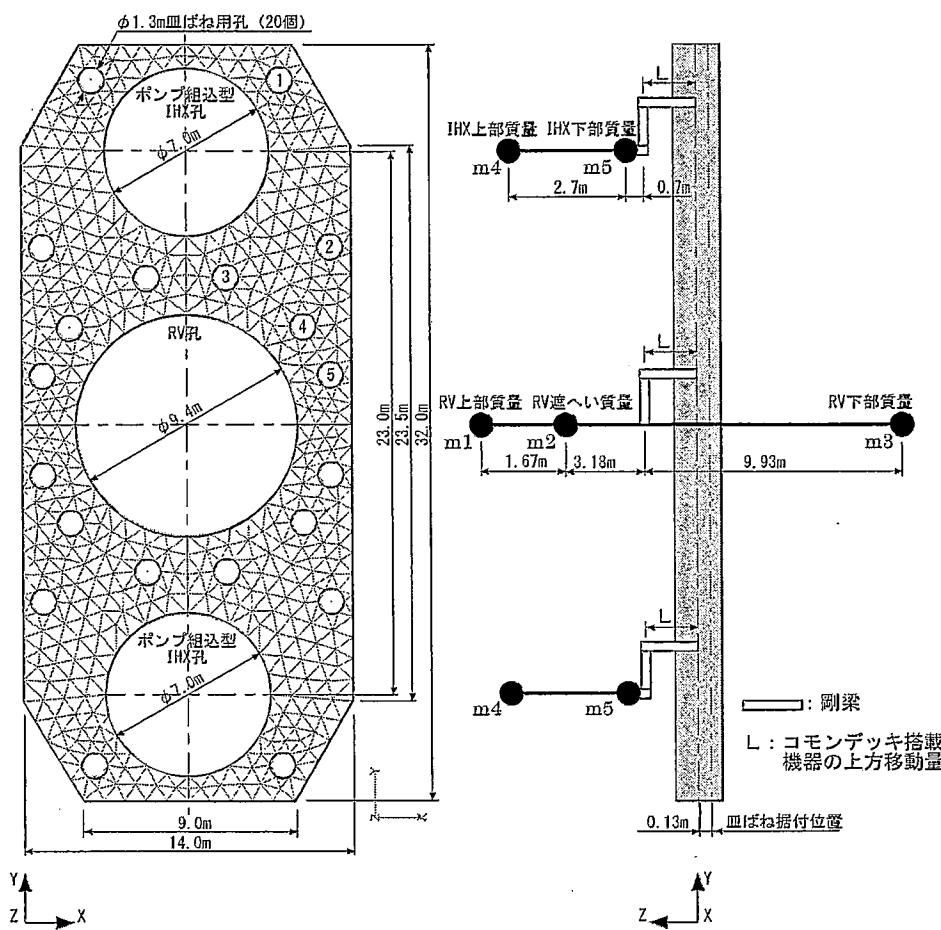
上下移設量をパラメータとして地震時の応答解析を実施し、各主要モードに対する応答変位を求めた。モード毎のコモンデッキ上下変位及び主要モードによる上下応答変位の SRSS 値とモーメント偏差の比の関係を図 2.2.2.2-2、コモンデッキの上下変位差とモーメント偏差の比の関係を図 2.2.2.2-3 に示す。また、同図の横軸を上下移設量で整理した図を図 2.2.2.2-4 と図 2.2.2.2-5 に示す。これらより以下の結論を得た。

- ・機器の上下移設量を 1.5m とすることで発生変位を最も低く抑えることができる。
- ・1 次と 2 次のロッキングモードによるコモンデッキの上下応答変位は上下モーメント偏差比と密接な関係があり、上下モーメントを釣り合わせることにより、応答変位を大きくさげることができる。ただし、コモンデッキ中心から見た上下モーメントを釣り合わせる上下移設量約 1.35m で応答値が最小となるのではなく、1.5m 移動した場合に 1 次と 2 次モードによる上下応答変位が最小になることが分かった。

- ・図 2.2.2-5 に示すように上下移設量の変化に伴うコモンデッキ上下変位差の変化率が大きく、機器重量の上下のアンバランスが大きい場合には大きなコモンデッキ上下変位差が生じる。
- ・5 次と 6 次の RV 変形モードに対する上下応答変位への影響はほとんどない。

(4) まとめ

上下応答変位を低く抑えるためには機器重量の上下のバランスを適切な位置に設定する必要がある。検討対象である Na 中型炉については上下移設量を 1.5m することで発生変位を最も低く抑えることができた。



[デッキ板厚中心から見た上下モーメント偏差の比]

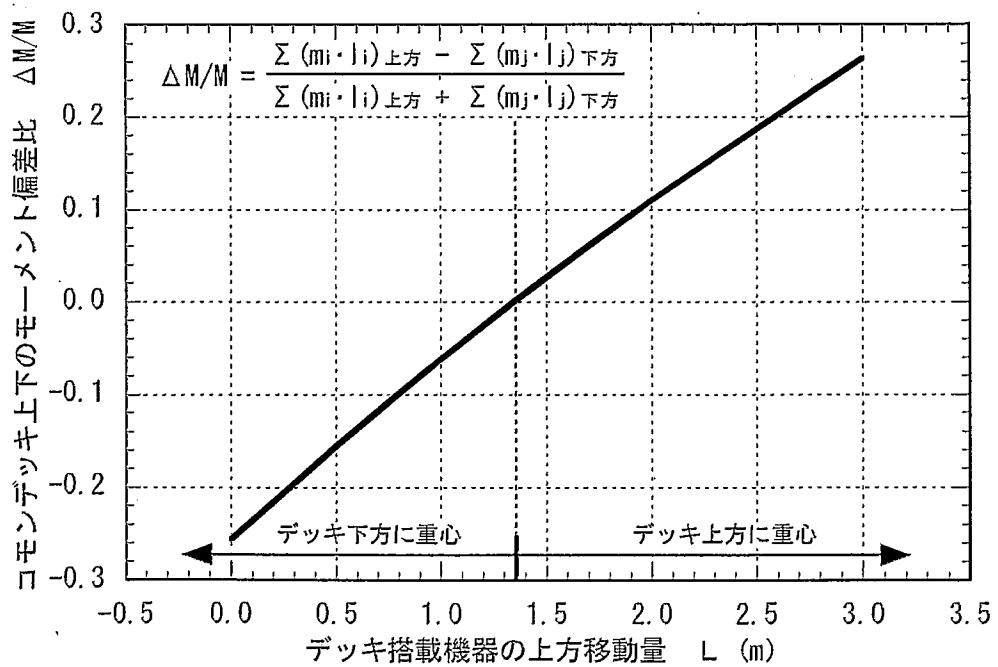


図 2.2.2.2-1 搭載機器の上方移動方法と上下モーメント偏差比の関係

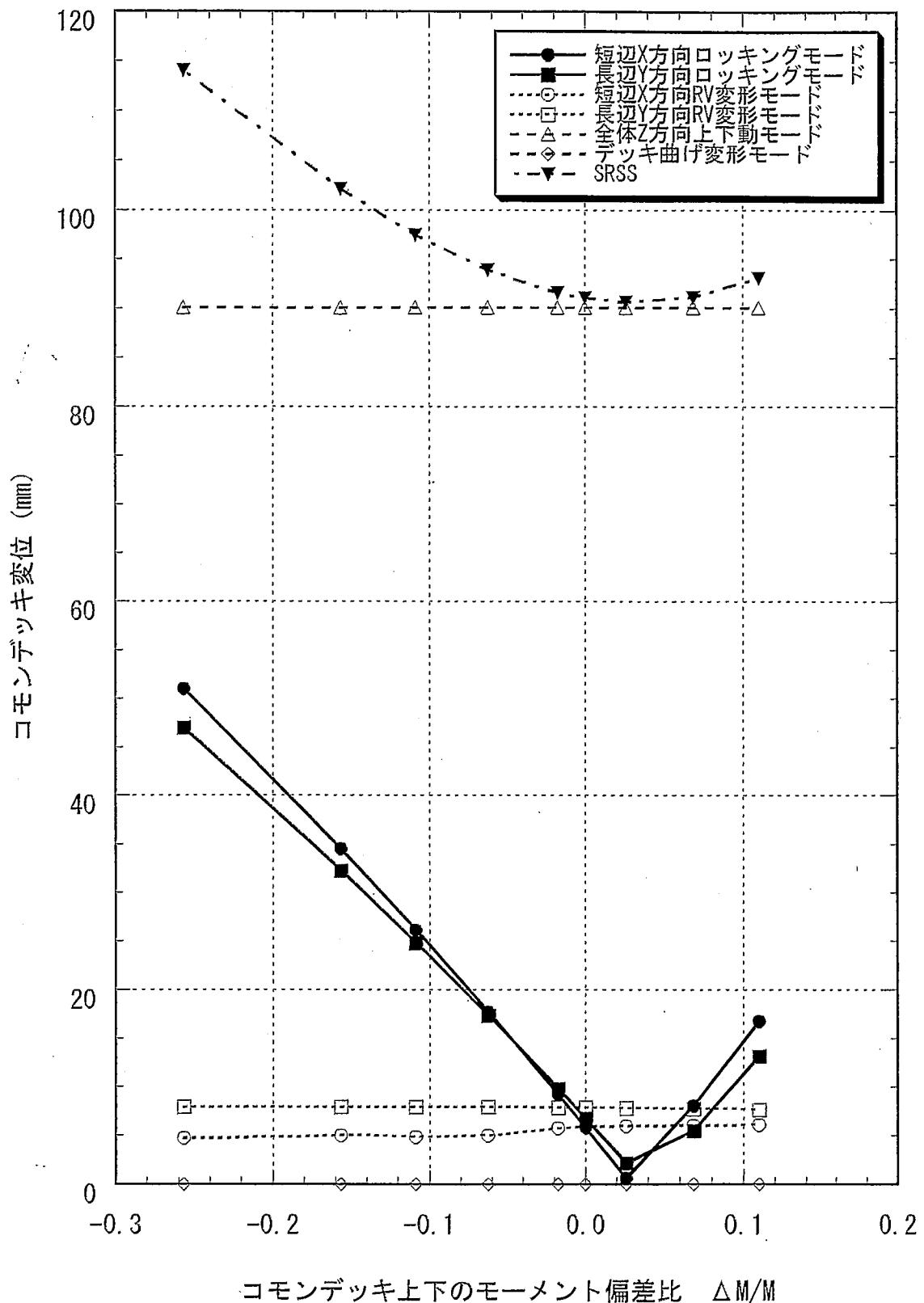


図 2.2.2-2 地震によるコモンデッキ上下変位と上下モーメント偏差比の関係

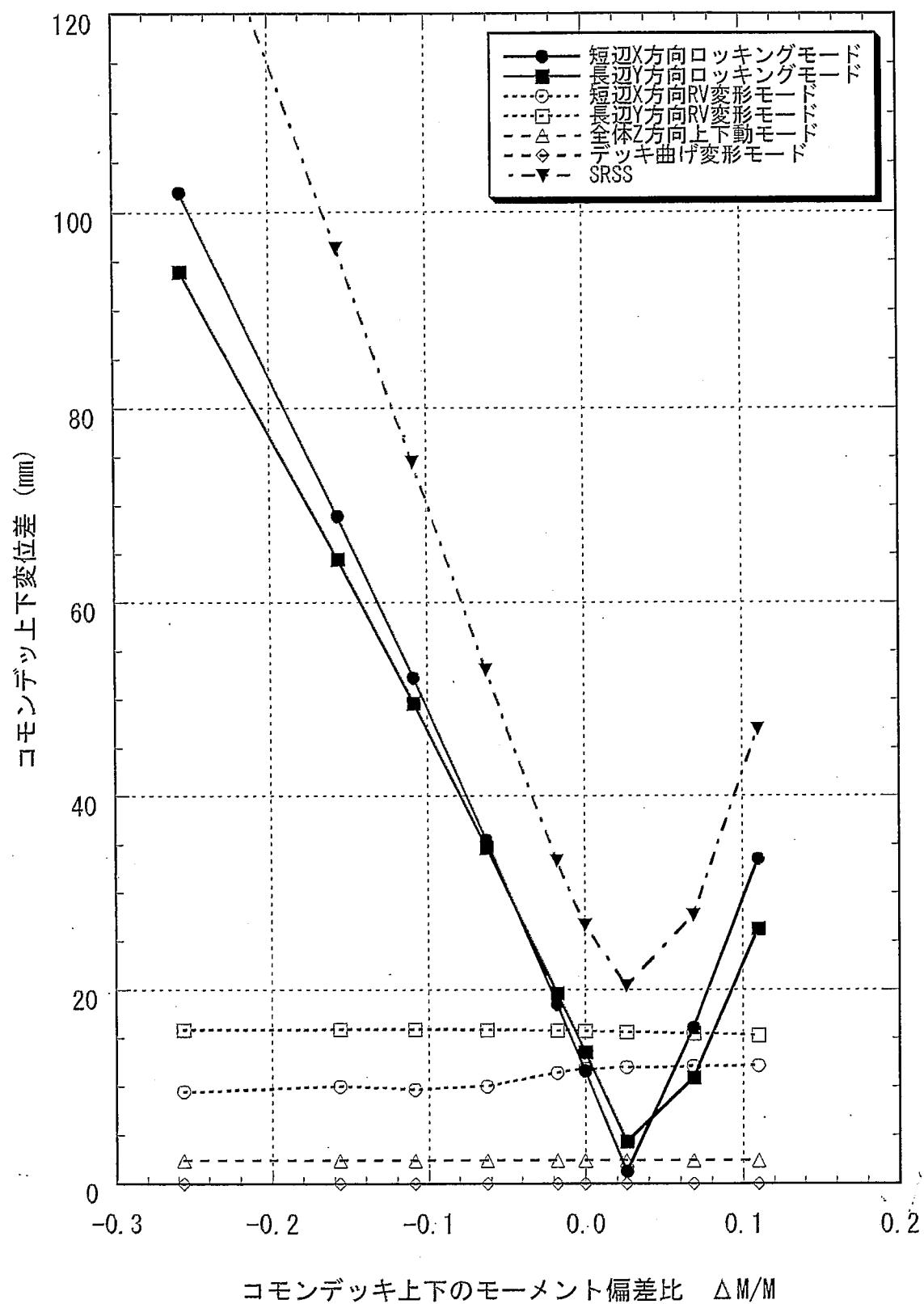


図 2.2.2.2-3 地震によるコモンデッキ面外変位と上下モーメント偏差比の関係

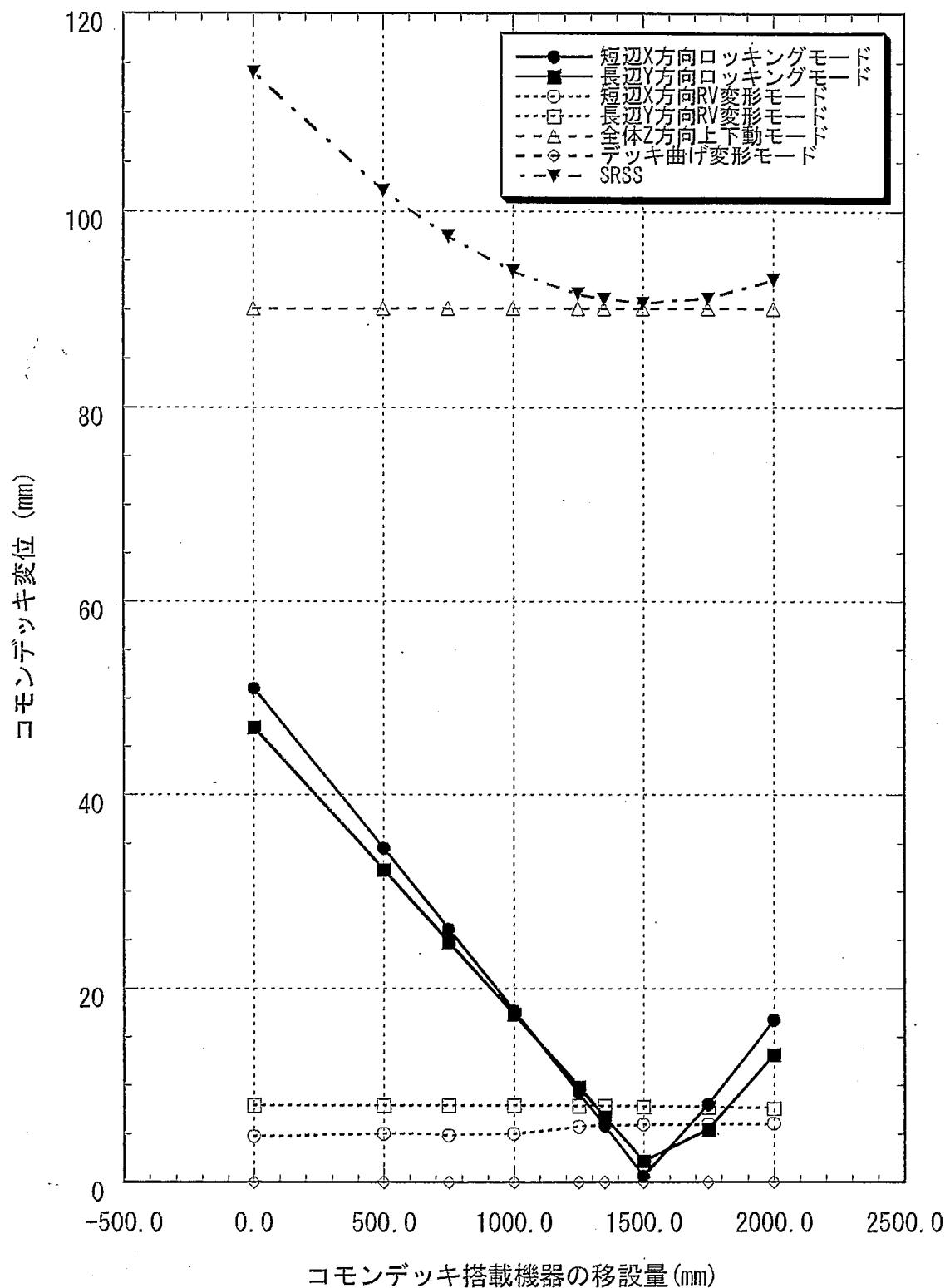


図 2.2.2-4 地震によるコモンデッキ上下変位と上下移設量の関係

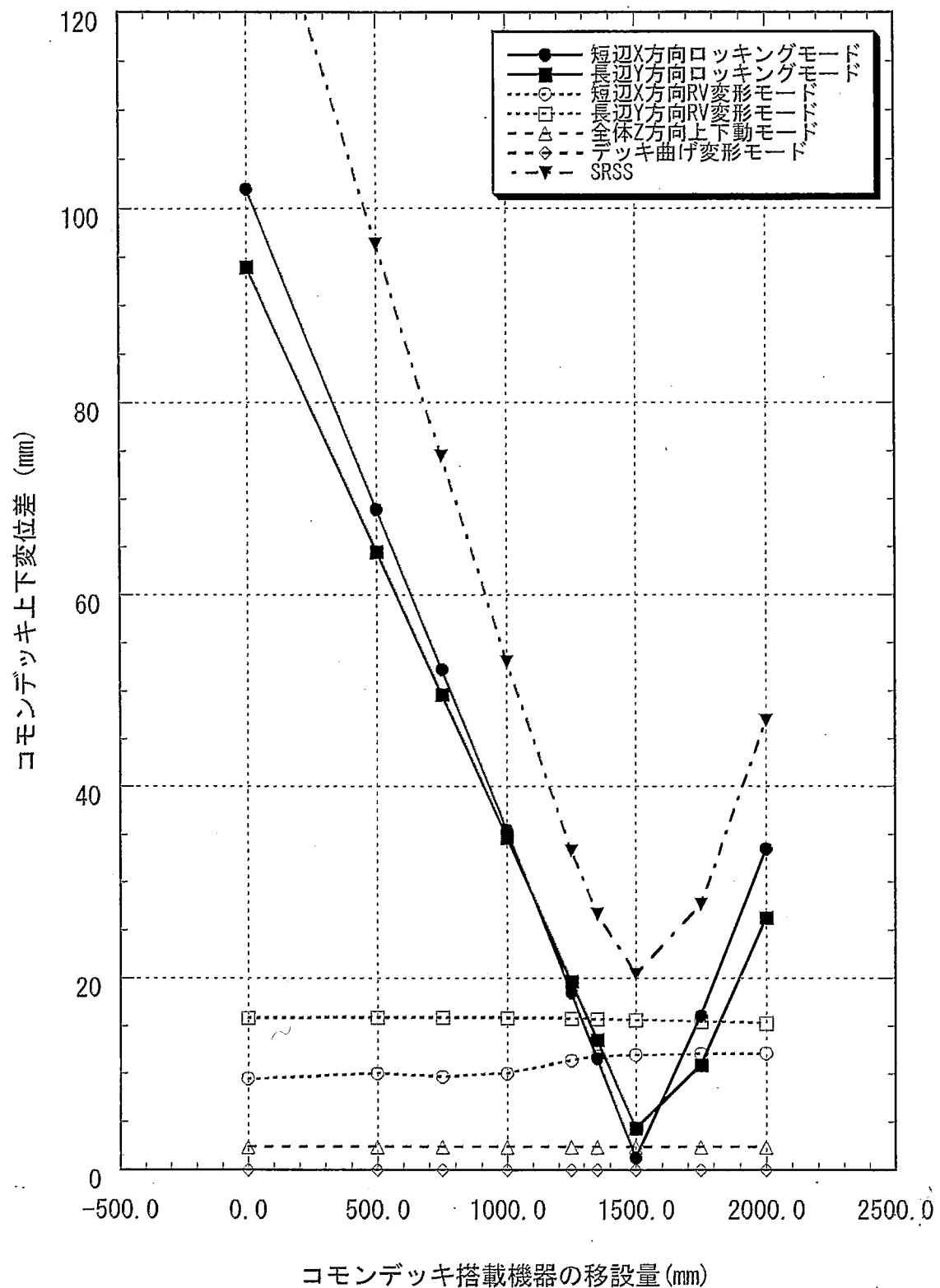


図 2.2.2.2-5 地震によるコモンデッキ面外変位と上下移設量の関係

### 2.2.2.3 コモンデッキ剛性の検討

2.2.2.2 項の検討の結果、コモンデッキ搭載機器を 1.5m 上方に移設することによりロッキング変位が小さくなる結果が得られている。これ以降の検討ではコモンデッキに対して搭載機器を 1.5m 上方に移設した解析モデルにより検討を行う。

#### (1) コモンデッキ剛性の RV 変形モードに対する影響

##### a. 概要

RV 変形モードによるコモンデッキの応答変位は、変形モードによればコモンデッキの剛性の影響を受けていることが分かる。本検討ではコモンデッキの剛性をパラメータとした解析を行い、コモンデッキの剛性が RV 変形モードに与える影響を見通す。

##### b. 解析モデル

図 2.2.2.3-1 に示す解析モデルによりコモンデッキの等価ヤング率をパラメータとした場合の解析を実施する。

##### c. 解析結果

自重による静的解析結果を図 2.2.2.3-2 に示す。地震時のモード毎のコモンデッキ上下変位及び主要モードによる上下応答変位の SRSS 値とコモンデッキの等価ヤング率の関係を図 2.2.2.3-3 に示す。また、コモンデッキの等価ヤング率とコモンデッキの上下変位差の関係を図 2.2.2.3-4 に示す。

結果より、コモンデッキの等価ヤング率をレファレンスの  $51000\text{N/mm}^2$  から約 3 倍程度上げるとコモンデッキの RV 変形モードによる面外変位は約 3 割低減されるがそれ以上等価剛性を上げても大きな低減効果は期待できない。また、長辺方向のロッキングモードによる面外変形にも寄与していて上下応答変位の低減効果があるが、短辺方向のロッキングモードによる面外変位が上昇する傾向があるので注意が必要である。

#### (2) コモンデッキ形状の設定

##### a. 概要

ナトリウム中型炉のコモンデッキ形状を図 2.2.2.3-5 に示す。同図のコモンデッキの等価剛性を求め、耐震成立性を確保できるコモンデッキ形状を設定する。

##### b. 検討内容

###### (a) コンクリート鋼板構造の静解析

### i. 解析条件及びモデル

図 2.2.2.3-6 にコンクリート鋼板構造の解析モデルを示す。鋼板構造とコンクリート構造を 3 次元でモデル化し、全周の上下方向をピン支持した条件でのコモンデッキの自重による静解析を行う。鋼板構造はシェル要素、コンクリート構造はソリッド要素でモデル化している。パラメータは鋼板の板厚とコモンデッキ厚さとする。以下にパラメータを示す。

コモンデッキ厚さ : 2.00m、鋼板板厚 : t30, t50, t100

コモンデッキ厚さ : 2.25m、鋼板板厚 : t50

コモンデッキ厚さ : 2.50m、鋼板板厚 : t50

コモンデッキ厚さ : 2.75m、鋼板板厚 : t50

### ii. 解析結果

表 2.2.2.3-1 に解析結果を示す。

#### (b) コンクリート鋼板構造の等価ヤング率の検討

##### i. 解析条件及びモデル

図 2.2.2.3-7 にコンクリート鋼板構造の解析モデルを示す。鋼板構造とコンクリート構造を 3 次元でモデル化し、全周の上下方向をピン支持した条件でのコモンデッキの自重による静解析を行い、表 2.2.2.3-1 の解析結果と同等になるような等価ヤング率を求める。鋼板構造及びコンクリート構造はシェル要素でモデル化している。

##### ii. 解析結果

図 2.2.2.3-8 に全周の上下方向をピン支持した条件でのコモンデッキ等価ヤング率と上下変位の関係を示す。同図から表 2.2.2.3-1 と同一になるコモンデッキ等価ヤング率を推定した。結果を表 2.2.2.3-2 と図 2.2.2.3-9 に示す。

#### (c) 耐震性評価

S2 地震に対するコモンデッキの制限条件は以下のとおりである。

- ・ S2 地震時のコモンデッキの上下変位差 : 25mm 以下 (暫定)

- ・ S2 地震時の皿ばね変位 : 100mm 以下 (暫定)

図 2.2.2.3-4 によれば S2 地震時のコモンデッキの上下変位差を 25mm 以内に抑えるにはコンクリート鋼板構造の等価ヤング率を  $400000\text{N/mm}^2$  以下にする必要がある。一方、S2 地震時の皿ばね変位を 100mm 以下に抑えるためには、S2 地震時の

上下応答加速度が 0.8G (表 2.2.2.1-1 参照) であることからコモンデッキ重量を 1920 トン以下にする必要がある。両者を制限条件として整理した結果を図 2.2.2.3-10 示す。同図より制限条件を満足できるコモンデッキ形状は下記となる。

- ① デッキ高さ 2.00m、鋼板板厚 100mm、皿ばねの支持荷重 306 トン
- ② デッキ高さ 2.25m、鋼板板厚 50mm、皿ばねの支持荷重 301 トン
- ③ デッキ高さ 2.50m、鋼板板厚 50mm、皿ばねの支持荷重 311 トン

上記の 3 ケースのうち、鋼板板厚が薄く、皿ばね支持荷重が最も小さくなる② が最も望ましいケースと考えられる。

(3) まとめ

ナトリウム中型炉のコモンデッキ形状として以下を選定した。

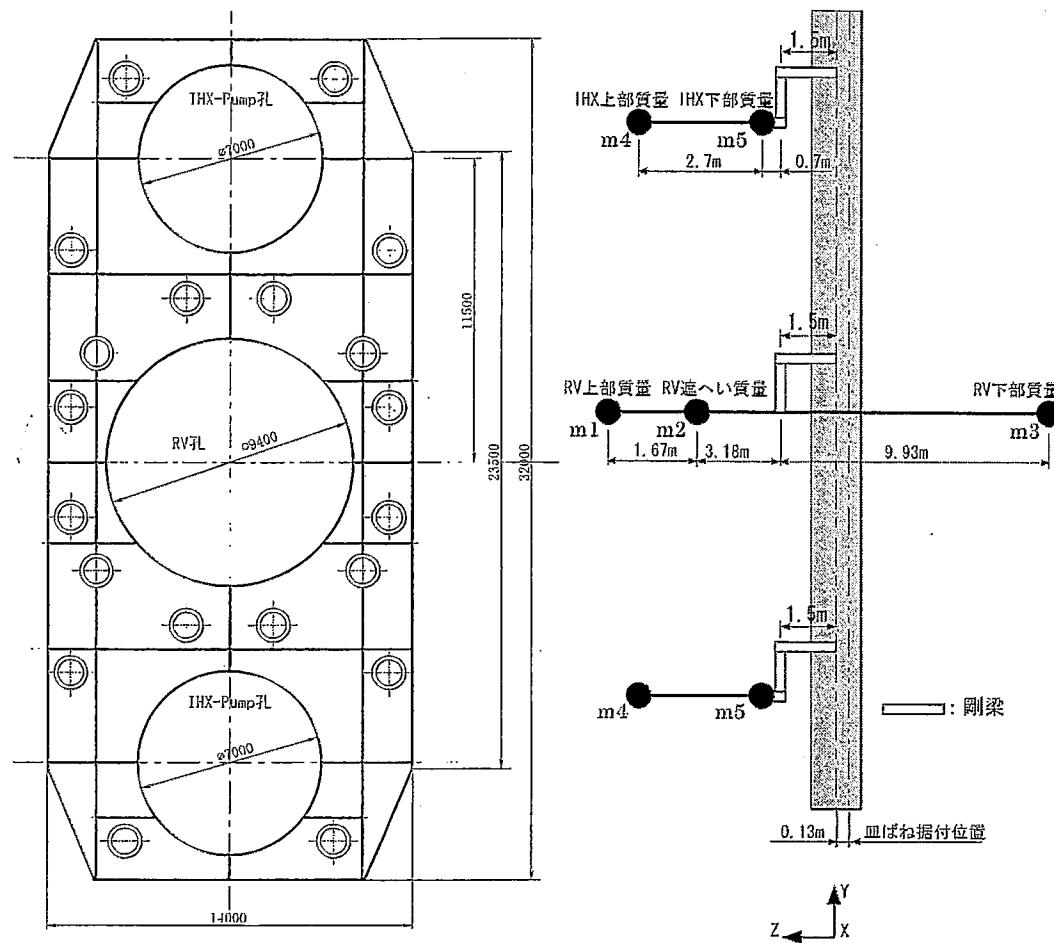
- ・ デッキ高さ 2.25m、鋼板板厚 50mm、皿ばねの支持荷重 301 トン

表 2.2.2.3-1 コンクリート鋼板構造の自重による静解析結果

コモンデッキ厚さ	鋼板板厚	コモンデッキ重量	上下変位
2.00m	30mm	$1422 \times 10^3 \text{kg}$	1.092mm
2.00m	50mm	$1538 \times 10^3 \text{kg}$	0.997mm
2.00m	100mm	$1829 \times 10^3 \text{kg}$	0.891mm
2.25m	50mm	$1730 \times 10^3 \text{kg}$	0.818mm
2.50m	50mm	$1922 \times 10^3 \text{kg}$	0.686mm
2.75m	50mm	$2114 \times 10^3 \text{kg}$	0.587mm

表 2.2.2.3-2 コンクリート鋼板構造の等価ヤング率

コモンデッキ 厚さ	鋼板板厚	上下変位	等価ヤング率	コモンデッキ重量
2.00m	30mm	1.092mm	27900N/mm	1422 トン
2.00m	50mm	0.997mm	33000N/mm	1538 トン
2.00m	100mm	0.891mm	43900N/mm	1829 トン
2.25m	50mm	0.818mm	45300N/mm	1730 トン
2.50m	50mm	0.686mm	60000N/mm	1922 トン
2.75m	50mm	0.587mm	77100N/mm	2114 トン



皿ばね位置		
番号	X 座標 (中心より) (m)	Y 座標 (中心より) (m)
1	4.000	14.500
2	6.100	7.500
3	1.670	6.232
4	4.942	4.147
5	6.100	2.100

項目	単位	値	備考
コモンデッキ厚さ	m	2.0	
鋼板板厚	mm	50	
デッキ等価ヤング率	N/mm <sup>2</sup>	パラメータ	
デッキ重量	ton	1420	
原子炉構造下部重量	ton	1430	m3
ルーフデッキ廻り遮へい重量	ton	370	m2
原子炉構造上部重量	ton	800	m1
IHX・配管重量	ton	900	m5×2
IHX 廻り遮へい重量	ton	800	m4×2
総重量	ton	5720	
原子炉構造 1 次固有振動数	Hz	4.5	
皿ばね基数	-	20	
皿ばね ばね定数	ton/mm	2.911	上下

図 2.2.2.3-1 コモンデッキ系応答解析モデル

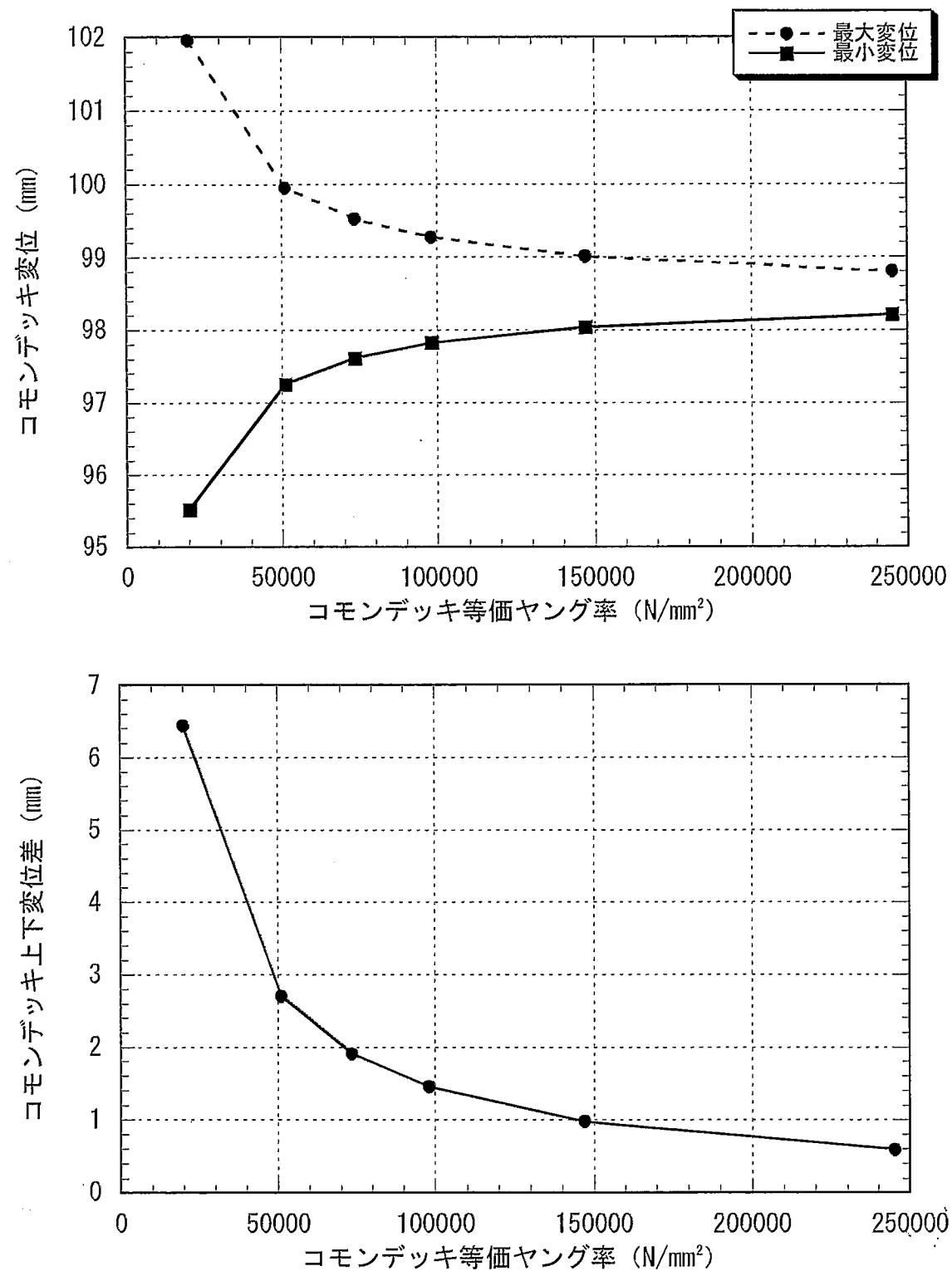


図 2.2.2.3-2 自重によるコモンデッキ上下変位とコモンデッキ等価ヤング率の関係

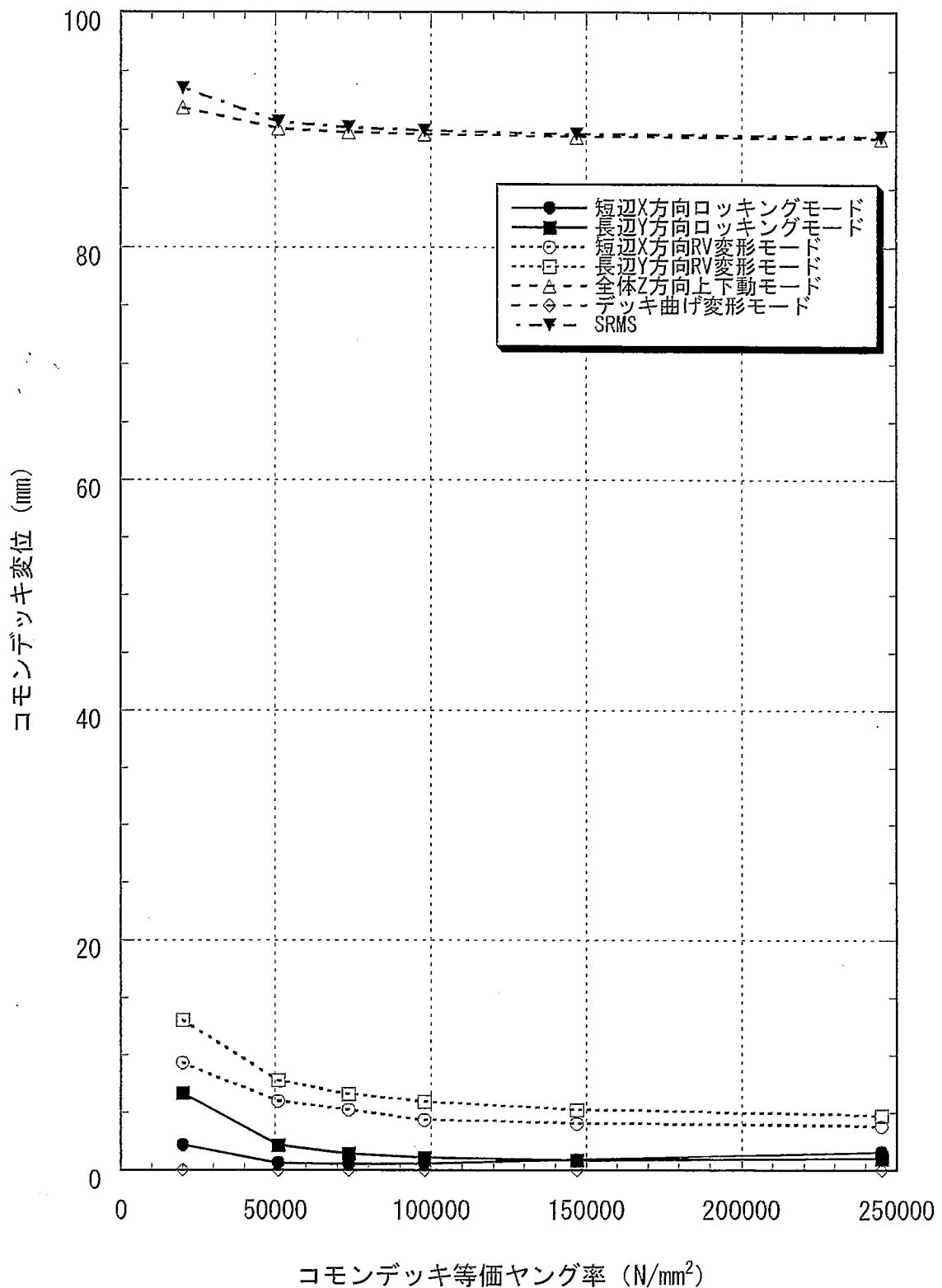


図 2.2.2.3-3 地震によるコモンデッキ上下変位とコモンデッキ等価ヤング率の関係

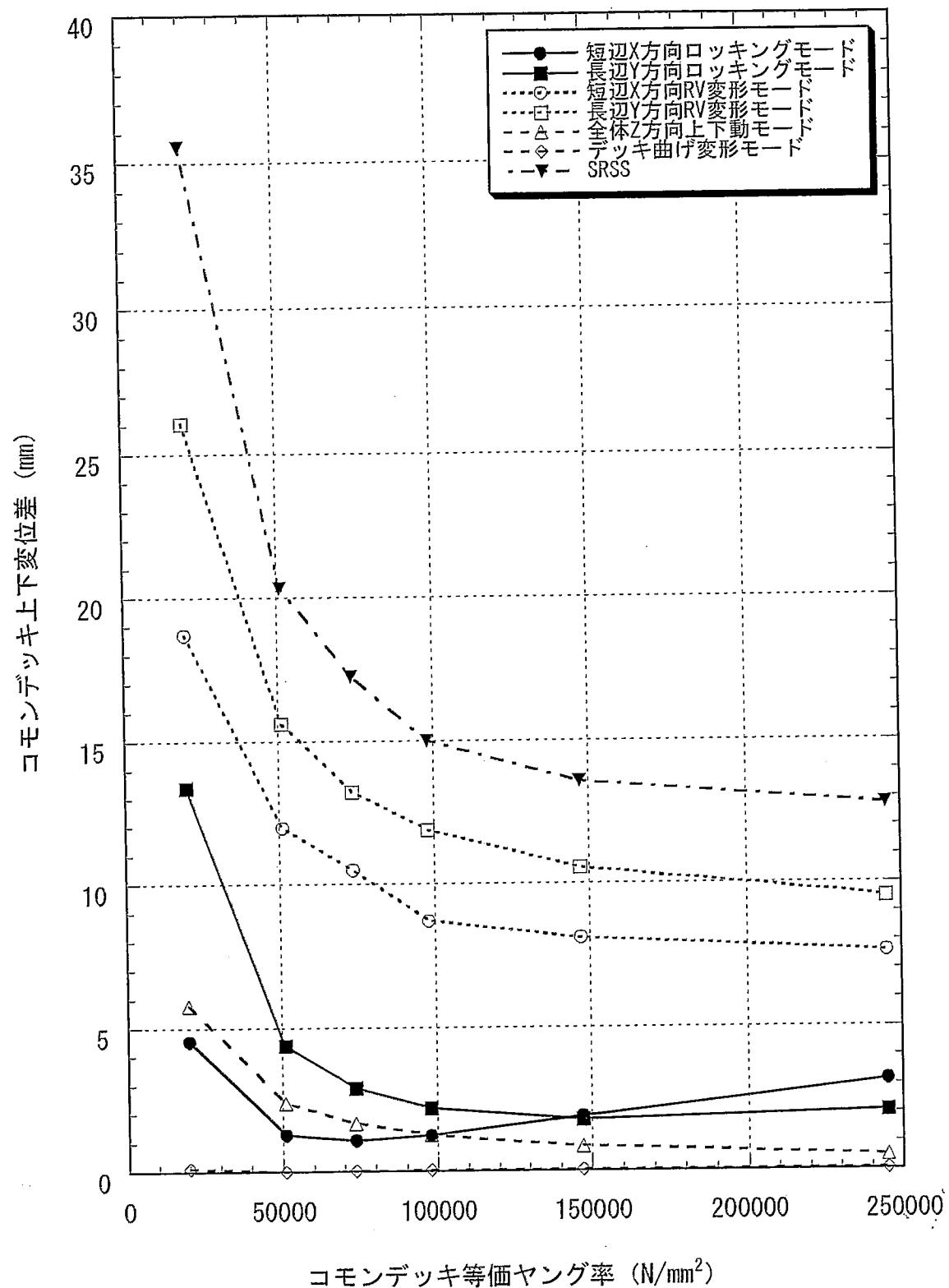


図 2.2.2.3-4 地震によるコモンデッキ面外変位とコモンデッキ等価ヤング率の関係

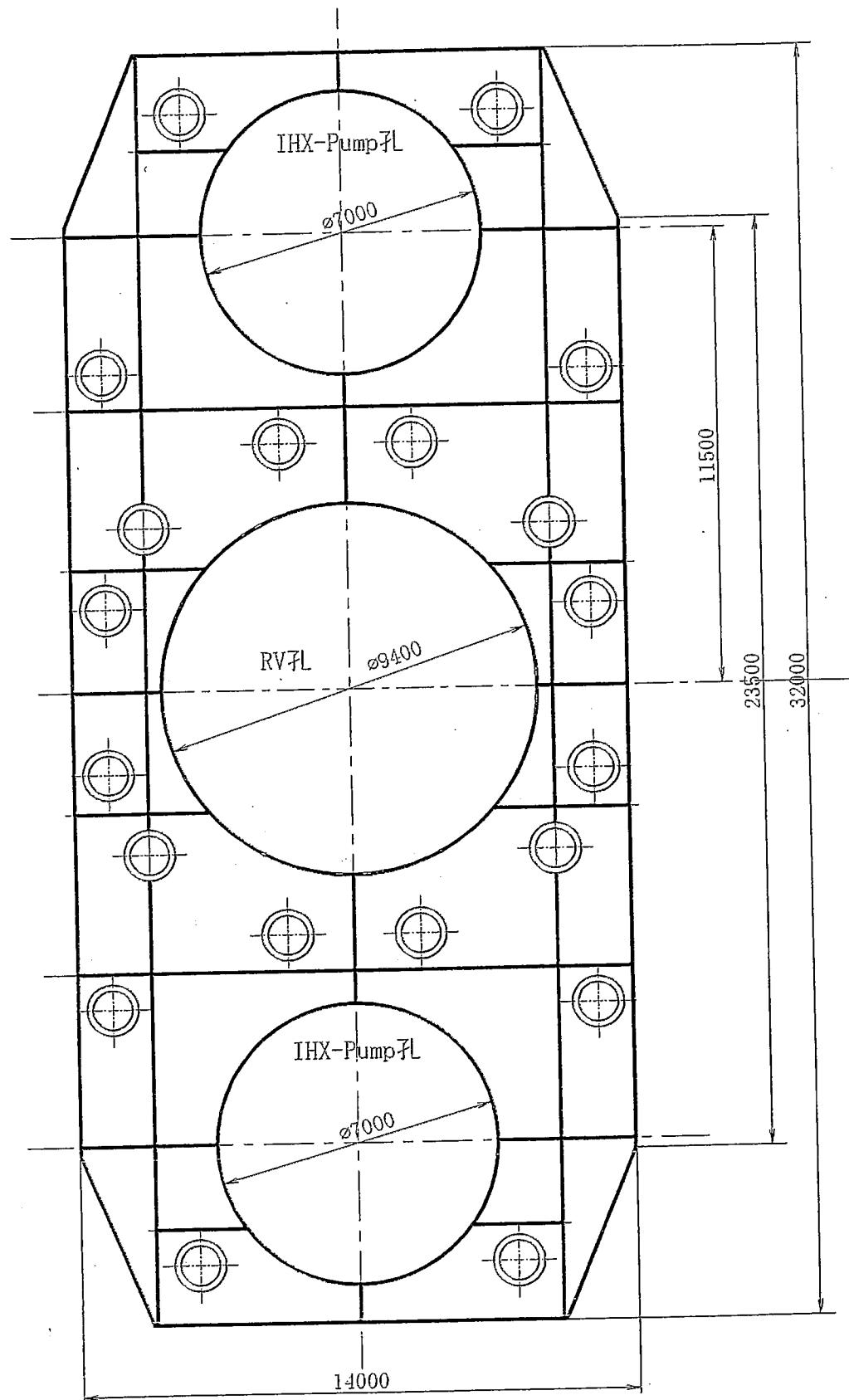
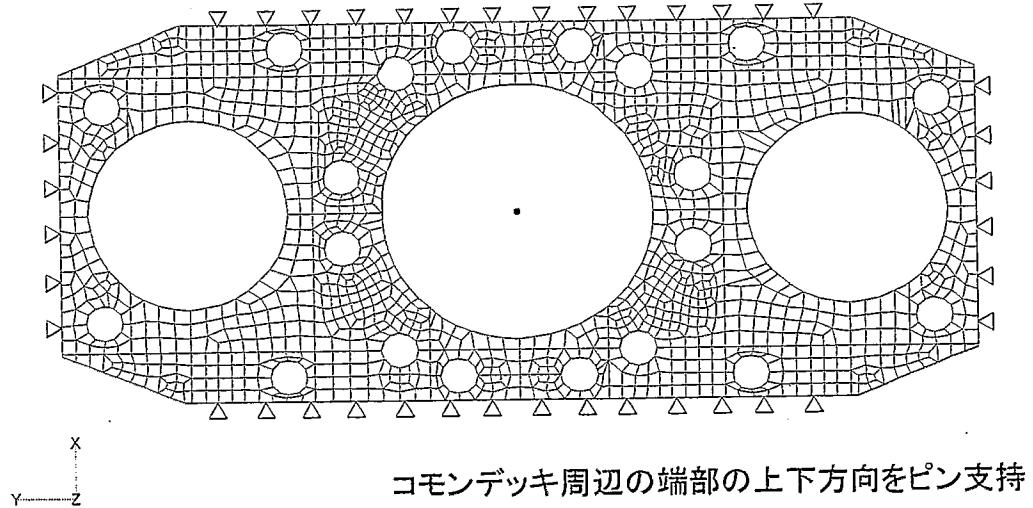


図 2.2.2.3-5 ナトリウム中型炉コモンデッキ形状

V1  
L1  
C1



コモンデッキ周辺の端部の上下方向をピン支持

V1  
L1  
C1

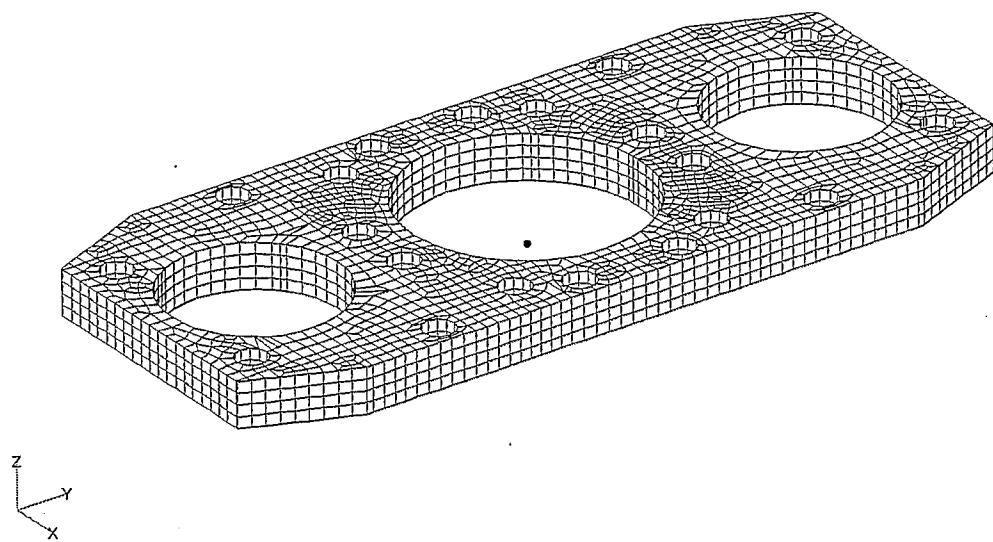


図 2.2.2.3-6 コモンデッキの自重による静解析モデル

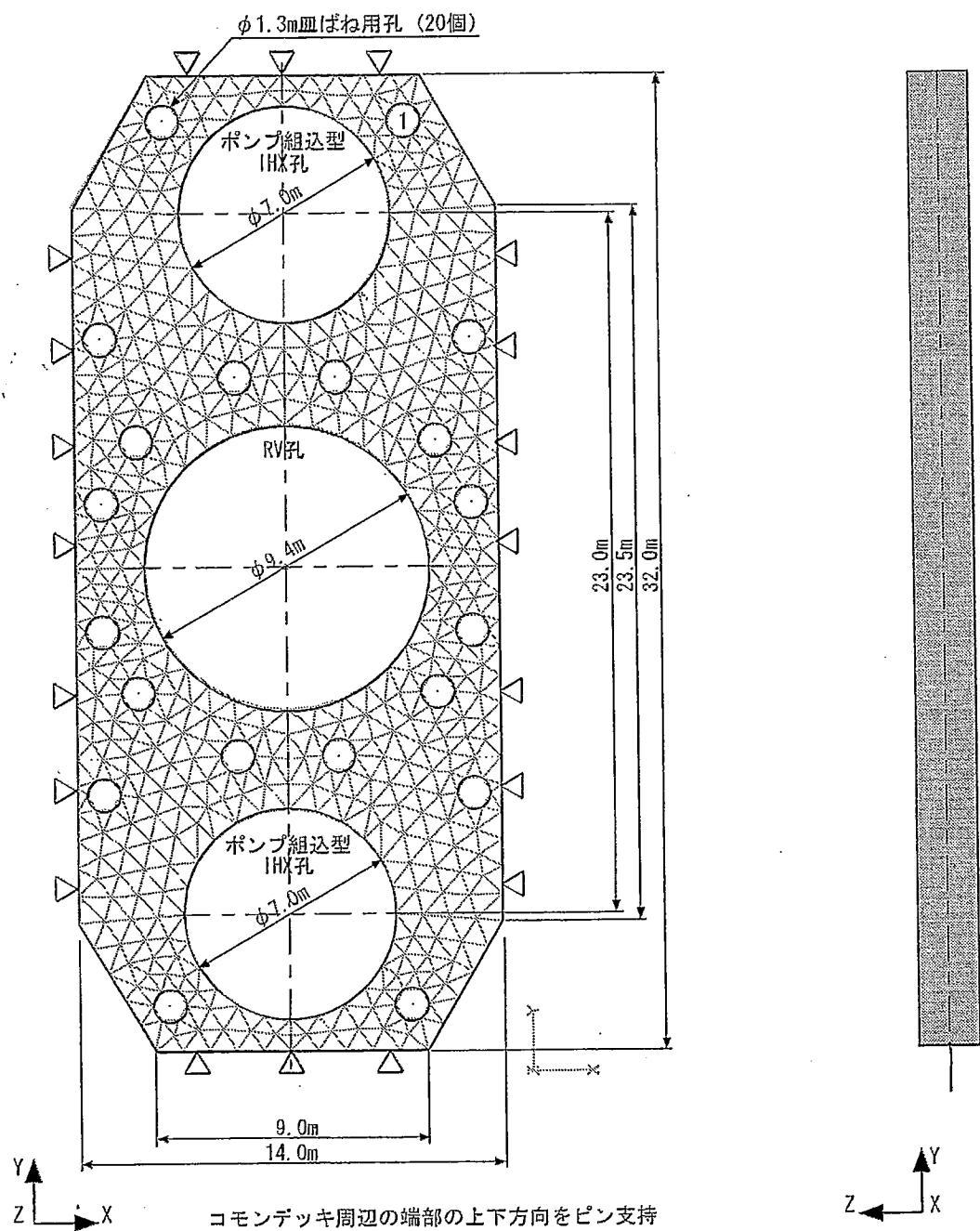


図 2.2.2.3-7 等価ヤング率検討用解析モデル

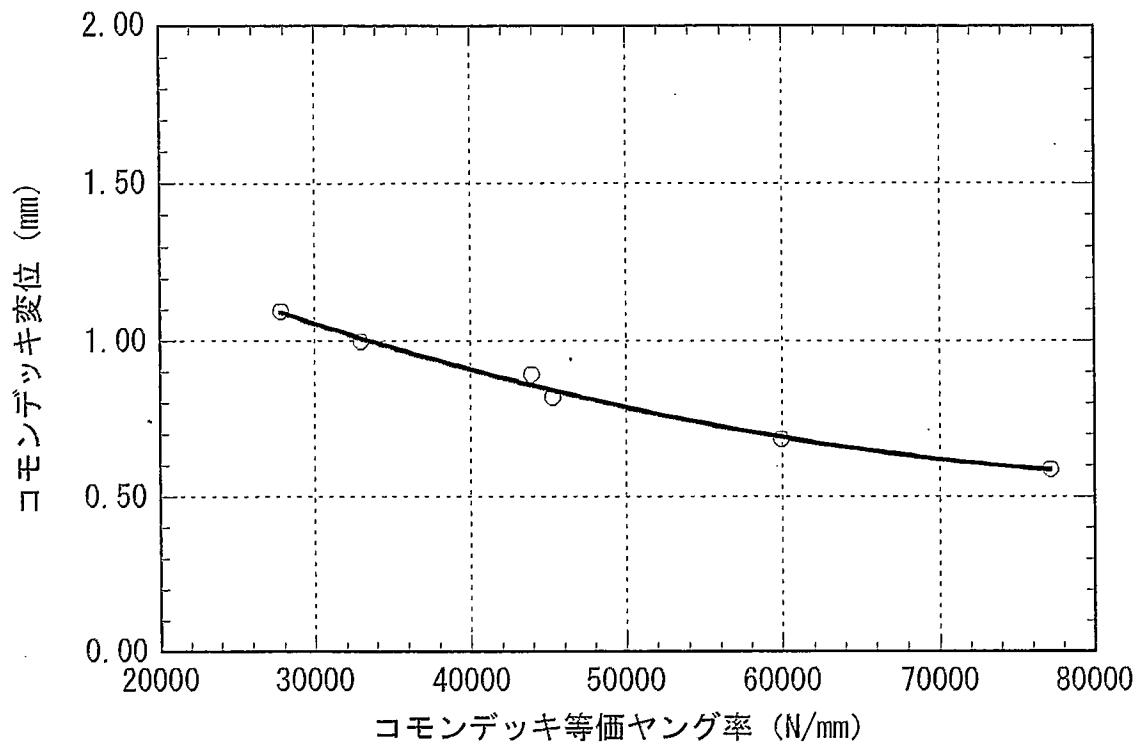


図 2.2.2.3-8 コモンデッキ鋼板ヤング率と上下変位の関係

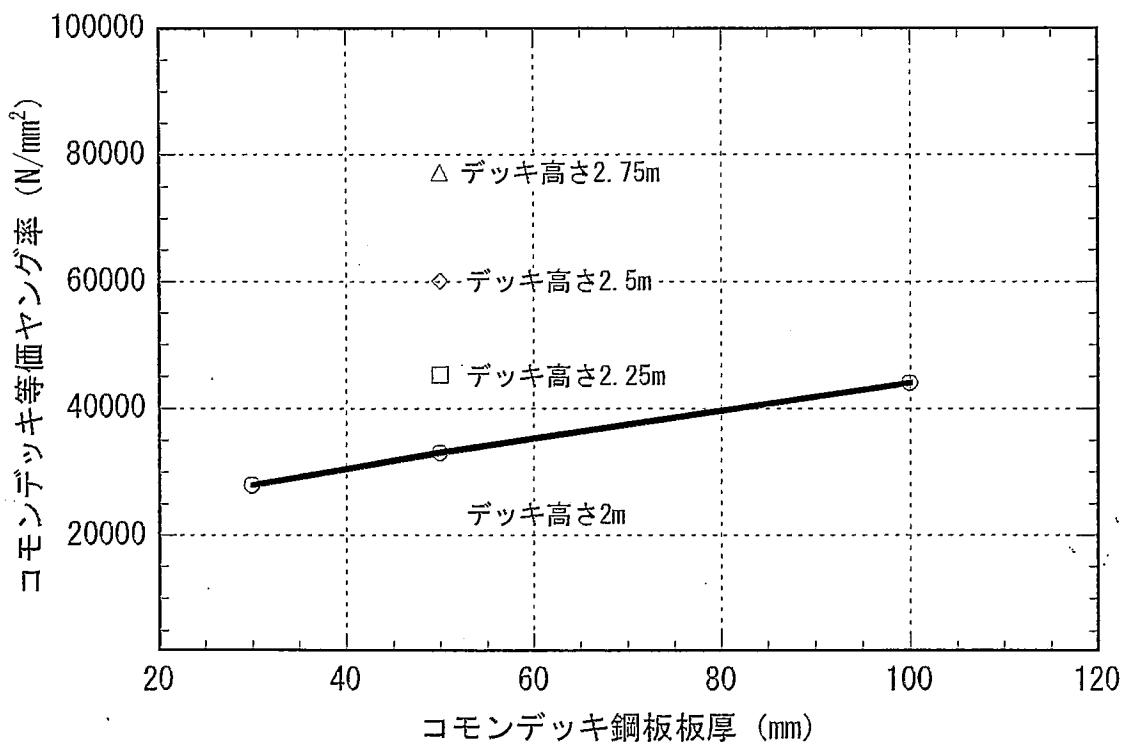


図 2.2.2.3-9 コモンデッキ鋼板板厚と等価ヤング率の関係

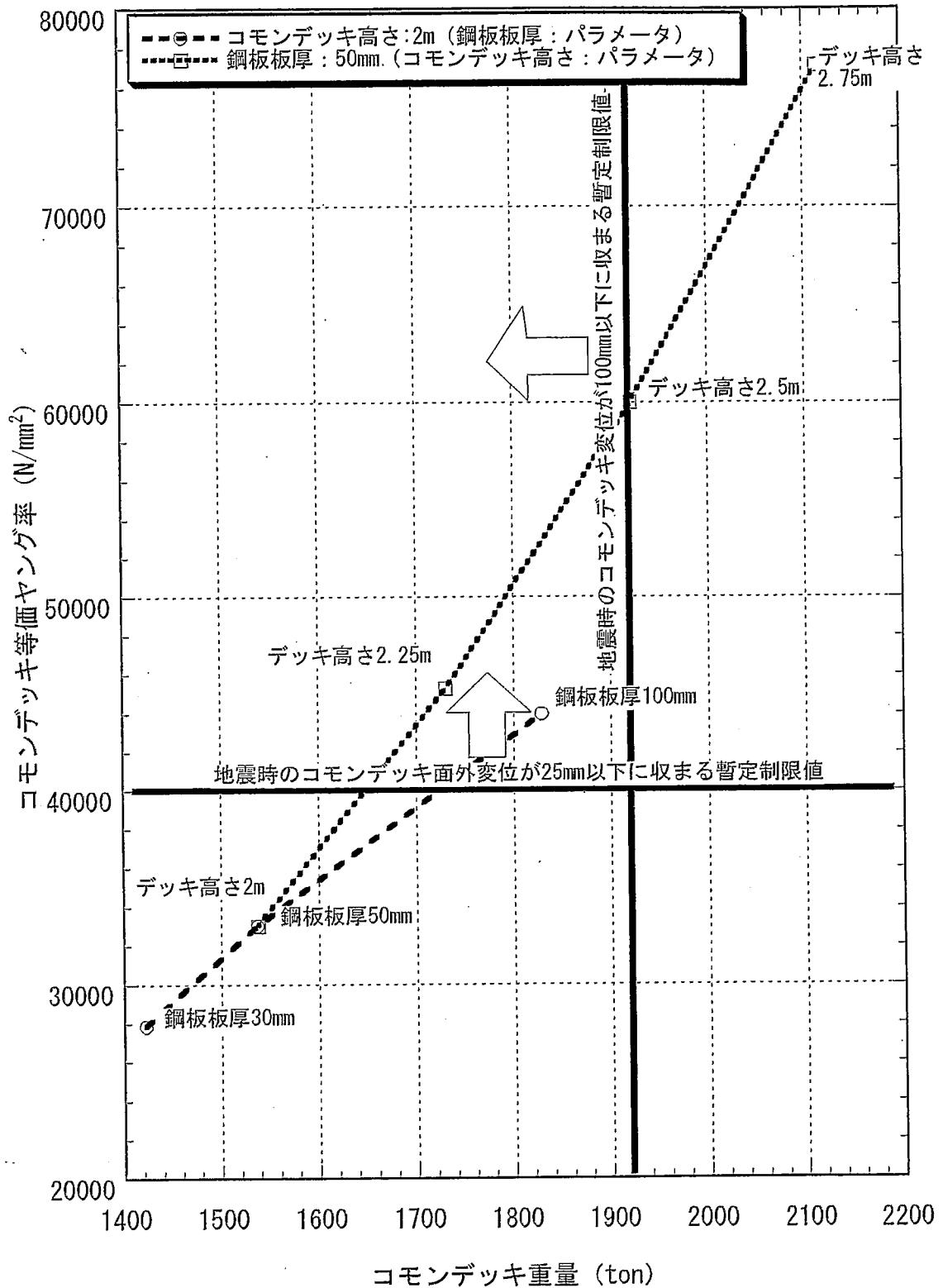


図 2.2.2.3-10 コモンデッキ重量と等価ヤング率の関係

## 2.2.2.4 盤ばね剛性に関する影響検討

### (1) 概要

盤ばね剛性がコモンデッキに与える影響を見通す。

### (2) 地震条件

地震条件を図 2.2.2.1-1 に示す。

### (3) 検討内容

#### a. 解析モデル

図 2.2.3-1 に示す解析モデル（コモンデッキ等価ヤング率を  $73500\text{N/mm}^2$ ）を用いる。解析はコモンデッキ全体の上下振動の固有振動数が 1.75Hz、2Hz、2.5Hz 及び 3Hz のケースについて行う。

#### b. 解析結果

##### (a) 自重による静解析結果

自重による静的解析時のコモンデッキ変位と全体上下動固有振動数の関係を図 2.2.4-1 に示す。コモンデッキ変位と盤ばね剛性とは比例関係であり、また、上下固有振動数と盤ばね剛性は  $1/2$  乗に比例する関係にあり理論上の答えと一致する。盤ばね剛性を上げることは、見かけ上コモンデッキ剛性が上がるのと同様の効果がある。また、コモンデッキの上下変位差を多少ではあるが抑制する。面外変位と固有振動数の関係は比例関係にある。

##### (b) 地震応答解析結果

地震時のモード毎のコモンデッキ上下変位及び主要モードによる上下応答変位の SRSS 値と全体上下動固有振動数の関係を図 2.2.4-2 に示す。また、コモンデッキの上下変位差と全体上下動固有振動数の関係を図 2.2.4-3 に示す。

結果より、最大変位は上下動モードによる応答値に大きく寄与することが分かる。また、全体上下動固有振動数を上げると、見かけ上コモンデッキ剛性が上がり、コモンデッキの上下変位差を抑制する効果があることが期待されたが、RV 変形モードに対する上下変位差に対してはほとんど変わらないことが分かる。これは、コモンデッキが見かけ上硬くなり変形しにくくなっていることによる低減効果と、変形モードの固有振動数が上がることにより原子炉容器の固有振動数に近くことによる増幅効果とが重なったためと考えられる。また、全体の固有振動数が上がることにより、よりロッキングが生じ易くなる結果となった。

(4) まとめ

皿ばね剛性を大きくすると全体上下動による変位は小さくなるが、ロッキングによる変位が大きくなる傾向があり、皿ばねの剛性を高くすることによるコモンデック変位の抑制効果はなかった。

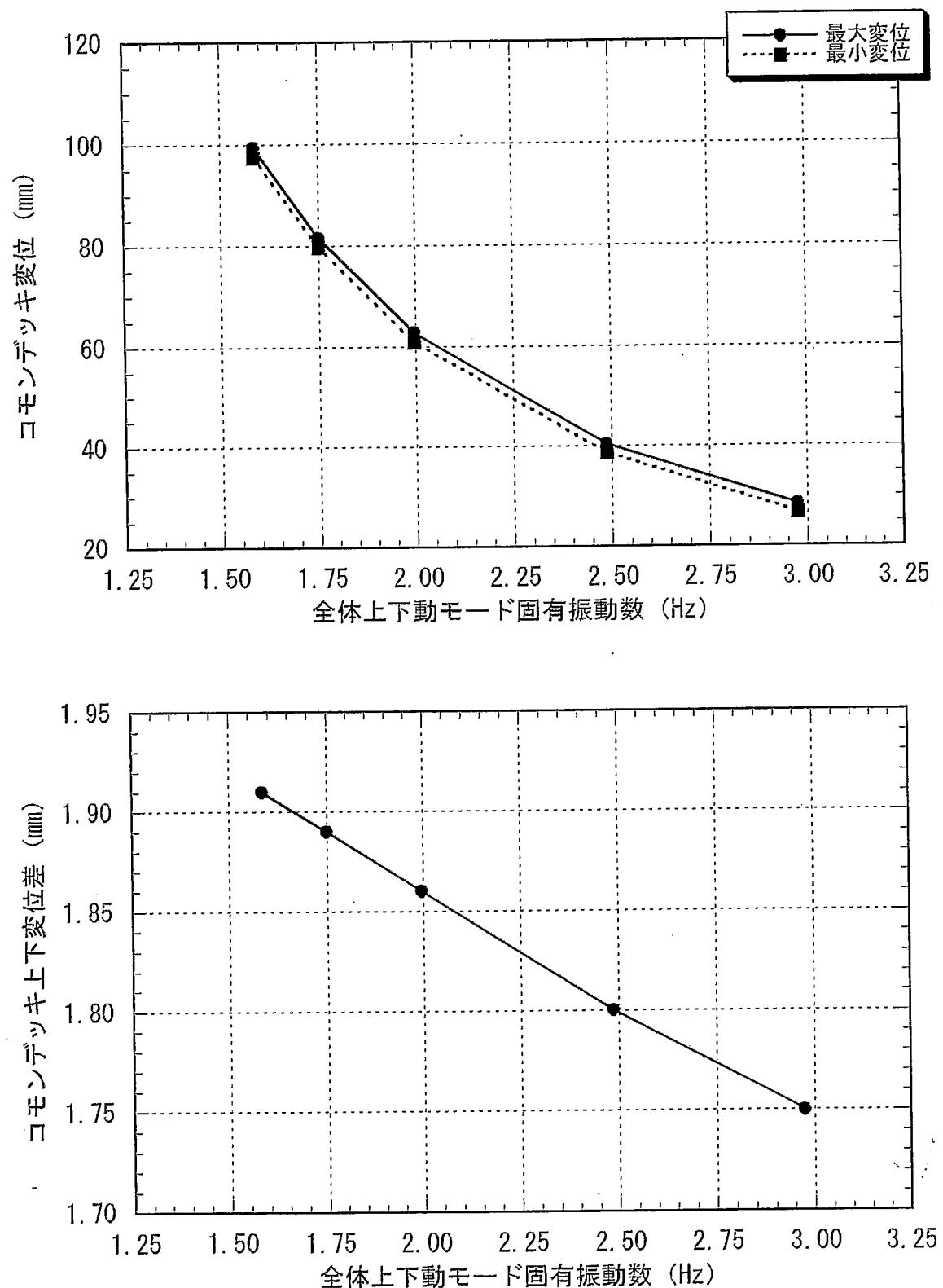


図 2.2.2.4-1 全体上下動固有振動数と自重によるコモンデッキ上下変位の関係

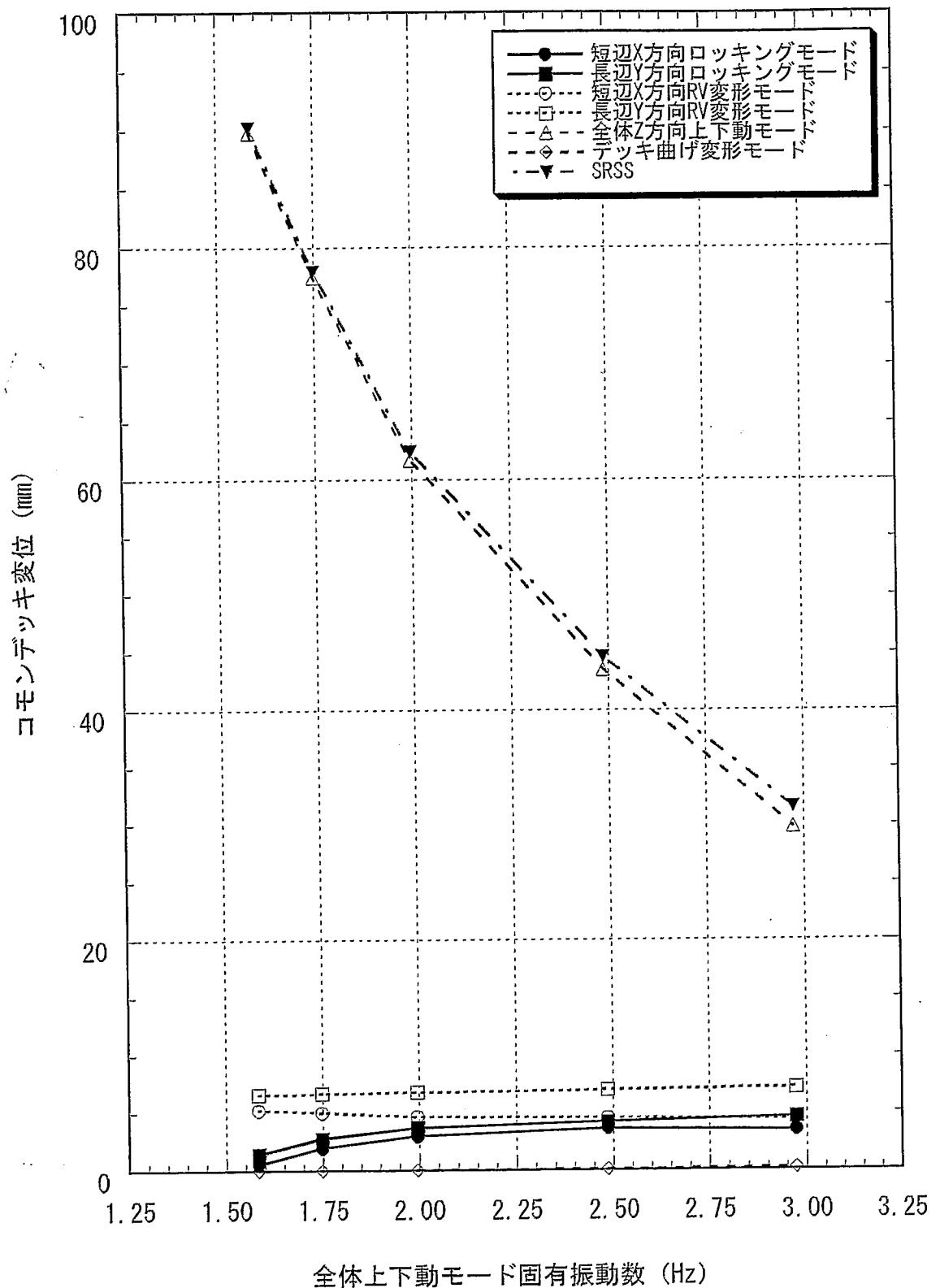


図 2.2.2.4-2 全体上下動固有振動数と地震によるコモンデッキ上下変位の関係

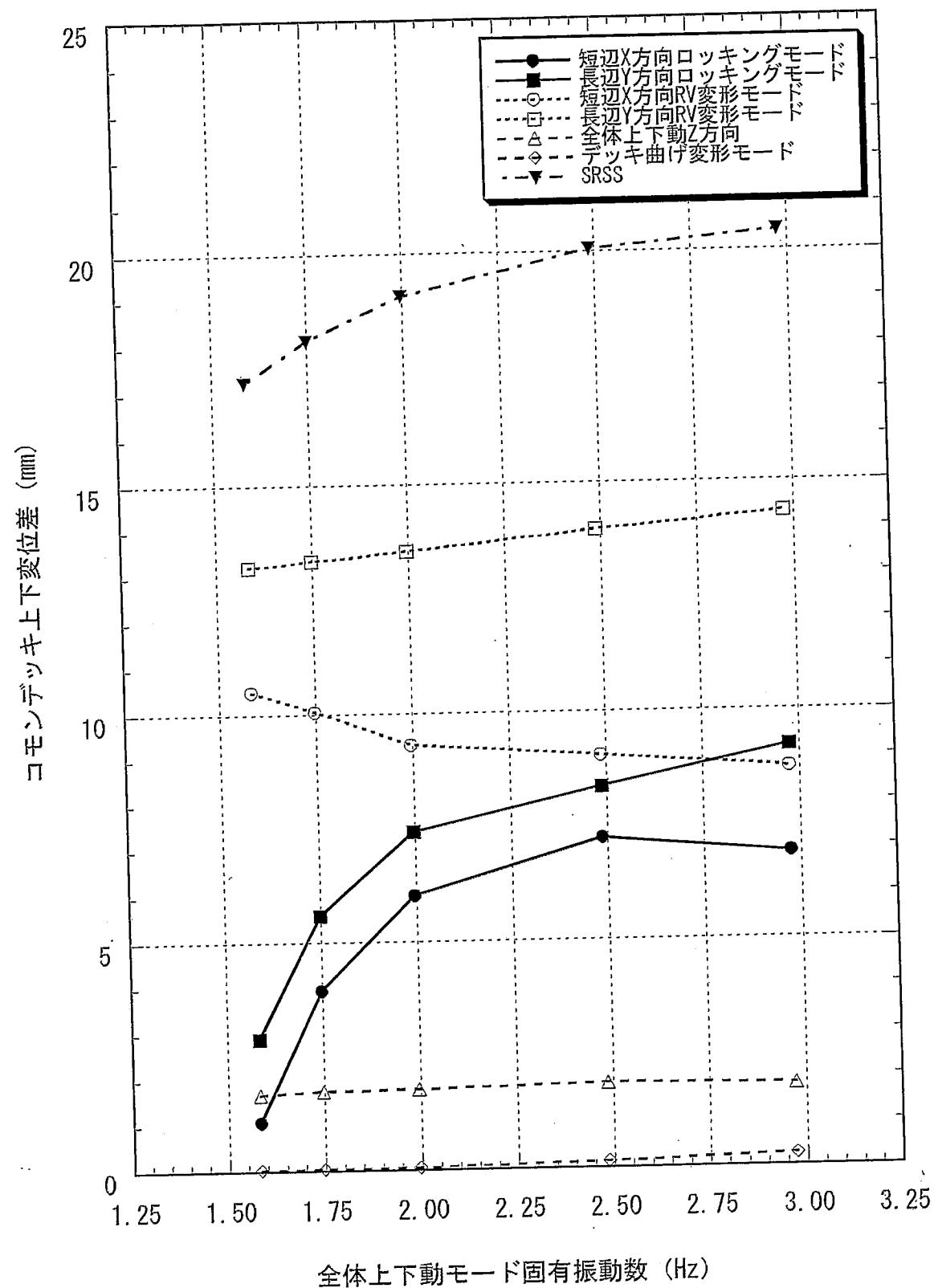


図 2.2.2.4-3 全体上下動固有振動数と地震によるコモンデッキ面外変位の関係

### 2.2.2.5 水平内重量バランスに関する影響検討

#### (1) 概要

本検討では水平内重量バランスがコモンデッキ系に与える影響を見通す。

#### (2) 地震条件

地震条件を図 2.2.2.1-1 に示す。

#### (3) 検討内容

##### a. 解析モデル

図 2.2.2.3-1 に示す解析モデルを用いて自重による静解析及び地震応答解析を行う。コモンデッキ等価ヤング率を  $73500\text{N/mm}^2$  としたケースに対して IHX、ポンプ及びモータ重量想定位置（図 2.2.2.3-1 の m4 位置）の片側のみの重量減少量をパラメータとした場合の解析を実施する。

##### b. 解析結果

###### (a) 自重による静解析結果

IHX 重量減少を 0ton～400ton とした場合の自重によるコモンデッキの上下 Z 方向変位分布を図 2.2.2.5-1、上下変位と上下変位差の IHX 重量減少量との関係を図 2.2.2.5-2 に示す。変形モード図から、各ケースにおいてコモンデッキが大きくなつたわむ変形は見られないが、コモンデッキの傾きは大きくなる傾向がある。

なお、水平内の重量バランスが不均衡になる最大の事象としては IHX の定検時に 162 トン減少するケースが考えられる。この場合にはコモンデッキの上下変位差が 15mm 程度となる。

###### (b) 地震応答解析結果

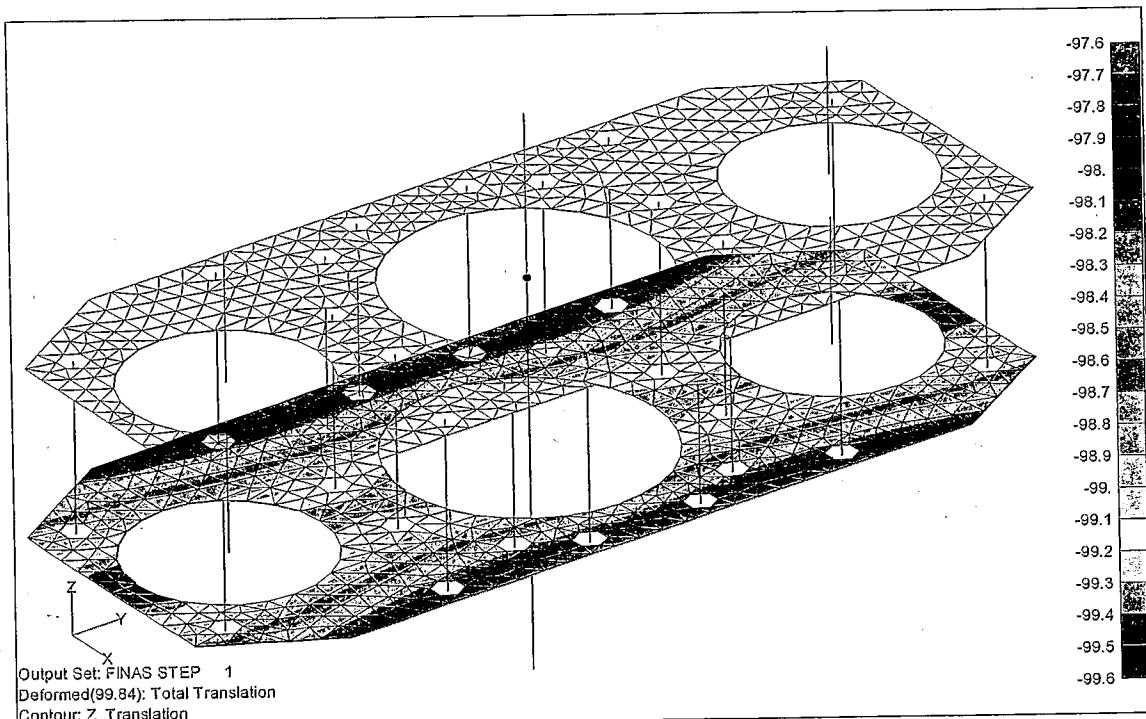
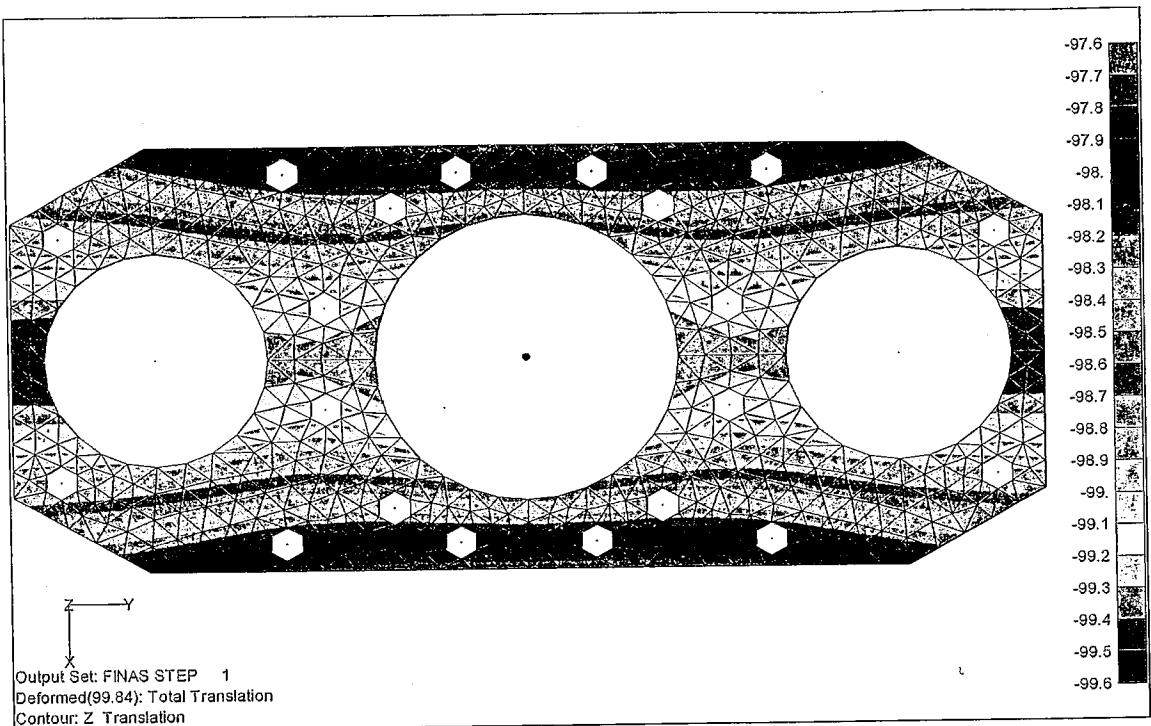
IHX 重量減少を 0ton～400ton とした場合の固有振動モードを図 2.2.2.5-3 に示す。全体上下振動モードの場合にデッキが傾くような振動モードとなつた。また、長辺方向 RV 変形モード及びコモンデッキの曲げ変形モードでは左右の面外変形のバランスが大きく変わる。減少重量が大きくなるほど各モードの固有振動数は上がる。

床応答解析を行つた結果の各モードに対するコモンデッキ変位量と IHX 重量減少量の関係を図 2.2.2.5-4 に、コモンデッキの上下変位差と IHX 重量減少量の関係を図 2.2.2.5-5 に示す。コモンデッキの曲げ変形モードに対して Y 方向加振した場合の変位量が重量の減少とともに増えるが顕著ではない。長辺 Y 方向のロッ

キングモードに対しての Z 方向加振による変位量がバランスの不均衡により発生し、大きな応答値となる。また、全体上下動モードに対しての変位量が重量減少とともに大きくなる。その他のモードに対しては重量減少が最大変位量に与える影響は大きくない。コモンデッキの上下変位差においては、長辺 Y 方向のロッキングモードに対しての Z 方向加振により大きくコモンデッキが傾く。また、全体上下動モードに対しての上下変位差も大きくなる。

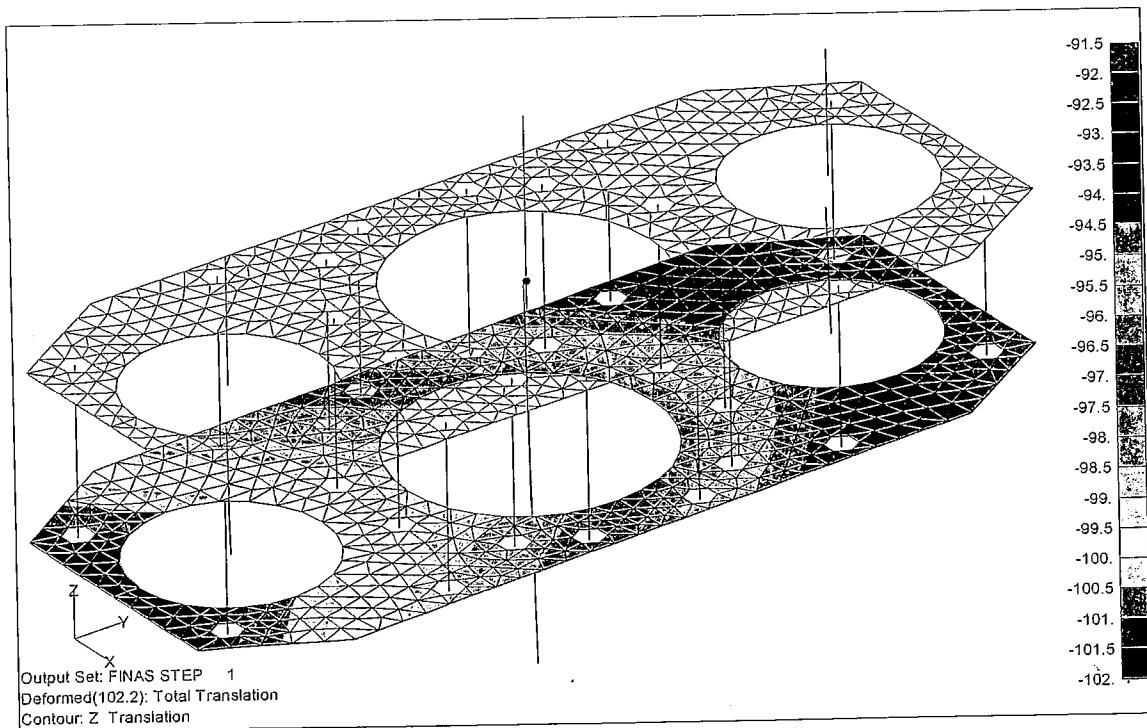
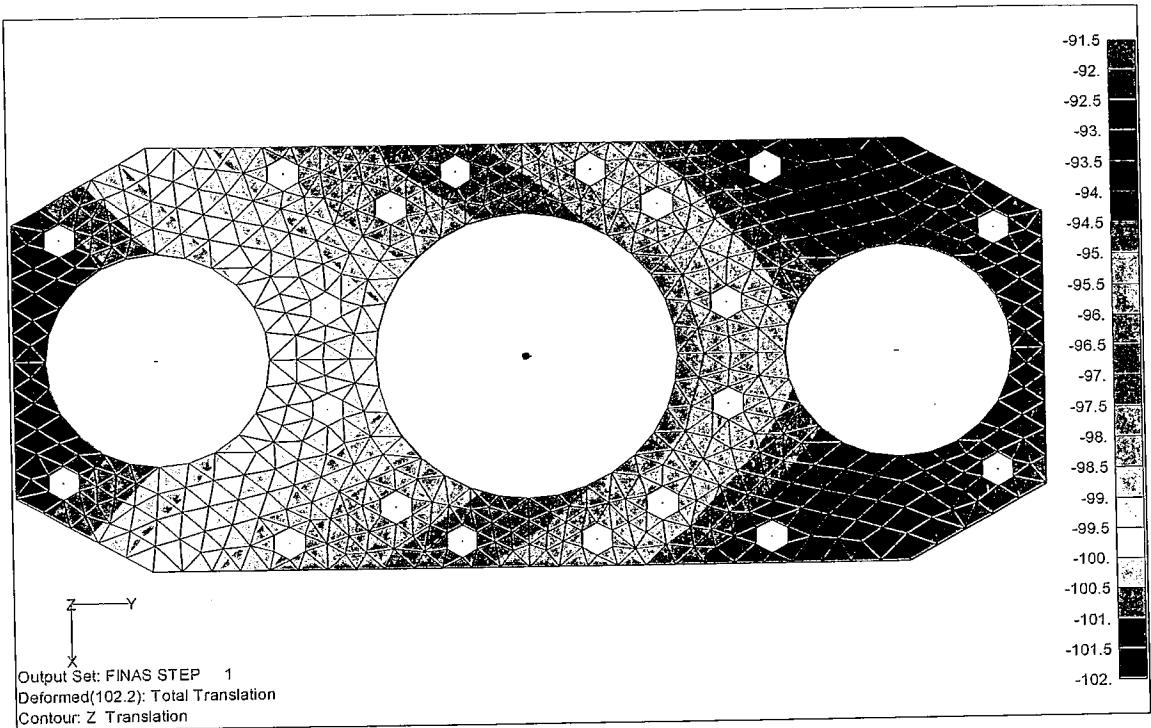
(4) まとめ

水平内重量のアンバランスはロッキング振動に大きな影響を与えるため、水平面内での重量アンバランスは小さく抑える必要がある。



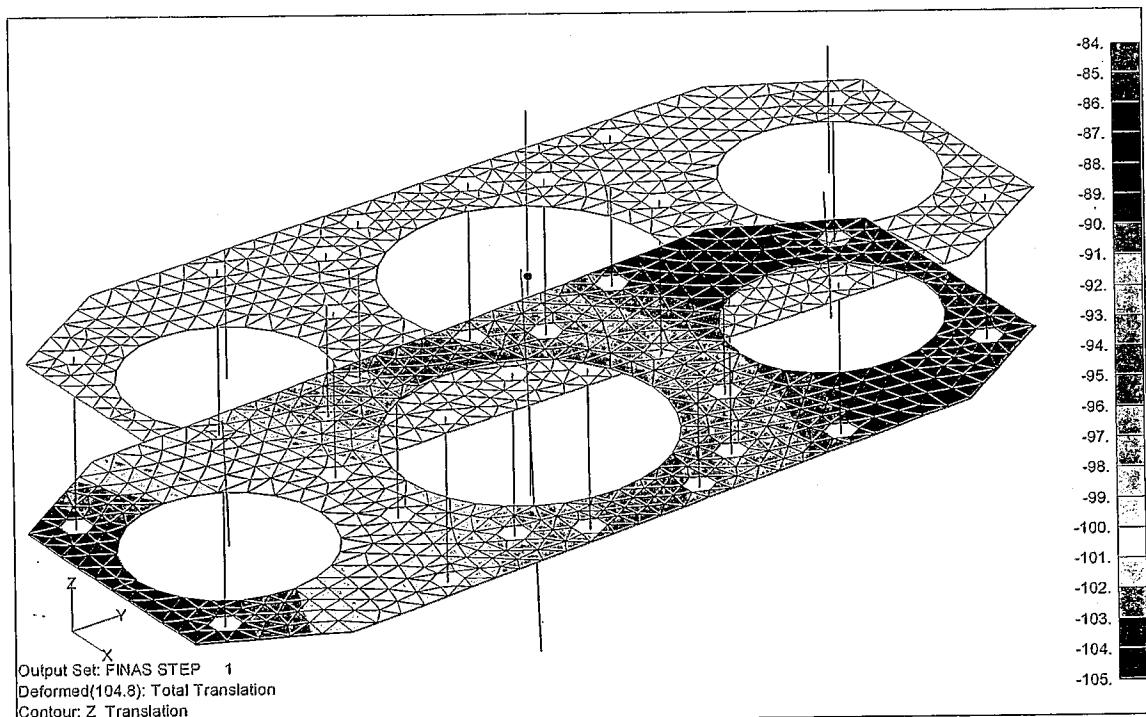
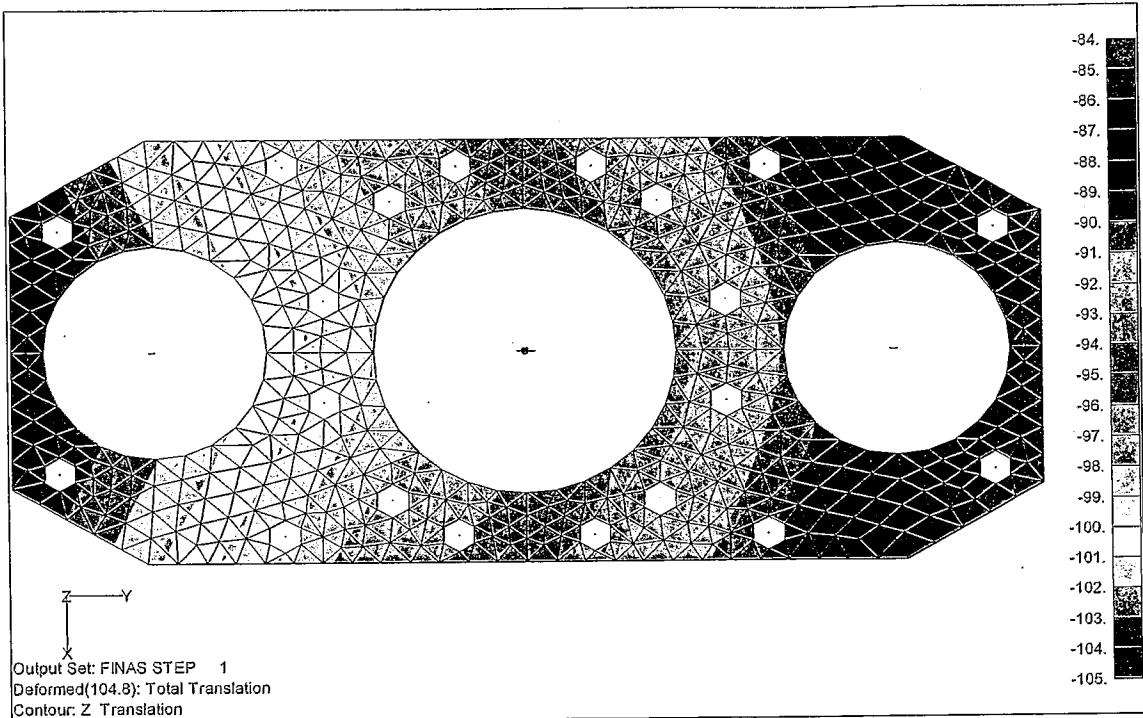
ケース 0：重量不均衡なし

図 2.2.2.5-1(1/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布



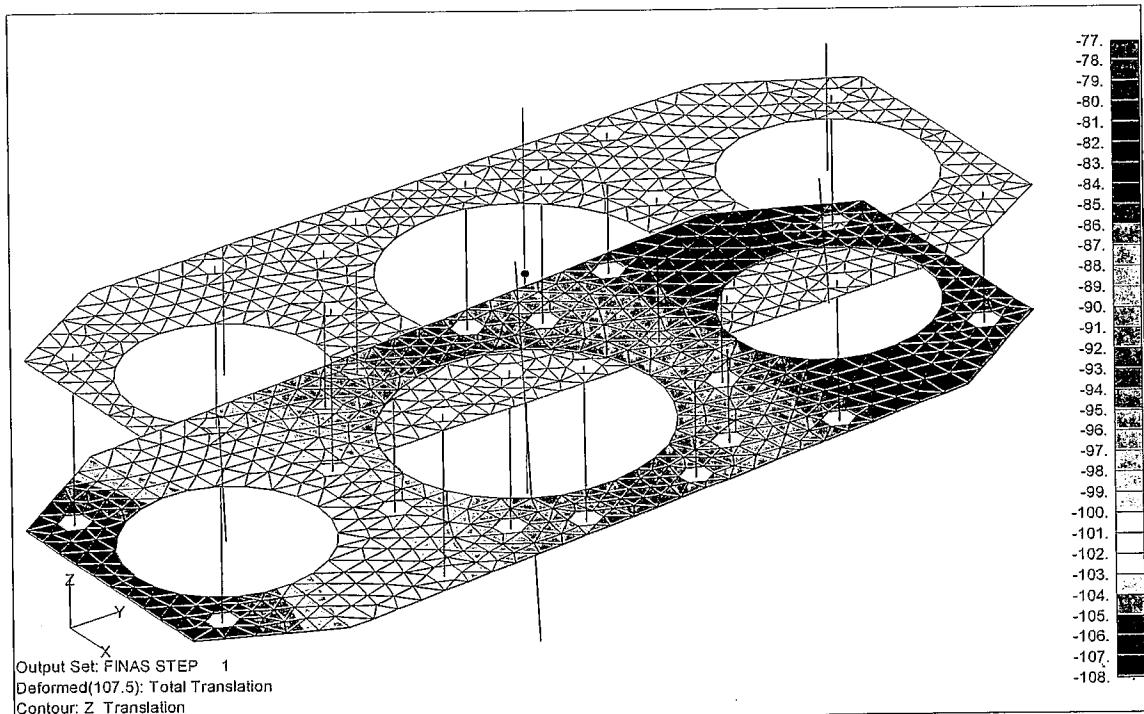
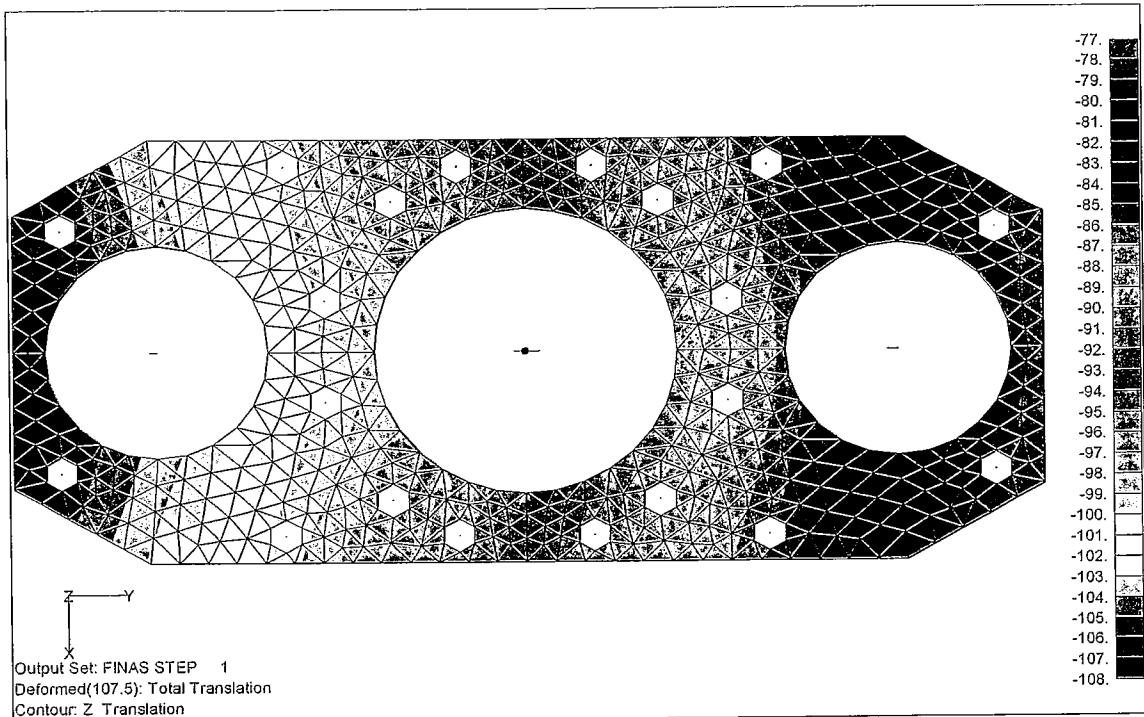
ケース 1 : IHX 重量減少 100ton

図 2.2.2.5-1(2/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布



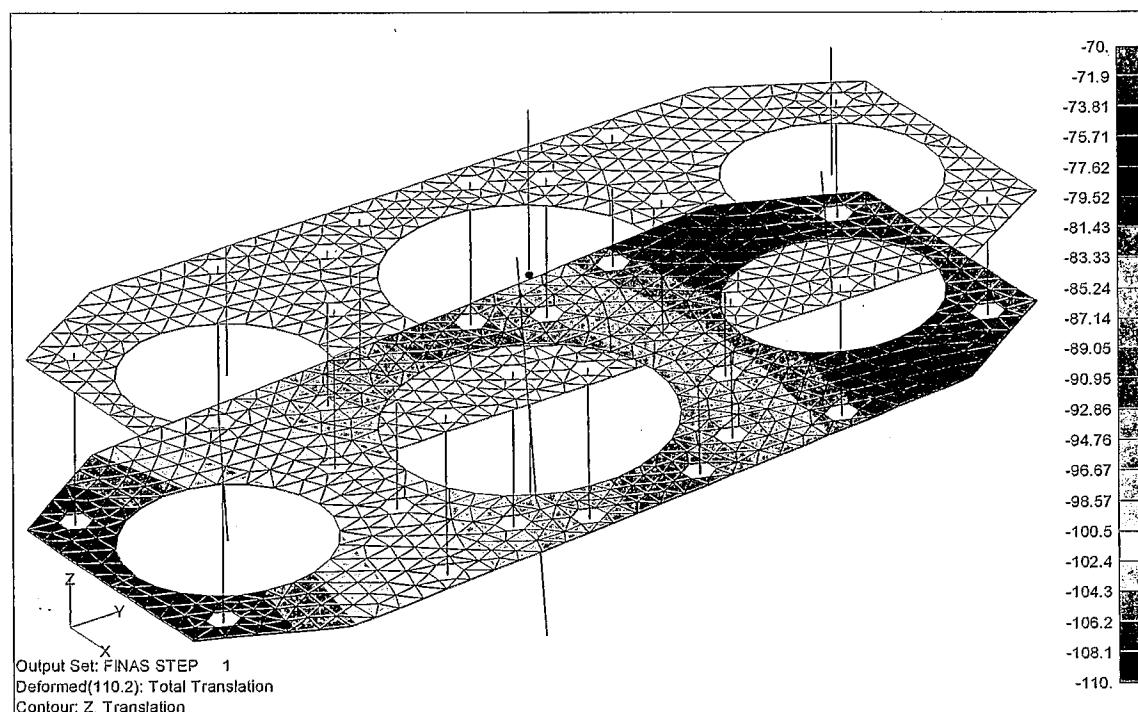
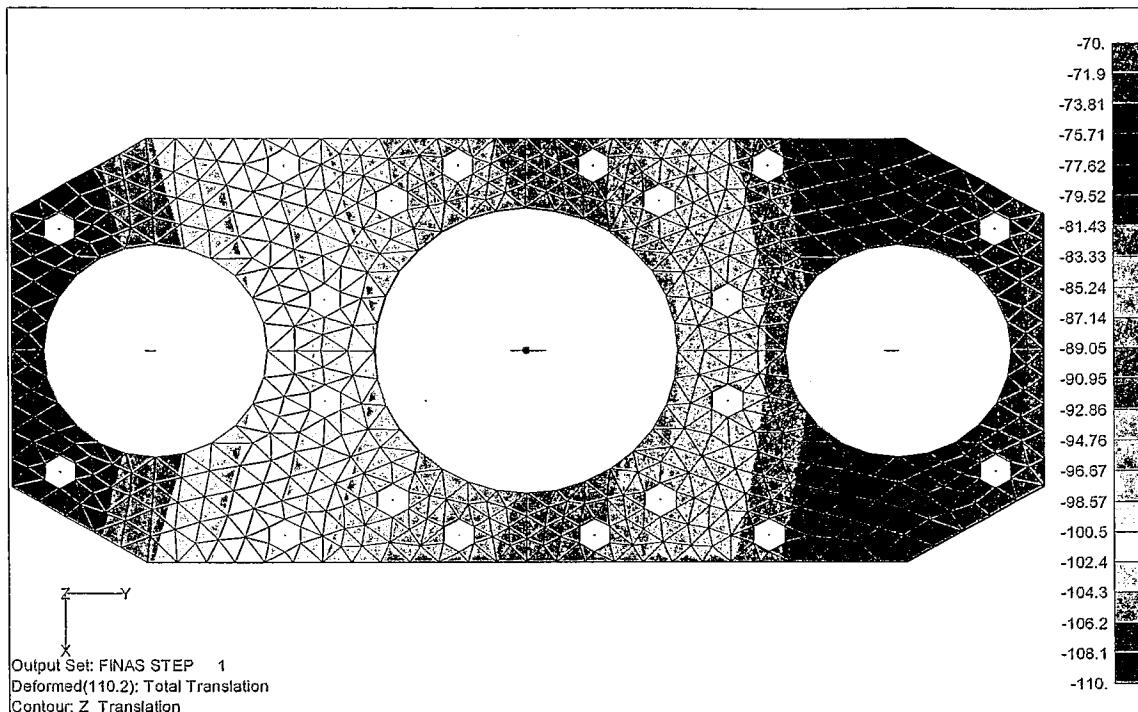
ケース2 : IHX 重量減少 200ton

図 2.2.2.5-1 (3/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布



### ケース3：IHX重量減少300ton

図2.2.2.5-1(4/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布



ケース 4 : IHX 重量減少 400ton

図 2.2.2.5-1 (5/5) 自重によるコモンデッキの上下変位分布

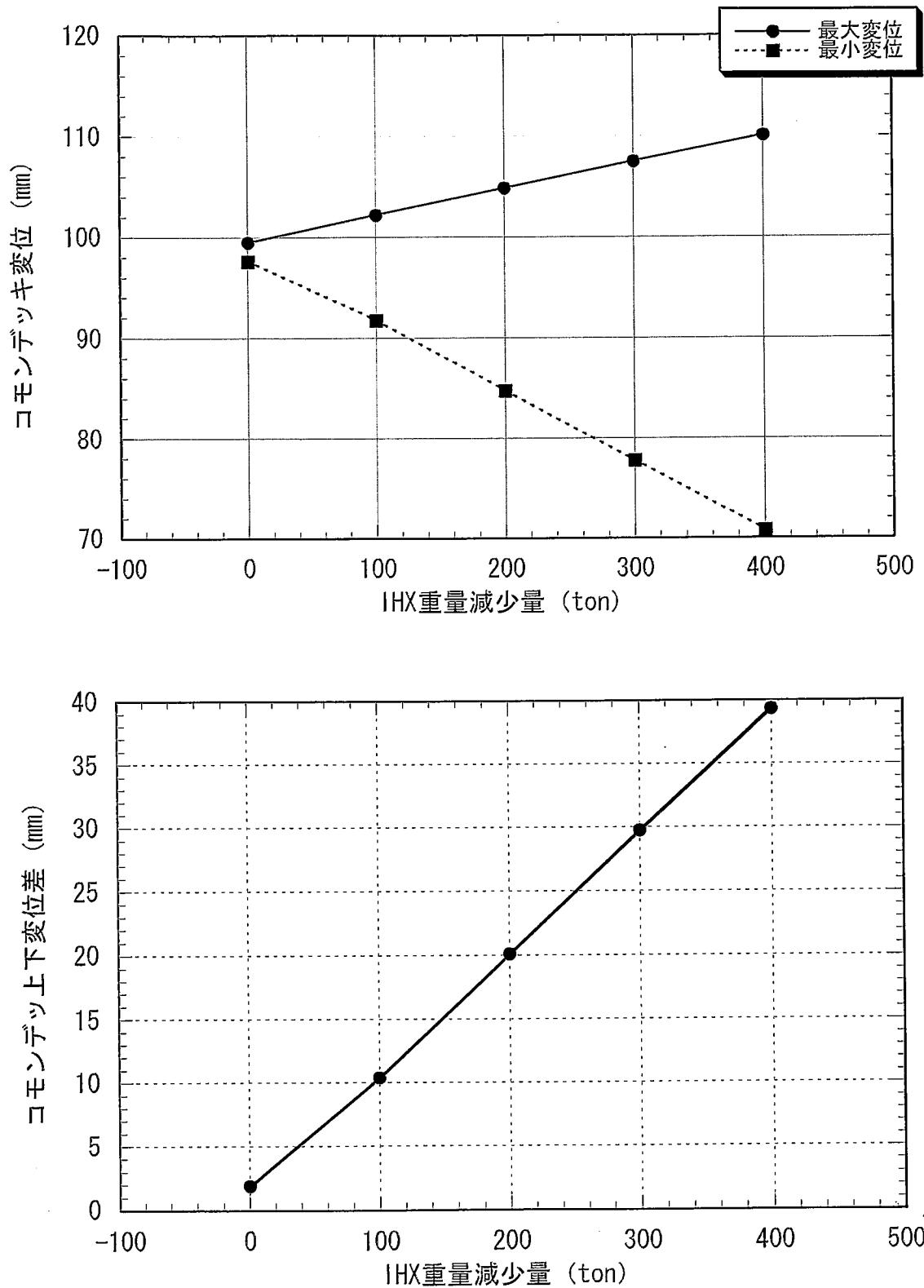
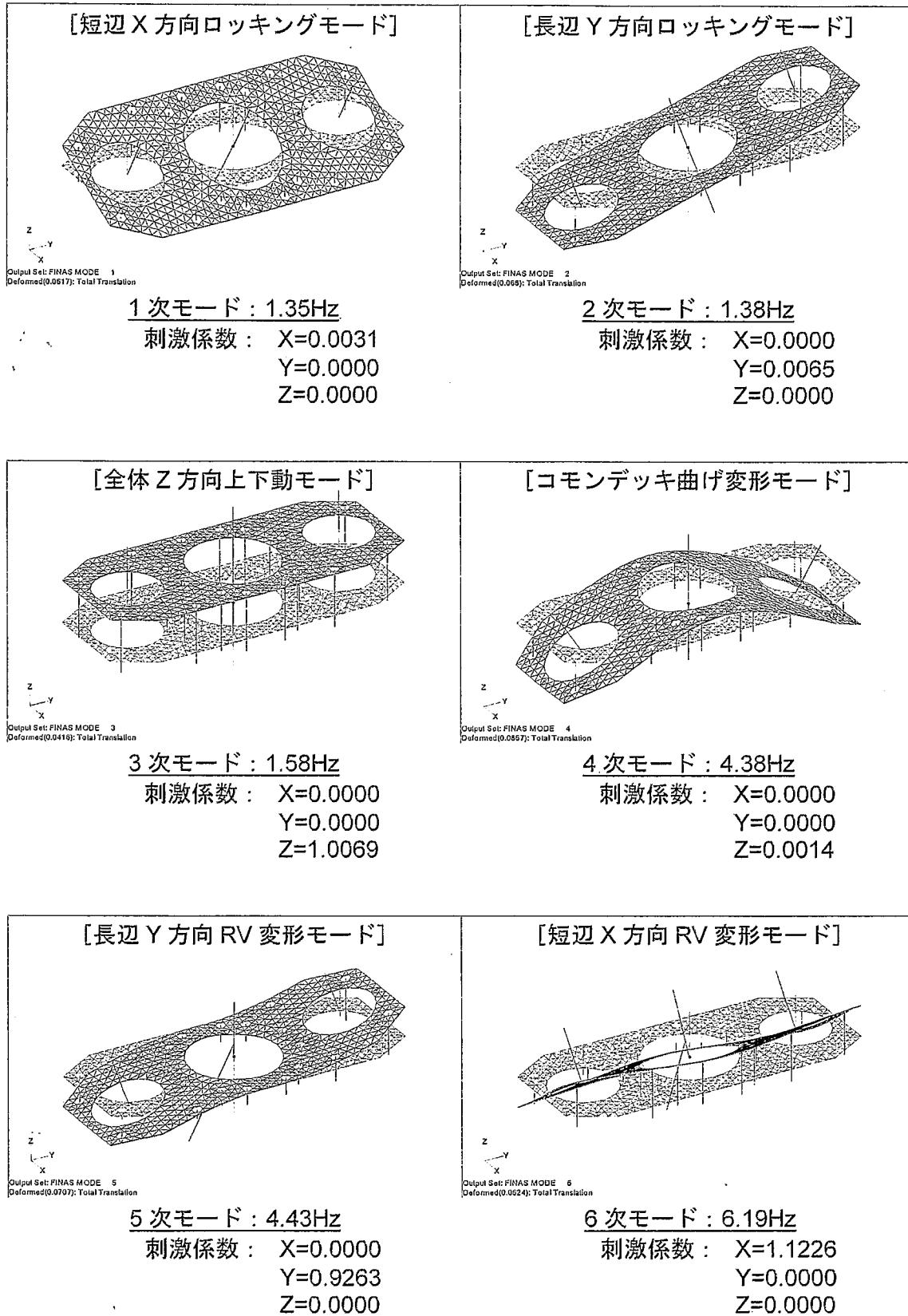
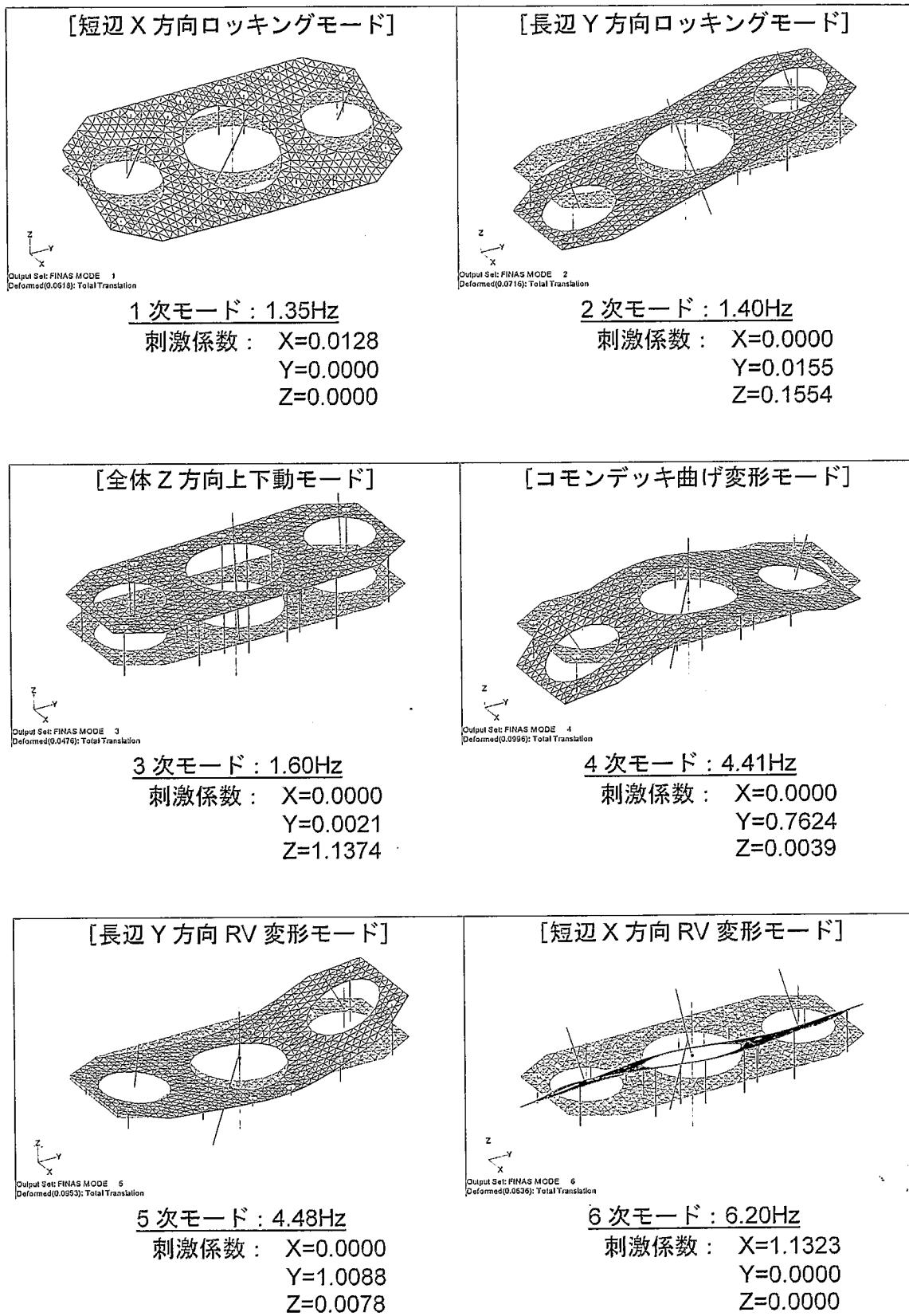


図 2.2.2.5-2 自重によるコモンデッキ上下変位と IHX 重量減少量の関係



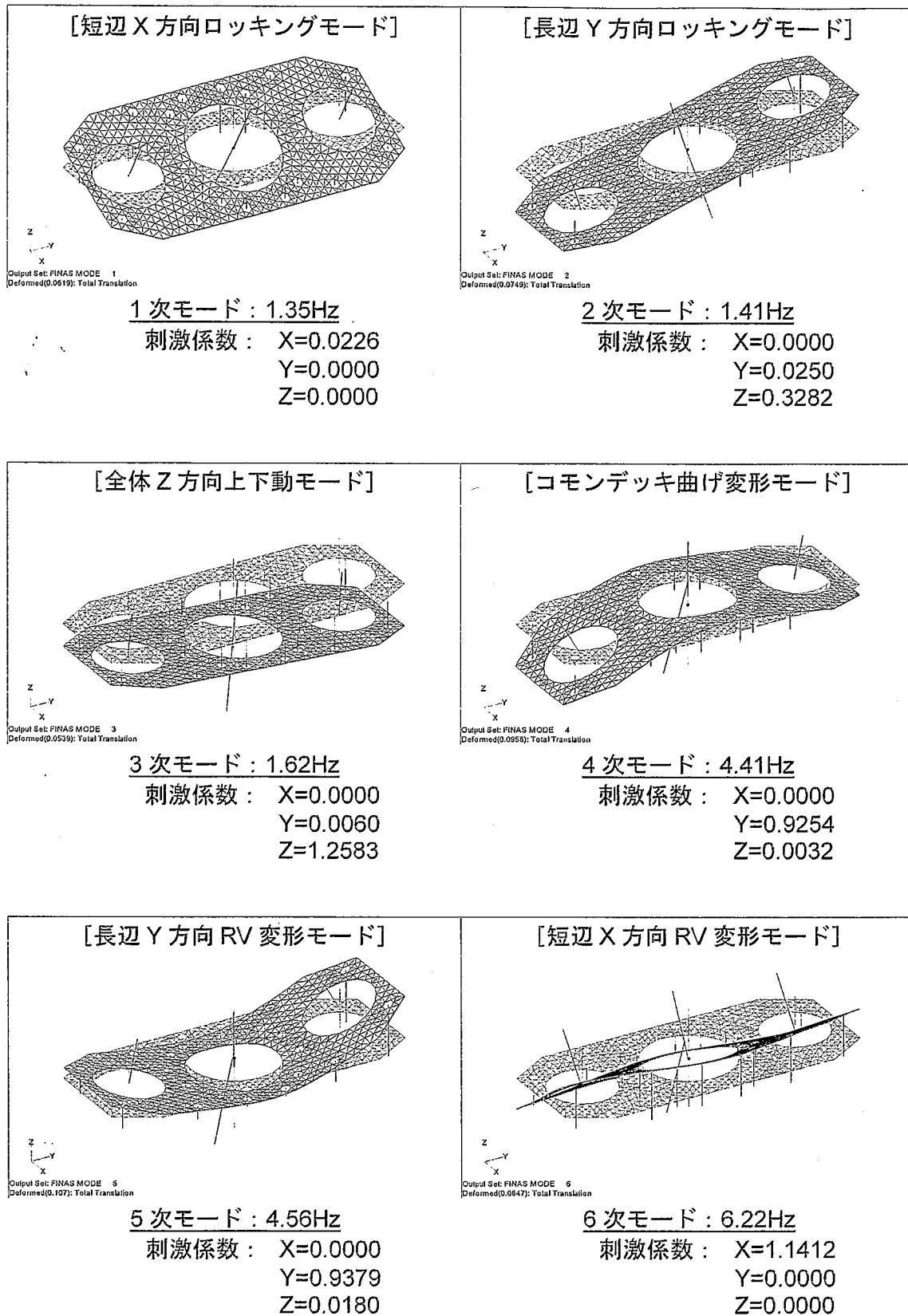
ケース 0 : 重量不均衡なし

図 2.2.5-3(1/5) 振動モード



ケース 1 : IHX 重量-100ton

図 2.2.2.5-3(2/5) 振動モード

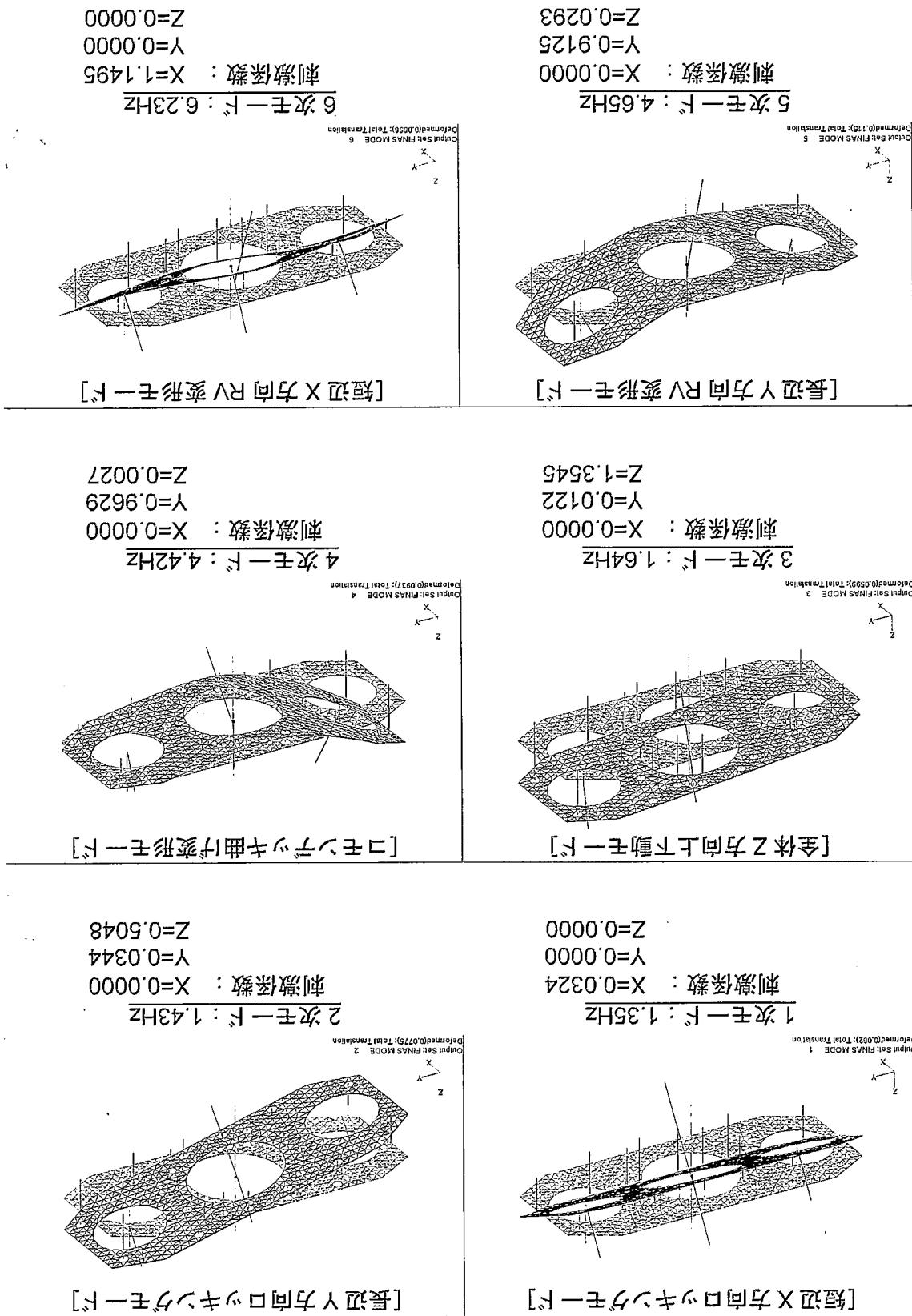


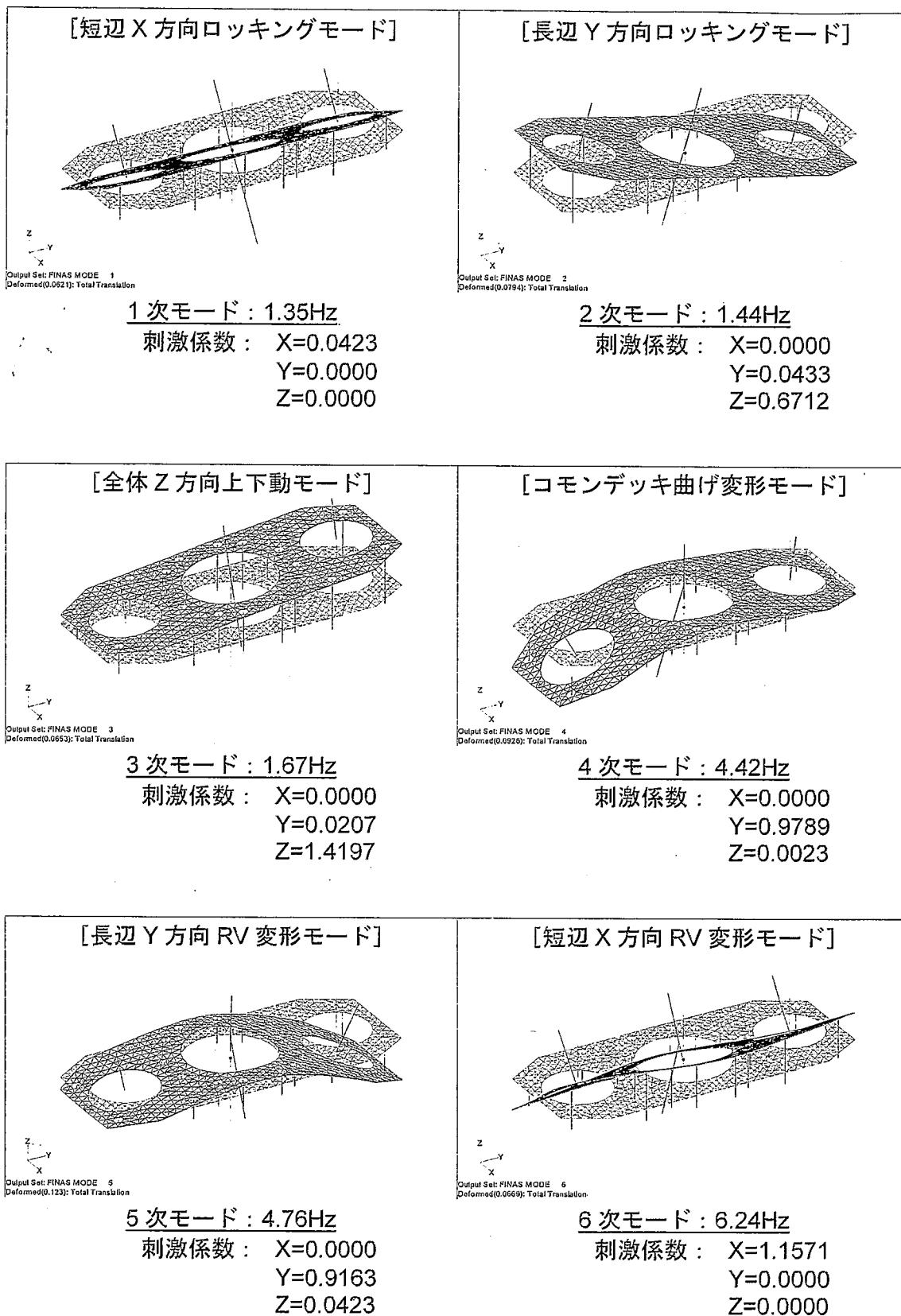
ケース 2 : IHX 重量-200ton

図 2.2.2.5-3(3/5) 振動モード

图 2.2.5-3(4/5) 振動子一 F

7-2-3 : IHX 重量-300ton





ケース 4 : IHX 重量-400ton

図 2.2.2.5-3(5/5) 振動モード

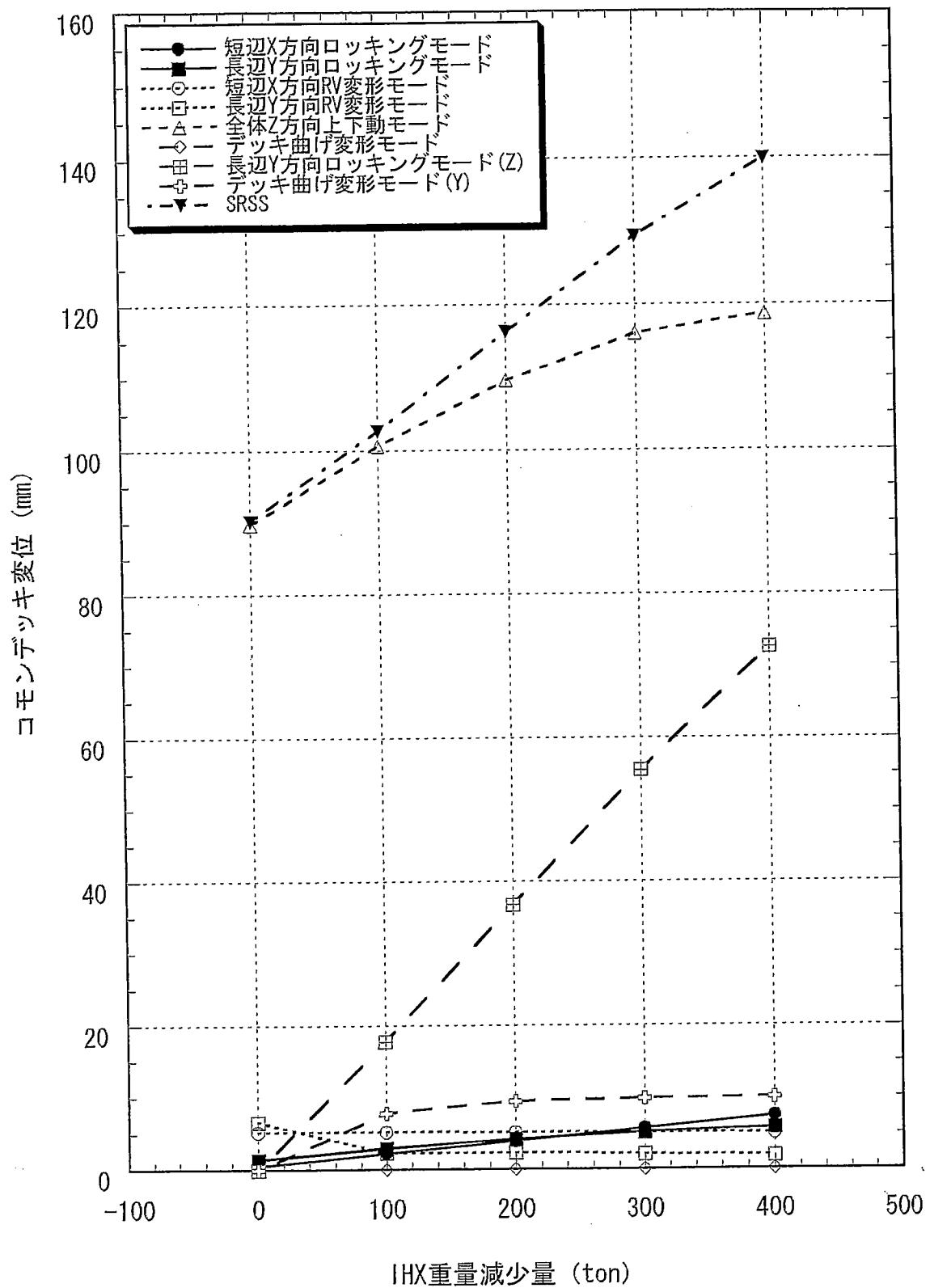


図 2.2.2.5-4 地震によるコモンデッキ上下変位と IHX 重量減少量の関係

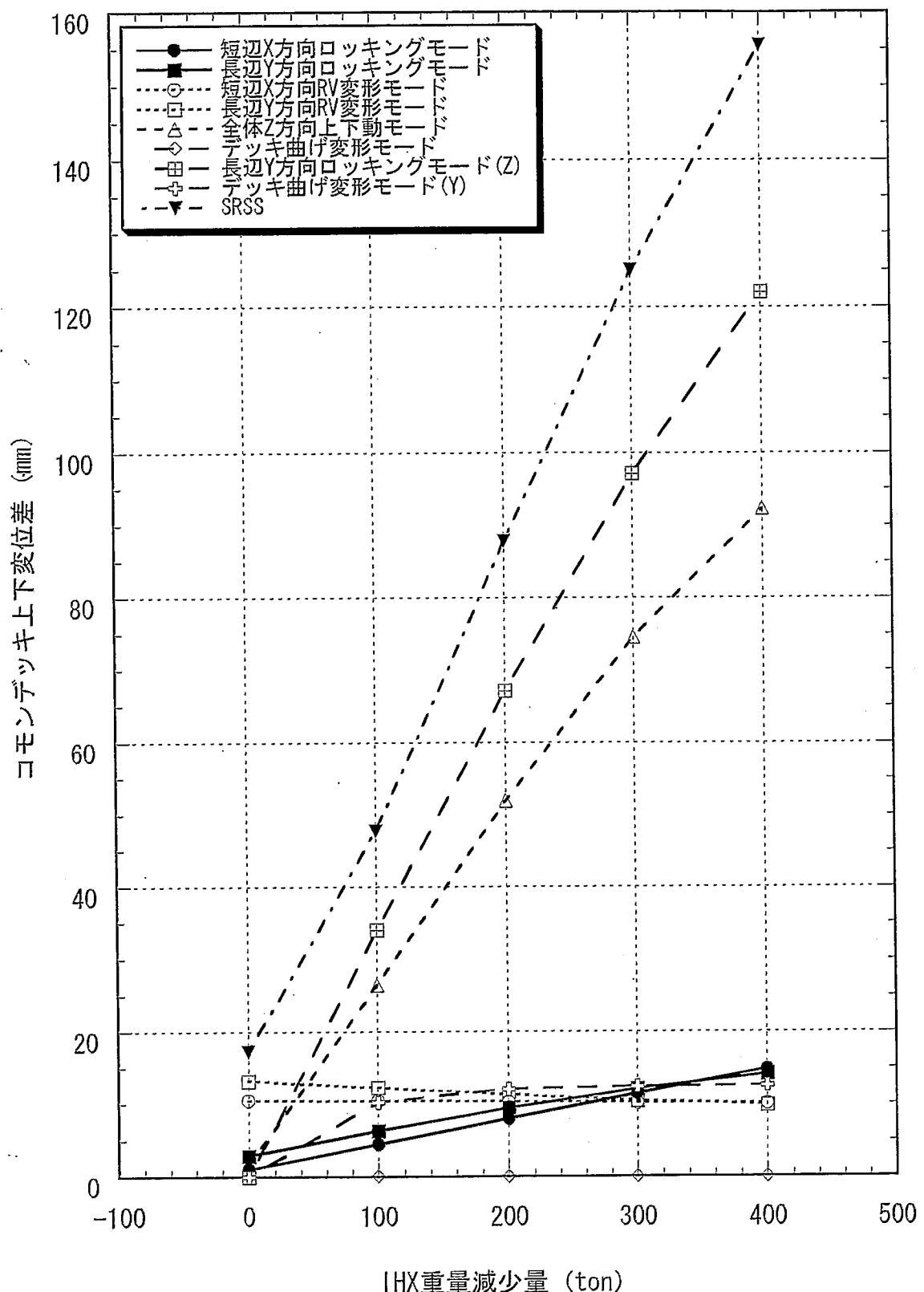


図 2.2.2.5-5 地震によるコモンデッキ上下変位差と IHX 重量減少量の関係

### 2.3 プラント配置検討

#### (1) 目的

従来より建屋水平免震に比べ、コモンデッキ方式の機器上下免震構造を採用した場合には建屋容積が大きくなると想定されている。これは建屋水平免震の建屋にコモンデッキを当てはめた時に生じる増加分を単純に建屋増大分と見なしたことによるものである。本検討では建屋全体の配置を考慮し、建屋水平免震条件と比べて物量増加分をなるべく抑えるような配置を検討する。

#### (2) 検討内容

図 2.3-1～図 2.3-2 に建屋水平免震条件でのナトリウム中型炉の建屋配置図を示す。同図に示す建屋に対し機器上下免震システムを採用した場合の建屋配置について検討する。図 2.3-3～図 2.3-6 に機器上下免震システムを採用した場合の建屋配置を示す。機器上下免震システムを採用することにより短辺方向について 75m から 74m に短縮できた。これは機器上下免震システム採用により生じる空間を利用して 2 次系配管の引き廻しを見直した効果によるものである（従来よりも格納容器内の引き廻しを増やし、格納容器外での引き廻しを減らした）。一方、長辺方向は 85m から 91.6m に増加した。これは皿ばね免震要素の配置による影響が出ている。建屋全体の容積で比較すると建屋水平免震条件での建屋全体の容積 284,200m<sup>3</sup> に対し、294,000m<sup>3</sup> と 3.4% 増加する結果となつた。

#### (3) まとめ

ナトリウム中型炉を対象にコモンデッキ方式の機器上下免震システムを採用した場合の建屋配置の検討を行った。検討の結果、建屋容積の増加割合を建屋水平免震条件に比べ 3.4% 増に抑えることができた。

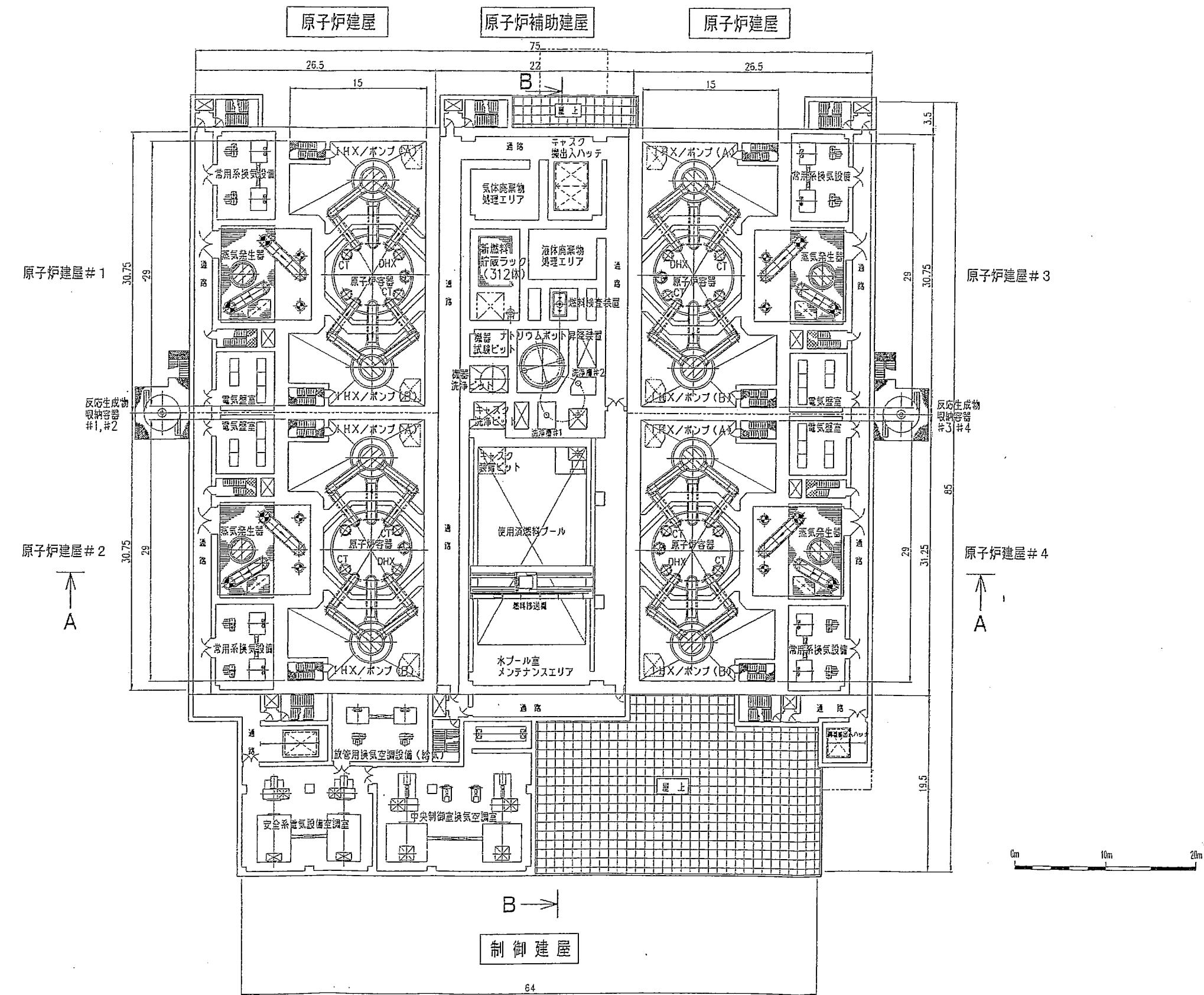


図 2.3-1 ナトリウム中型炉建屋概念図(平面)

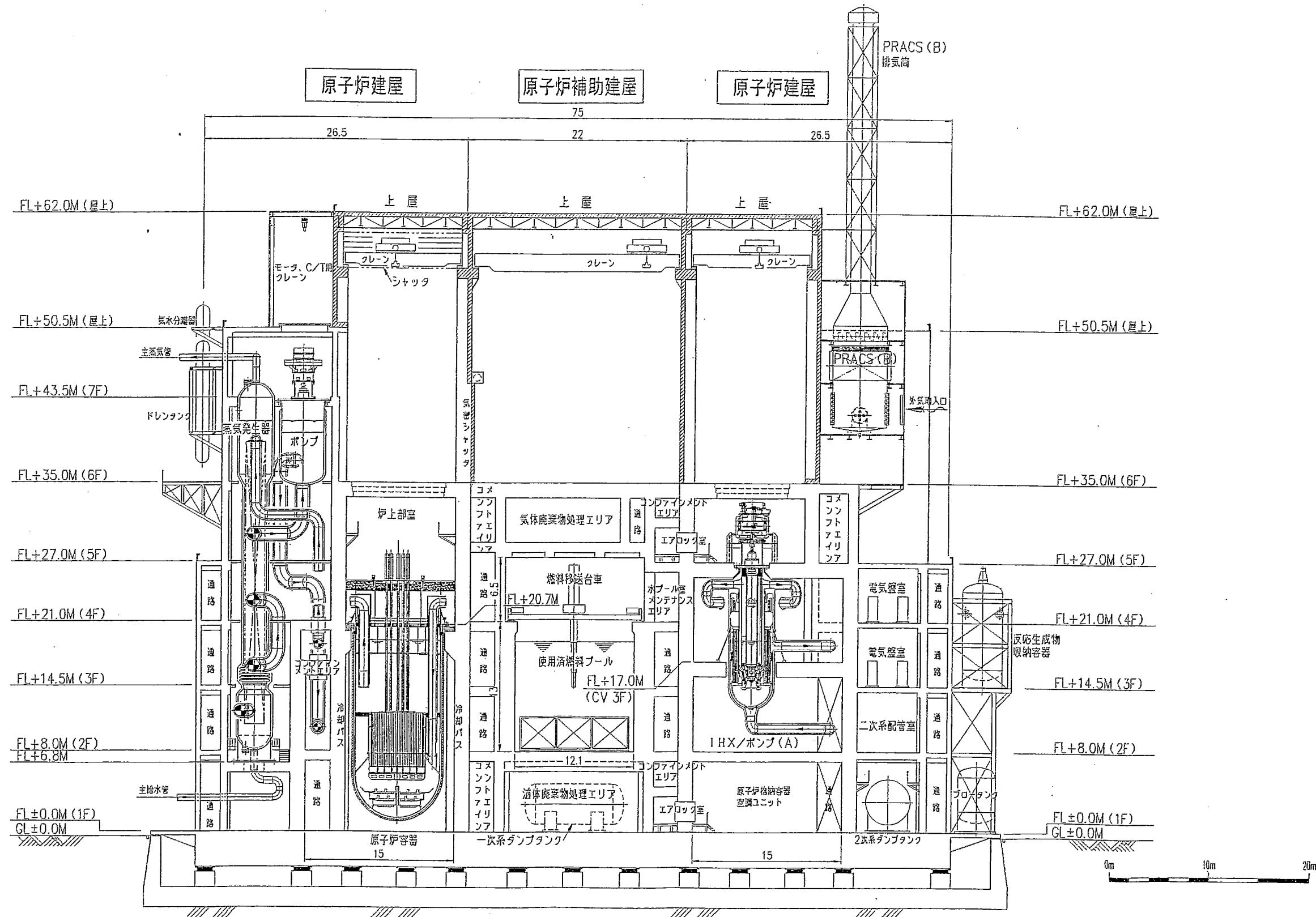


図 2.3-2 ナトリウム中型炉建屋概念図（立面）

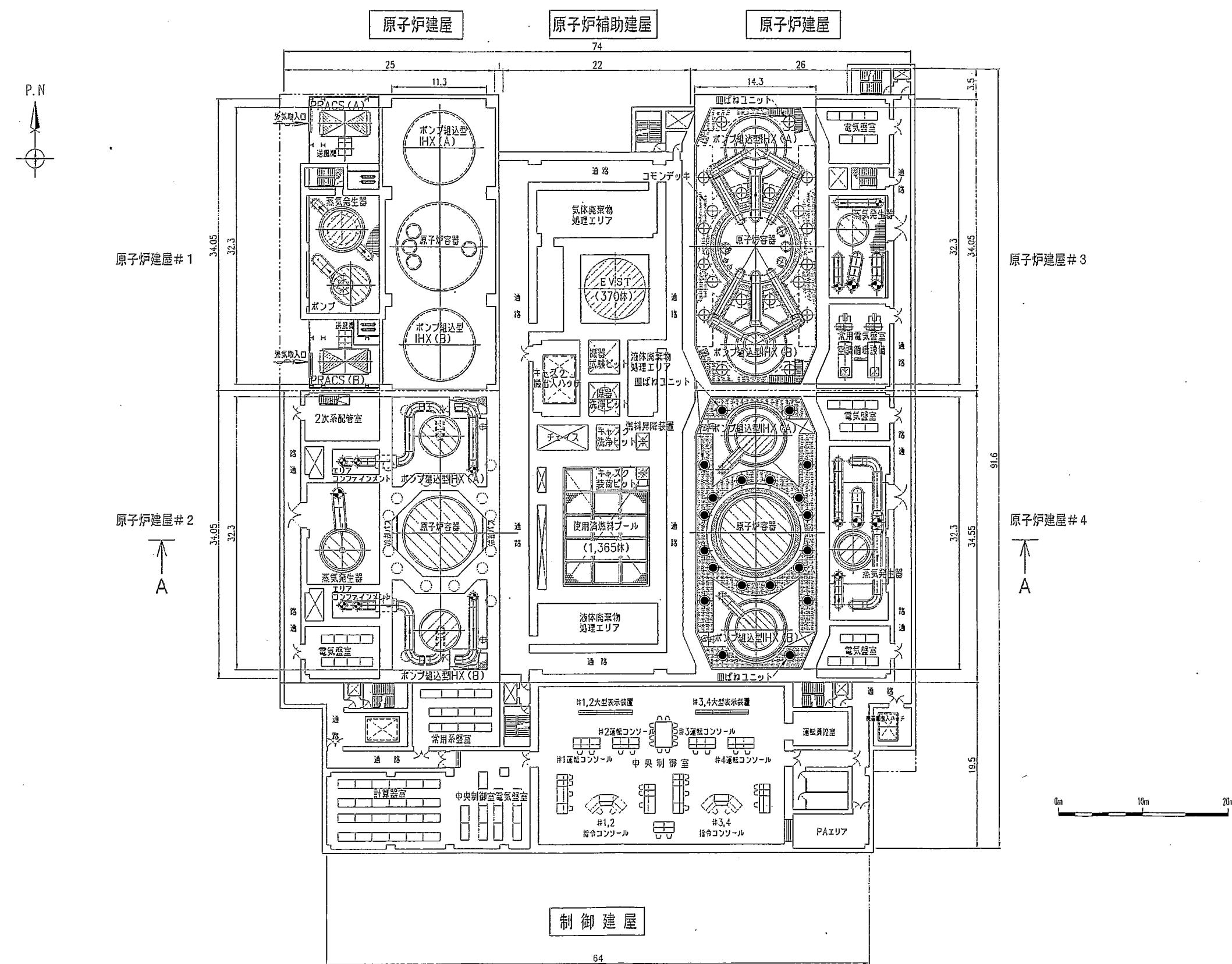


図 2.3-3 ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉施設建屋配置概念図（平面）

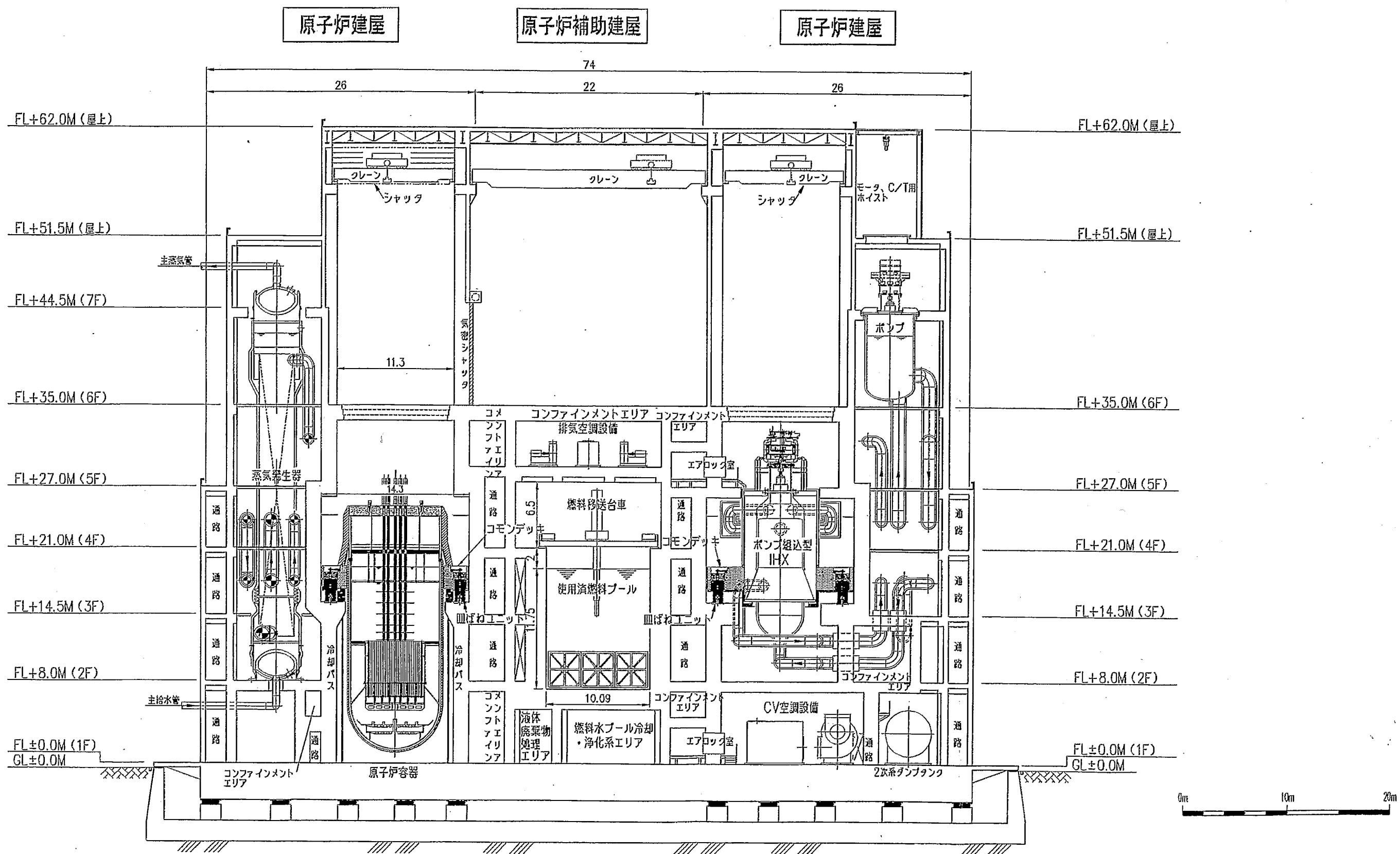


図 2.3-4 ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉施設建屋配置概念図（立面）

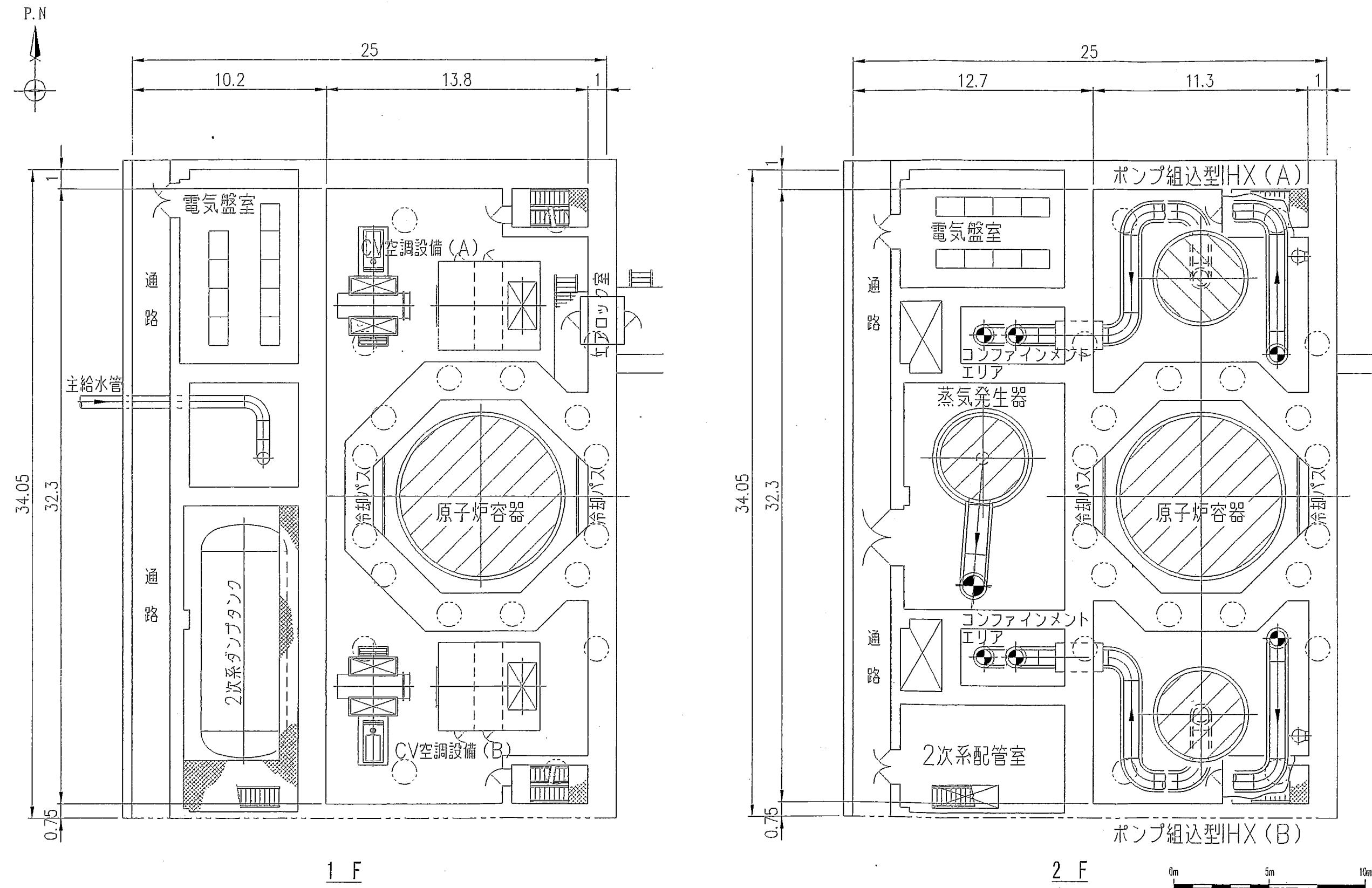


図 2.3-5 (1/4) ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉建屋配置図 (1/4)

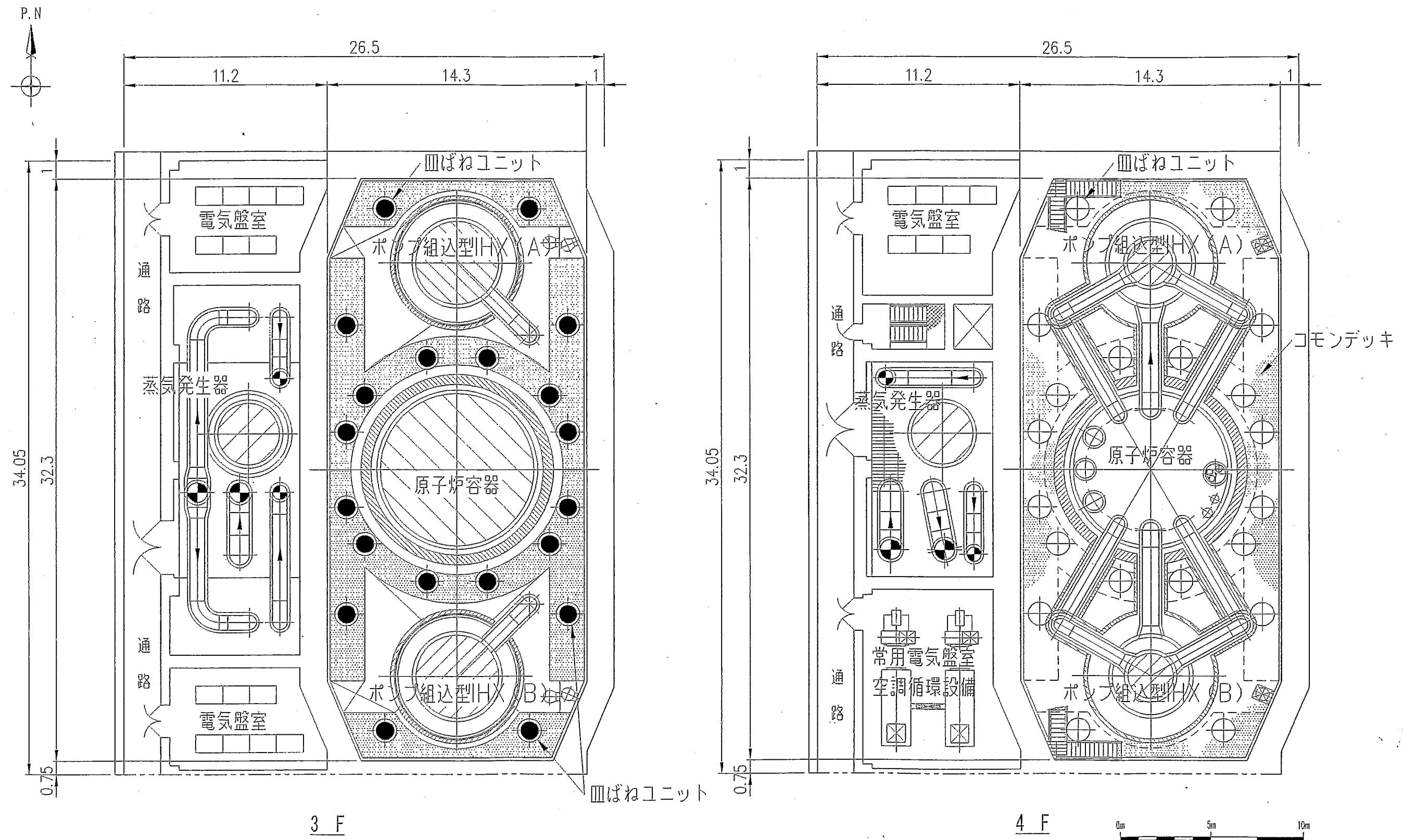


図 2.3-5 (2/4) ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉建屋配置図 (2/4)

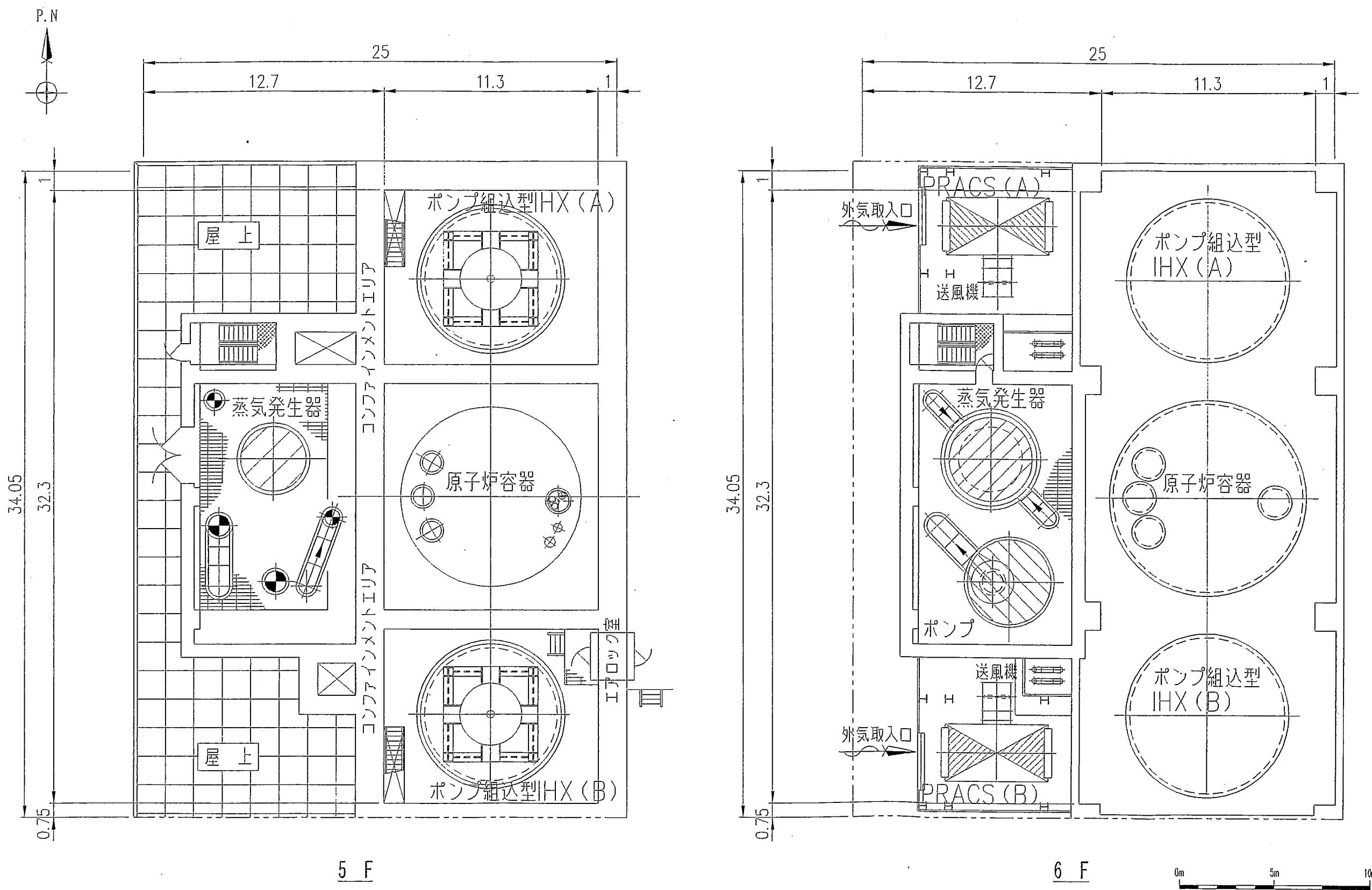


図 2.3-5 (3/4) ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉建屋配置図 (3/4)

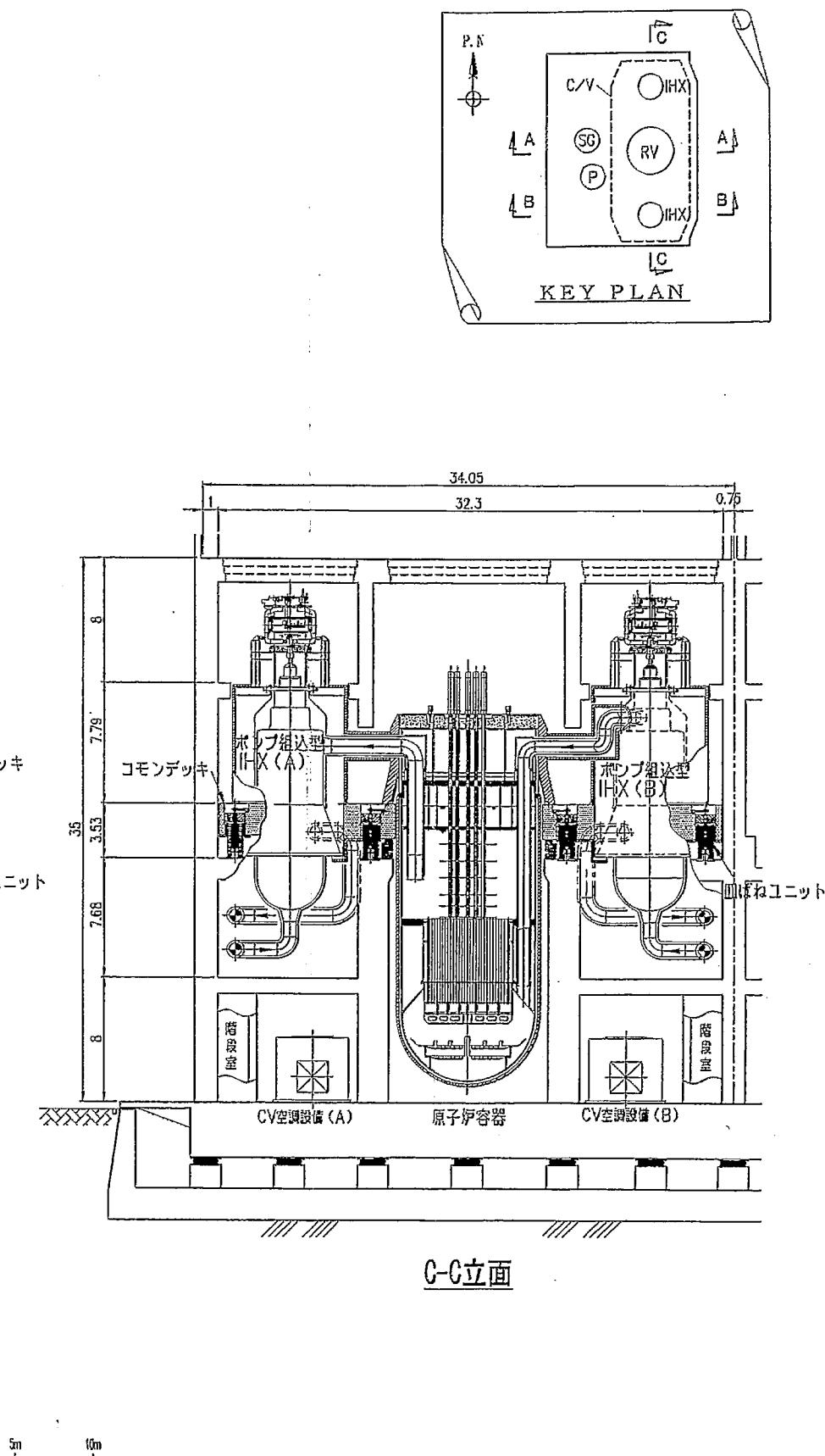
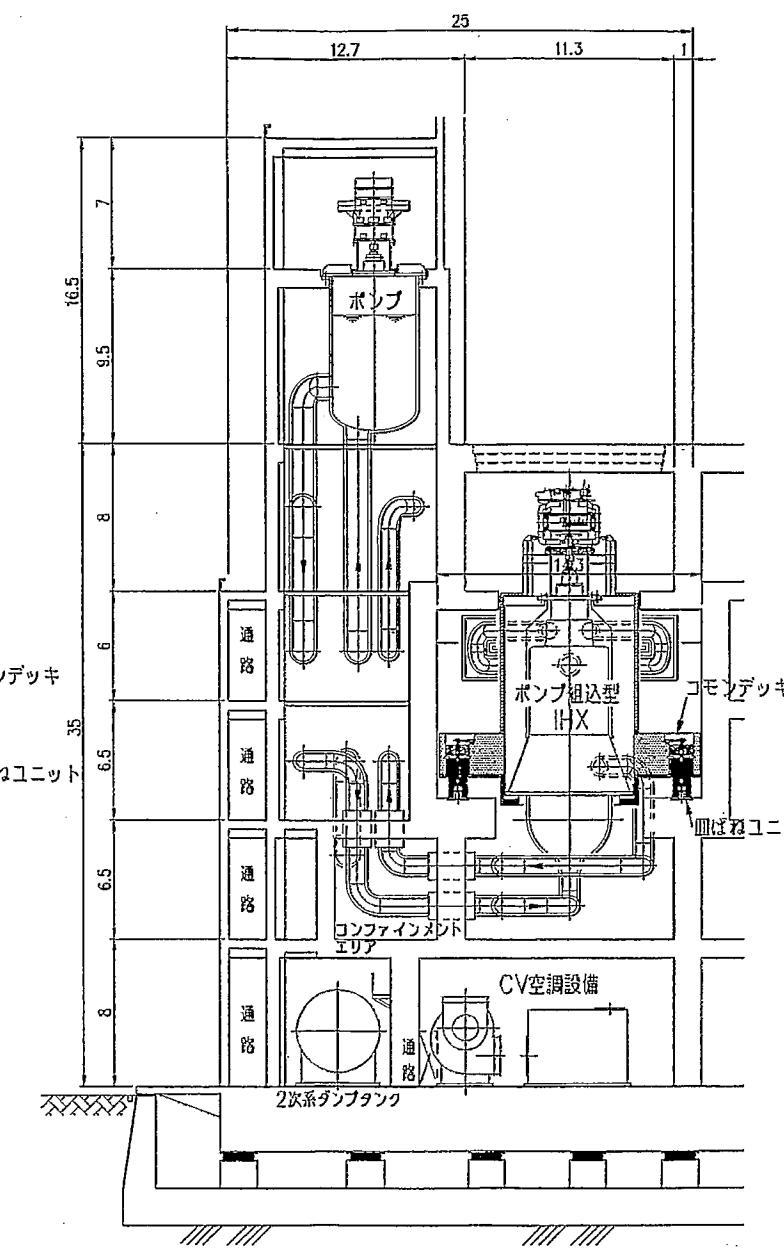
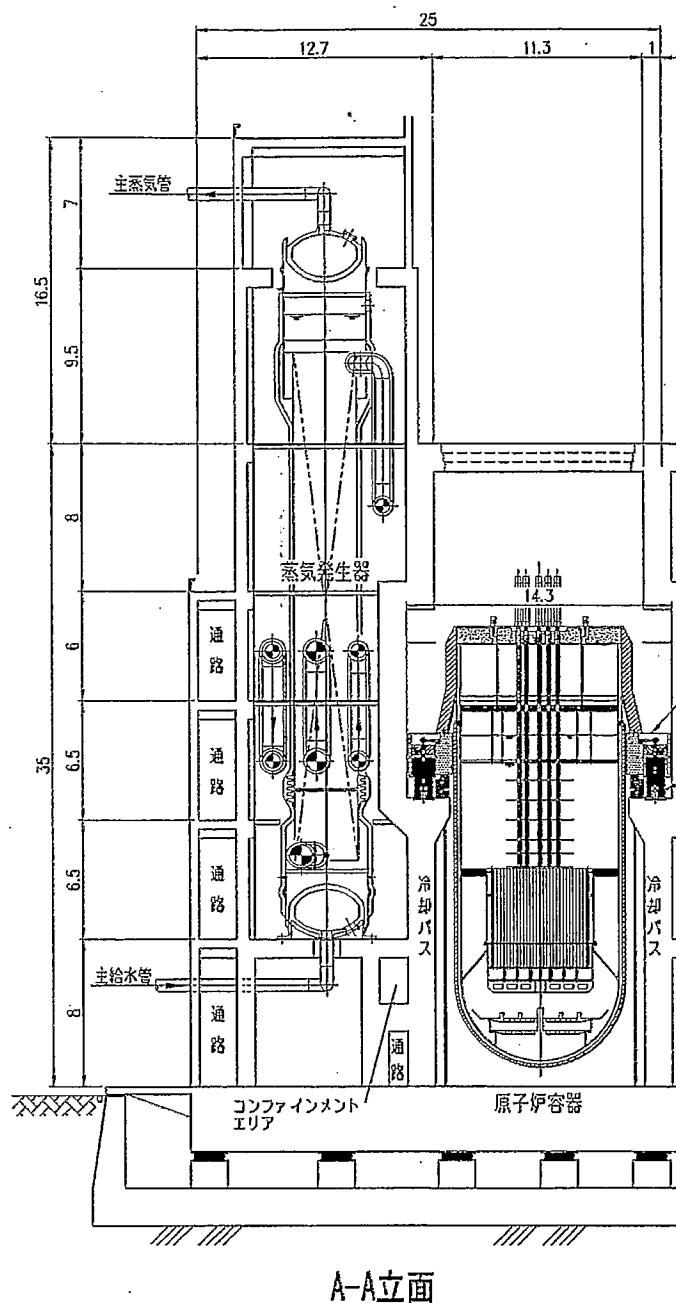


図 2.3-5 (4/4) ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉建屋配置図 (4/4)

## 原子炉建屋容積

$$\textcircled{1} \quad 504\text{m}^2 \times 62.0\text{m} = 31,248\text{m}^3$$

$$\textcircled{2} \quad 124\text{m}^2 \times 51.5\text{m} = 6,386\text{m}^3$$

$$\textcircled{3} \quad 221\text{m}^2 \times 27\text{m} = 5,967\text{m}^3$$

$$\textcircled{4} \quad 15\text{m}^2 \times 53.5\text{m} = 803\text{m}^3$$

$$\textcircled{5} \quad 11\text{m}^2 \times 35.0\text{m} = 385\text{m}^3$$

$$\textcircled{6} \quad 11\text{m}^2 \times 35.0\text{m} = 385\text{m}^3$$

$$1\text{ユニット合計} = 45,174\text{m}^3$$

$$45,174\text{m}^3 \times 4 = 180,696\text{m}^3$$

$$\textcircled{A1} \quad 21\text{m}^2 \times 30\text{m} \times 2 = 1,260\text{m}^3$$

$$180,696\text{m}^3 + 1,260\text{m}^3 = 181,956\text{m}^3$$

$$\underline{\text{容積}=182,000\text{m}^3}$$

$$\underline{\text{補助建屋容積(H15中間と同じ)} = 約79,800\text{m}^3}$$

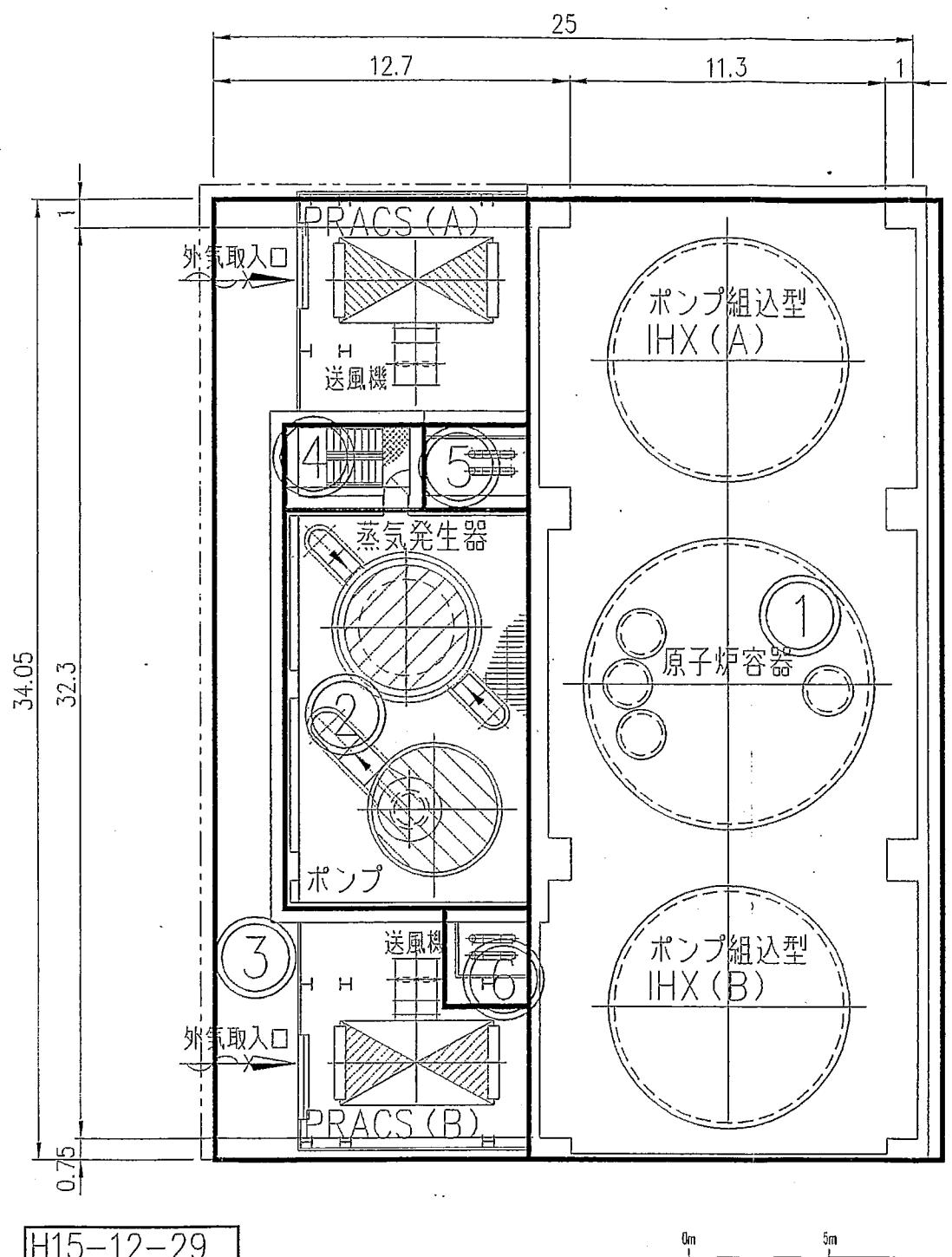
$$\underline{\text{制御建屋容積(H15中間と同じ)} = 約32,200\text{m}^3}$$

$$\underline{\text{合計}=294,000\text{m}^3}$$

## 格納容器容積

$$\underline{\text{容積}=13,508\text{m}^3}$$

$$(H15年度中間容積=13,391\text{m}^3)$$



H15-12-29

1プラント容積=約147,000m<sup>3</sup>建屋全体容積=294,000m<sup>3</sup>(平成15年度容積=284,200m<sup>3</sup>)

図 2.3-6 ナトリウム中型炉機器上下免震原子炉建屋配置図（容積）

### 3. まとめ

#### (1) 機器上下免震要素の免震周期変更の影響に関する調査

皿ばね直列（枚数）削減による短周期化の可能性について検討を行った。皿ばね免震要素の合理化により、上下免震システムとしての減衰装置及び水平支持装置をコンパクトにまとめることができた。

また、皿ばね免震要素合理化に伴う建屋配置への影響の検討を行った。皿ばね外径の縮小によるコモンデッキサイズへの削減効果は小さく、建屋配置合理化への効果も小さい見通しである。

#### (2) 機器上下免震システムの検討

ナトリウム中型炉を対象にコモンデッキ方式の機器上下免震システムの成立性に関する検討を行った。検討結果を以下に示す。

- ・ナトリウム中型炉に採用するコモンデッキ形状として以下を選定した。
  - コモンデッキ高さ 2.25m、鋼板板厚 50mm、皿ばね 1 基の支持重量 301 トン
  - ・コモンデッキの上下の重量アンバランスはロッキング振動に大きな影響を与えるため、上下の重量アンバランスは小さく抑える必要がある。
  - ・コモンデッキ水平面内での重量アンバランスはロッキング振動に大きな影響を与えるため、水平面内での重量アンバランスは小さく抑える必要がある。
  - ・皿ばね剛性を大きくすると全体上下動による変位は小さくなるが、ロッキングによる変位が大きくなる傾向があり、皿ばねの剛性を高くすることによるコモンデッキ変位の抑制効果は期待できない。
  - ・コモンデッキの面外変形は 25mm まで許容できる。（コモンデッキの上下変位を 100mm 以下に制限する場合）

#### (3) プラント配置検討

ナトリウム中型炉を対象にコモンデッキ方式の機器上下免震システムを採用した場合の建屋配置の検討を行った。検討の結果、建屋容積の増加割合を建屋水平免震条件に比べ 3.4% 増に抑えることができた。