

高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ)

中間熱交換器の浮動支持による一次主冷却配管短縮化の検討

1988年8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)

高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ)

中間熱交換器の浮動支持による一次主冷却配管短縮化の検討

田村政昭, 竹内則彦, 中西征二

谷山 洋

要 旨

高速増殖炉(LMFBR)の開発においては, 実用化の観点から軽水炉並みの安全性を確保しつつ, 如何にしてプラント建設コストを低減するかが重要な課題となっている。現在, 建設コストの低減のため多大の努力が傾注されているが, 熱輸送系配管の短縮化もその有効な方策の一つと考えられている。

配管短縮化方策としては種々提案されているが, ここでは軽水炉で採用されて十分な実績を有する機器浮動支持方式を対象に, 中間熱交換器を浮動支持した一次主冷却系について, LMFBRの特徴を考慮した設計手法を取り入れてその成立性を評価した。

配管については自重, 定格運転時および熱過渡時の熱膨張並びに地震に対して, ノズルについては内圧, 自重, 地震応力, 熱膨張応力および熱過渡に対して評価した。その結果, すべての項目について許容値におさまリ, また配管支持装置も実現の高いものであることが明らかとなり, その成立性が十分あることが確認できた。

Study on the Main Design Parameters of Large Scale Fast Breeder Reactor (II)

Investigation on Reduction of Piping Length by Application of IHX Floating Support Piping to Primary Main Heat Transport System Piping of LMFBR.

M.TAMURA, N.TAKEUCHI
S.NAKANISHI, H.TANIYAMA

Abstract

Current emphasis in the development of liquid-metal cooled fast breeder reactors (LMFBRs) is placed on the reduction of the plant construction cost without spoiling the safety in view of its practical application. So much effort is paid for the cost reduction.

The reduction of piping length of heat transport system piping is considered as an effective measure for the cost reduction. An application of component floating support piping which brings good results in LWR leads to reduction of piping length and it is an effective measure as well as bellows expansion joint piping and high-chrome-steel piping in LMFBR.

A design study for the application of the IHX floating support piping system to primary main heat transport system piping of LMFBR was conducted to demonstrate the adequacy of the piping system by using the improved structural design method considering the characteristics of LMFBR. The stress analysis of piping due to dead weight, thermal expansion at steady and transient conditions, and earthquake was performed, while the nozzles stress due to internal pressure, dead weight, earthquake and thermal expansion reaction force, and thermal transients was analyzed. It was confirmed that the analytical results were satisfied the allowable values and the piping support equipments were highly put into practical use. Therefore it was concluded that the adequacy of the IHX floating support piping system was demonstrated.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, OEC.

目 次

1. はじめに	1
2. 検討条件	2
2.1 一般検討条件	2
2.2 荷重条件	2
2.3 熱過渡条件	2
2.4 評価条件	3
2.5 その他の条件	3
3. 解析モデルの検討	18
3.1 耐震支持方法の検討	18
3.2 応力低減方策の検討	18
4. I H X浮動支持方式の成立性の検討	28
4.1 弾性追従評価	28
4.2 配管の健全性評価	40
4.2.1 解析モデル	40
4.2.2 自重による解析	40
4.2.3 熱膨張解析	40
4.2.4 耐震解析	41
4.2.5 総合評価	44
4.3 ノズルの健全性評価	65
4.3.1 熱膨張及び耐震解析モデル	65
4.3.2 熱膨張解析及び耐震解析	66
4.3.3 熱過渡解析モデル	66
4.3.4 熱過渡解析	66
4.3.5 総合評価	67
5. 支持構造物の検討	90
5.1 I H X中間胴部支持構造物	90
5.2 C/L配管ポンプ側レストレイント	90
6. ま と め	94
7. 結 言	95
8. 謝 辞	96
9. 参考文献	97
10. 添付資料	98

表 リ ス ト

表 2.1	一般検討条件	4
表 2.2	配管仕様および解析条件	4
表 2.3	ノズル剛性	5
表 2.4	1次系配管の応力評価用荷重ヒストグラム	6
表 3.1	耐震支持力法検討のためのモデルの説明	21
表 3.2	応力のまとめ	22
表 3.3	モード毎の地震応力とその主な成分	23
表 4.1.1	2次系配管の剛性	30
表 4.1.2	IHXコラムの剛性	31
表 4.1.3	熱膨張応力の比較(2次系配管を剛性模擬)	32
表 4.1.4	熱膨張応力の比較(2次系配管, IHXコラムを剛性模擬)	33
表 4.1.5	熱膨張応力の比較(2次系, IHXコラムを剛性模擬, C/L削除)	34
表 4.2.1	耐震支持部建造物の剛性値	45
表 4.2.2	地震による応力の評価	45
表 4.2.3	総合応力評価表(ホットレグ配管)	46
表 4.3.1	各ノズルの反力条件	68
表 4.3.2	各荷重に対する発生応力強さ(H/L)	69
表 4.3.3	各荷重に対する発生応力強さ(X/L)	70
表 4.3.4	各荷重に対する発生応力強さ(C/L)	71
表 4.3.5	総合評価表(原子炉容器出口ノズル)	72
表 4.3.6	総合評価表(中間熱交換器入口ノズル)	73
表 4.3.7	総合評価表(中間熱交換器出口ノズル)	74
表 4.3.8	総合評価表(ボンプ入口ノズル)	75
表 4.3.9	総合評価表(ボンプ出口ノズル)	76
表 4.3.10	総合評価表(原子炉容器入口ノズル)	77

図 リ ス ト

図 2.1	原子炉構造図	7
図 2.2	一次系機器配管配置図(高低関係図)	8
図 2.3	一次系機器配管配置図(平面図)	9
図 2.4	中間熱交換器	10
図 2.5	一次系ポンプ	11
図 2.6	シェル解析によるノズルの剛性評価	12
図 2.7	R/V, IHX, ポンプの温度条件	13
図 2.8	検討用床応答曲線(S ₁ 地震R/V据付レベル)	14
図 2.9	熱過渡条件	15
図 2.10	建屋内配置図(平面図)	16
図 2.11	建屋内配置図(立面図)	17
図 3.1	1次系配管解析モデル	24
図 3.2	床応答曲線(S ₁ 地震)と固有振動数との関係	25
図 3.3	床応答曲線(S ₁ 地震)と固有振動数との関係(応力低減対策後)	26
図 3.4	一次熱輸送系配管応力解析モデル	27
図 4.1	検討フロー図	35
図 4.1.1	非弾性解析モデル図	36
図 4.1.2	弾塑性応力コンタ(T=250℃)(ミーゼスの応力)	37
図 4.1.3	弾塑性ひずみコンタ(T=500℃)相当塑性ひずみ	38
図 4.1.4	周方向応力とひずみの関係	39
図 4.2.1	自重による変位図	47
図 4.2.2	自重による応力解析結果	48
図 4.2.3	熱膨張による変位(定格運転時)	49
図 4.2.4	熱膨張による応力解析結果(定格運転時)	50
図 4.2.5	熱膨張による変位(熱過渡(I))	51
図 4.2.6	熱膨張による応力解析結果(熱過渡(I))	52
図 4.2.7	熱膨張による変位(熱過渡(II))	53
図 4.2.8	熱膨張による応力解析結果(熱過渡(II))	54
図 4.2.9	検討用基準地震動	55
図 4.2.10	原子炉建物/原子炉補助建物	56
図 4.2.11	建屋解析モデル	57
図 4.2.12	地盤-建屋相互作用解析手法	58

図 4.2.13	地盤条件・埋込み条件による床応答曲線の比較	59
図 4.2.14	支持部のガタを考慮した等価線型剛性	60
図 4.2.15	固有振動数と床応答曲線の関係	61
図 4.2.16	固有振動モード	62
図 4.2.17	水平地震による応力 (S_1)	63
図 4.2.18	水平+鉛直地震による応力 (S_1)	64
図 4.3.1	検討対象ノズル	78
図 4.3.2	ノズル形状	79
図 4.3.3	シェル解析モデル	80
図 4.3.4	ノズルの応力評価点	81
図 4.3.5	原子炉容器出口ノズルの解析モデル及び境界条件	82
図 4.3.6	中間熱交換器出口ノズルの解析モデル及び境界条件	83
図 4.3.7	原子炉容器出口ノズルの熱伝導解析及び熱応力解析評価箇所	84
図 4.3.8	中間熱交換器出口ノズル, ポンプ入口ノズルの熱伝導解析及び熱応力解析評価箇所	85
図 4.3.9	原子炉容器出口ノズルの熱過渡 (II) による応力コンタ (トレス力)	
	$t = 90 \text{ sec}$	86
図 4.3.10	中間熱交換器出口ノズルの熱過渡 (II) による応力コンタ (トレス力)	
	$t = 800 \text{ sec}$	87
図 4.3.11	原子炉容器出口ノズルの評価ライン I での温度履歴 (熱過渡 (II))	88
図 4.3.12	中間熱交換器出口ノズルの評価ライン E での温度履歴 (熱過渡 (II))	89
図 5.1	IHX 中間サポート概念	91
図 5.2	コールドレグレストレイント概念図	92
図 5.3	配管/クランプ取合部構造	93

1. は じ め に

F B Rは軽水がⁱに比べて運転温度が高く、また高温強度とナトリウムとの共存性の要求から材料としてオーステナイト系ステンレス鋼が使用されるため、配管設計については特に熱膨張応力の低減をはかることが重要となる。また熱応力低減のために配管は薄肉となり、地震荷重により生ずる応力と熱応力とのバランスをとることが必要となる。

一方F B R実用化の観点から経済性の向上が要求され、配管長の短縮が重要な課題となっている。配管を短縮するため種々の方策が考えられているが、ここでは以下の基本方針のもとに軽水がⁱで採用され、十分な実績を有する機器浮動支持方式を選んだ。

- (1) 「もんじゅ」までに蓄積された技術及び「もんじゅ」までの技術の延長上で見通せる技術を用いる。
- (2) 許認可性が確保できる範囲で合理化を追求する。
- (3) 経済性、安全性、運転保守性、製作性等についても考慮する。

本検討は静的機器である中間熱交換器を浮動支持することにより、一次熱輸送系配管を短縮する方式をF B Rに適用した場合の成立性について検討したものである。

なお、検討にあたっては、昭和60年度の「要素技術設計研究(Ⅱ)」⁽²⁾において得られた成果を踏まえて実施した。

2. 検 討 条 件

検討に際しては次の条件を設定した。

2.1 一般検討条件

一般条件として、プラントの基本条件を表 2.1 に示す。また、機器の条件として、原子炉構造 (R/V)、1 次主冷却系配管、中間熱交換器 (IHX) およびポンプの形状・寸法を図 2.1 ～ 図 2.5 に示す。ここで、図 2.2 および図 2.3 に示す 1 次主冷却系機器配管配置は、昭和 60 年度⁽¹⁾において機器間寸法及び配管形状に関する種々のパラメータサーベイを行い、熱膨張応力が許容応力を満足する基本形状を定め、これにシステム上の要求条件 (ナトリウム漏洩対策、系統内ナトリウム高さなど) を加味して求めたものである。本検討ではこれらの機器配管形状を基本的な条件とした。次に、表 2.2 に配管仕様および解析条件を、表 2.3 に機器のノズル剛性をそれぞれ示す。ノズル剛性は図 2.2 および図 2.3 に示す配管形状を考慮し今回の検討において改めて設定したものである。すなわち、3 次元シェル要素を用いて各ノズルの詳細静的弾性解析を行い、梁モデルにおける等価なばね定数を定めている (図 2.6)⁽²⁾。

2.2 荷重条件

荷重条件として、ホットレグ (H/L) 配管、クロスオーバーレグ (X/L) 配管およびコールドレグ (C/L) 配管の運転温度を表 2.2 に、R/V、IHX およびポンプの温度条件を図 2.7 にそれぞれ示す。このように、H/L 配管温度は 500℃、X/L 及び C/L 配管温度は 360℃であり、また低温停止温度は 200℃とした。なお、各配管の口径はそれぞれ 40B、38B、32B である。

機器の重量は、原子炉構造 1,290 ton、IHX 270 ton、ポンプ 250 ton である。地震については図 2.8 に示す床応答加速度 ($V_s = 1,500 \text{ m/s}$ と $V_s = 700 \text{ m/s}$ の包絡スペクトル：作成方法は 4 章に記述する) を入力として、 S_2 地震は S_1 地震加速度の 1.5 倍、鉛直方向は静的加速度 0.288 G とする。

2.3 熱過渡条件

応力評価用荷重ヒストグラムを表 2.4 に示す。状態分類は起動 70 回、通常停止 26 回、状態 II の熱過渡 40 回、状態 III の熱過渡 4 回とした。各グループとも寿命中に 1 回だけドレンすることとした。 S_1 地震及び S_1 地震 + 熱過渡は状態 III、 S_2 地震を状態 IV に分類し、地震の等価回数を 120 回とした。

熱過渡条件は「もんじゅ」の経験から図 2.9 に示す熱過渡曲線を用いた。

2.4 評価条件

配管およびノズルの健全性評価は「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針(BDS)」に準拠して行う。

2.5 その他の条件

その他、次の条件を考慮した。

- ① IHXの浮動方向はH/L配管軸長方向のみに限定する。
- ② ポンプは固定支持する。
- ③ R/V, IHX, ポンプおよび配管からのナトリウム漏洩に対しては容積制限を行い、この空間を窒素雰囲気とする。容積制限はガードベッセルを兼ねたセルライナーによって行う。
- ④ 窒素雰囲気環境中には保守の必要なサポート類は設置しない。また窒素雰囲気中のサポートはナトリウム漏洩時に浸せきしないようにE s L以上に設ける。

図2.10および図2.11に以上を収納する建屋内配置図を示す。

表 2.1 一般検討条件

① 原子炉形式	プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料，ナトリウム冷却高速中性子炉
② プラント形式	ループ型
③ プラント出力	1,000MWe
④ 原子炉出入口温度	500℃/360℃
⑤ 格納施設形式	建屋一体形矩形コンクリート格納施設
⑥ プラント運転 スケジュール	365日運転，～60日定検
⑦ プラント寿命	30年
⑧ 稼働率	85%

表 2.2 配管仕様および解析条件

項 目		単 位	H/L配管	X/L配管	X/L配管	C/L配管
			252~259	112~122	122~123	152~160, 162~172
呼 径			40	38	38	32
材 質			SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
最高使用圧力	kg/cm ² g		2.0	2.0	2.0	8.0
最高使用温度	℃		520	380	380	380
運 転 圧 力	kg/cm ² g		0.8	1.1	1.1	6.9
運 転 温 度	℃		500	360	360	360
縦弾性係数	kg/mm ²		1.62×10^4	1.752×10^4	1.752×10^4	1.752×10^4
平均線膨張率	1/℃		18.12×10^{-6}	17.514×10^{-6}	17.514×10^{-6}	17.514×10^{-6}
管	外 径	mm	1016.0	965.2	965.2	812.8
	肉 厚	mm	20.6	20.6	35.0	12.7
	配管重量	kg/m	510	485	820	255
	流体重量	kg/m	650	585	550	425
	保温材重量	kg/m	なし	なし	なし	なし
	合 計	kg/m	1160	1070	1370	680
その他	エルボ曲率	mm	1524.0	1447.8	—	812.8
	ポアソン比		0.302	0.3	0.3	0.3

表 2.3 ノズル剛性⁽¹⁾

ノズル		軸方向バネ定数 (kg/mm)			胴まわり回転バネ定数 (kg・mm/rad)			最適バネ位置 (mm)	
No.	NAME	K _x	K _y	K _z	R _x	R _y	R _z	A ₁	A ₂
1	R/V OUTLET	7 8 7 6.7	6 4 8 5 3.	0.13036E+06	0.11360E+12	0.11674E+11	0.33575E+10	3 9 6 6.0	4 1 4 9.5
2	IHX INLET	2 7 9 6 8.	9 0 5 0 2.	0.14092E+06	0.98857E+12	0.25010E+11	0.76133E+10	1 7 2 4.6	1 9 3 5.7
3	IHX OUTLET	0.11470E+06	0.48990E+06	0.48990E+06	0.34974E+12	0.24781E+11	0.24781E+11	8 8 5.0 3	
5	PUMP OUTLET	6 7 9 7 2.	0.32565E+06	0.50042E+06	0.12485E+12	0.20082E+11	0.79894E+10	1 4 3 9.4	1 5 8 4.8
6	R/V INLET	2 3 2 2 0.	0.35340E+06	0.52423E+06	0.17345E+12	0.11361E+11	0.55128E+10	3 9 6 2.4	4 0 5 5.8

表 2.4 1次系配管の応力評価用荷重ヒストグラム

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	備 考
事 象	メンテナンス Ⅲの熱過渡 S ₁ 地 震	メンテナンス Ⅲの熱過渡	低温待機 Ⅲの熱過渡	低温待機 Ⅱの熱過度	低温待機 通常運転 通常停止	S ₁ 地震	S ₂ 地震	
温 度								← 500℃ ← 360℃ ← 200℃ ← 20℃
状態分類	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅳ	
回 数	1	1	2	40	26	120*	120*	* 等価回数

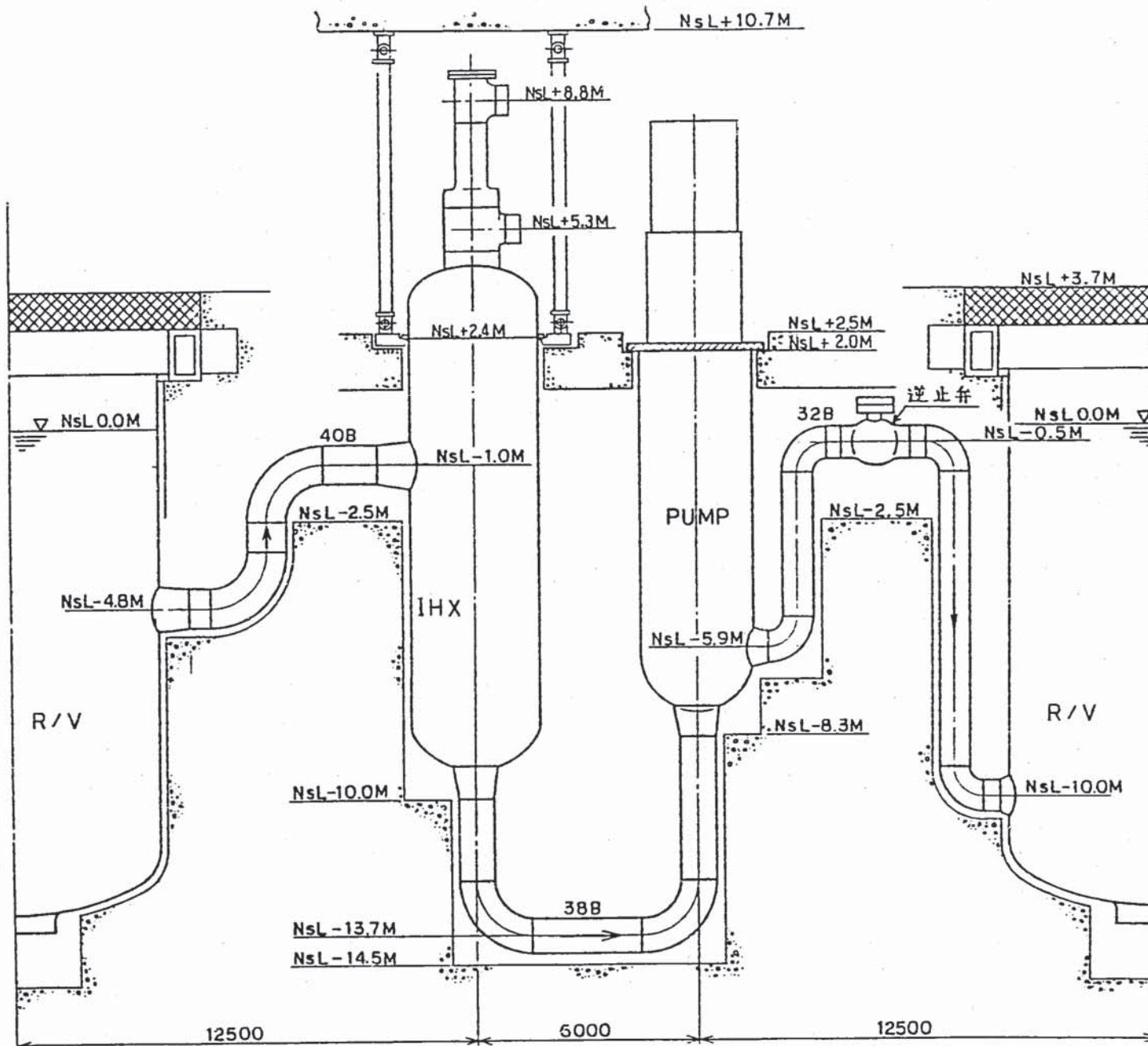


図 2.2 一次系機器配管配置図 (高低関係図)

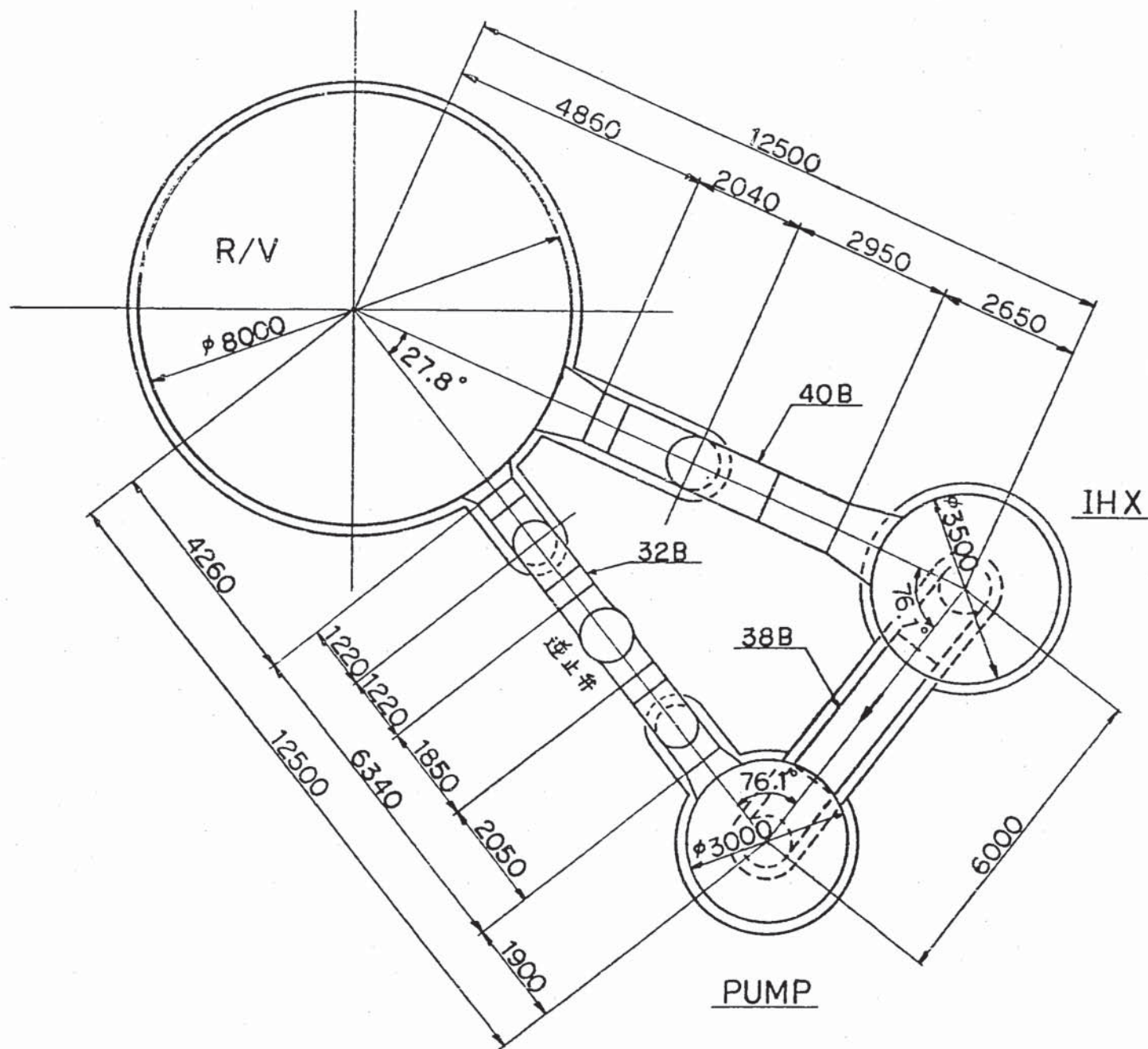
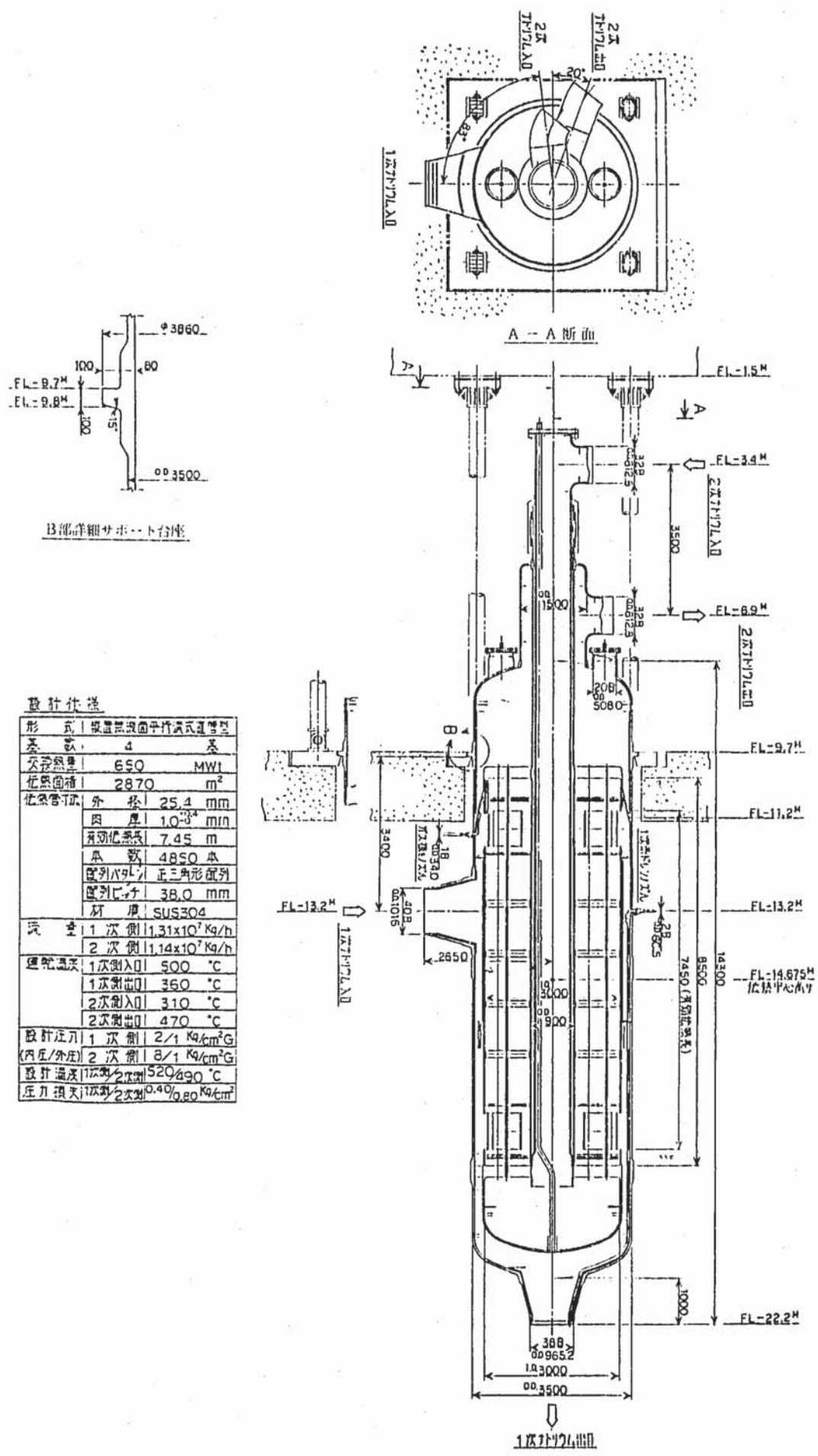
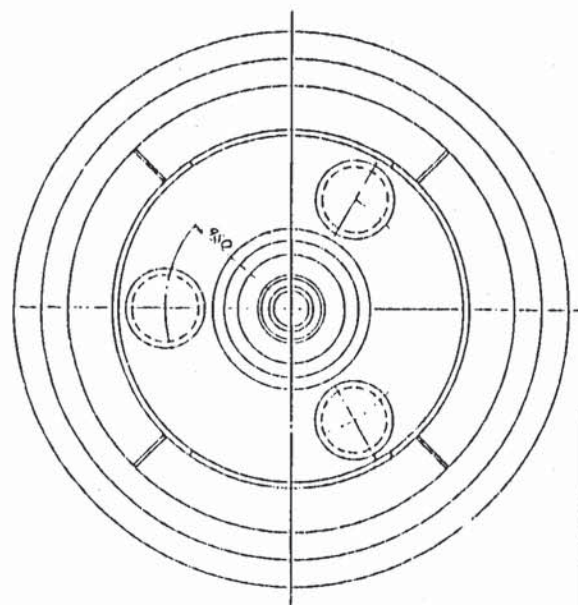
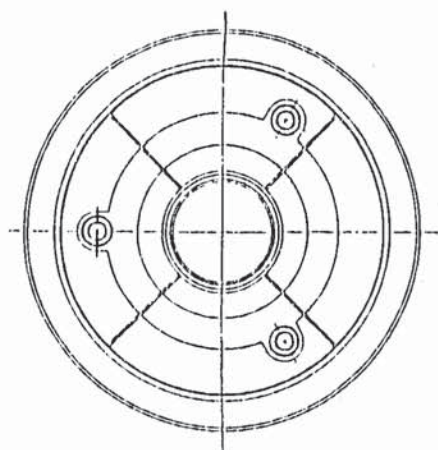


图 2.3 一次系機器配管配置図（平面図）





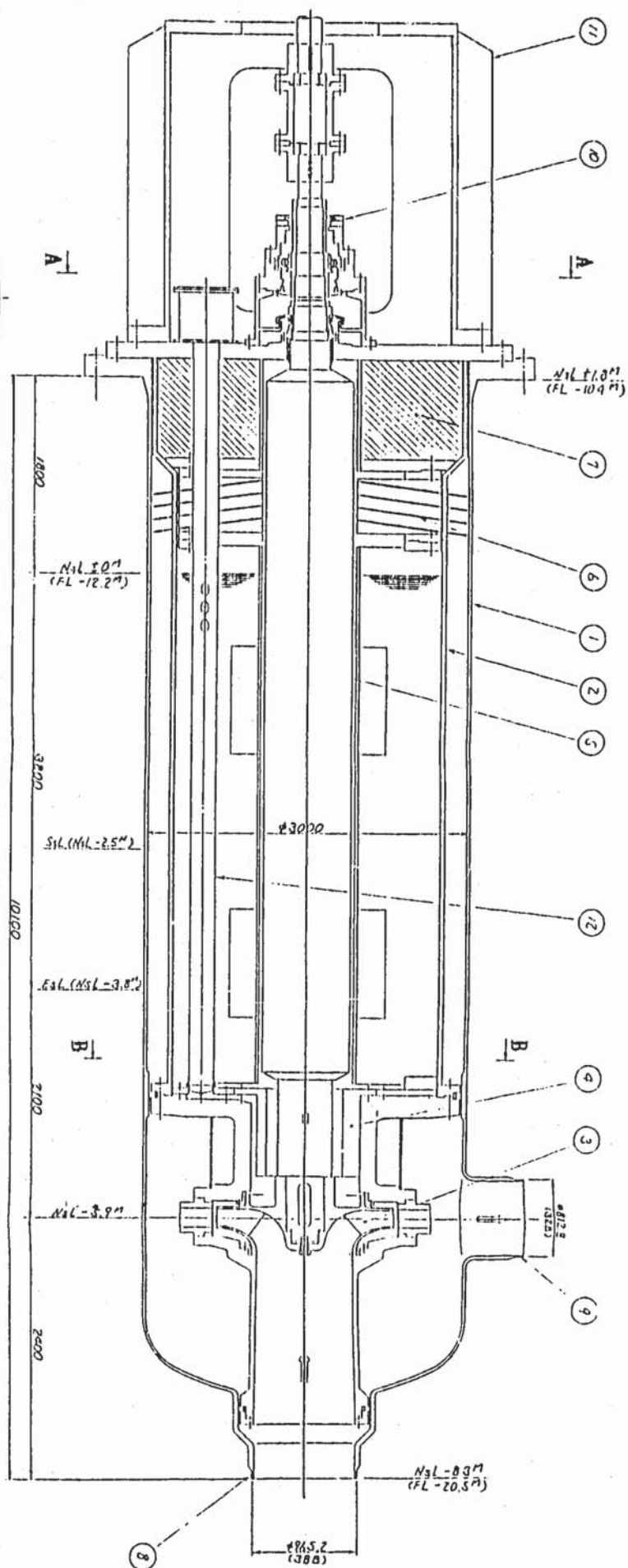
断面 A A



断面 B B

部品名称一覧表

12	リークフロー案内管
11	モータ支え台
10	軸受部
9	吐出ノズル
8	吸込ノズル
7	上部しゃへい体
6	熱しゃへい板
5	上軸
4	静圧軸受
3	羽根車
2	内部胴
1	外部胴
番号	名称



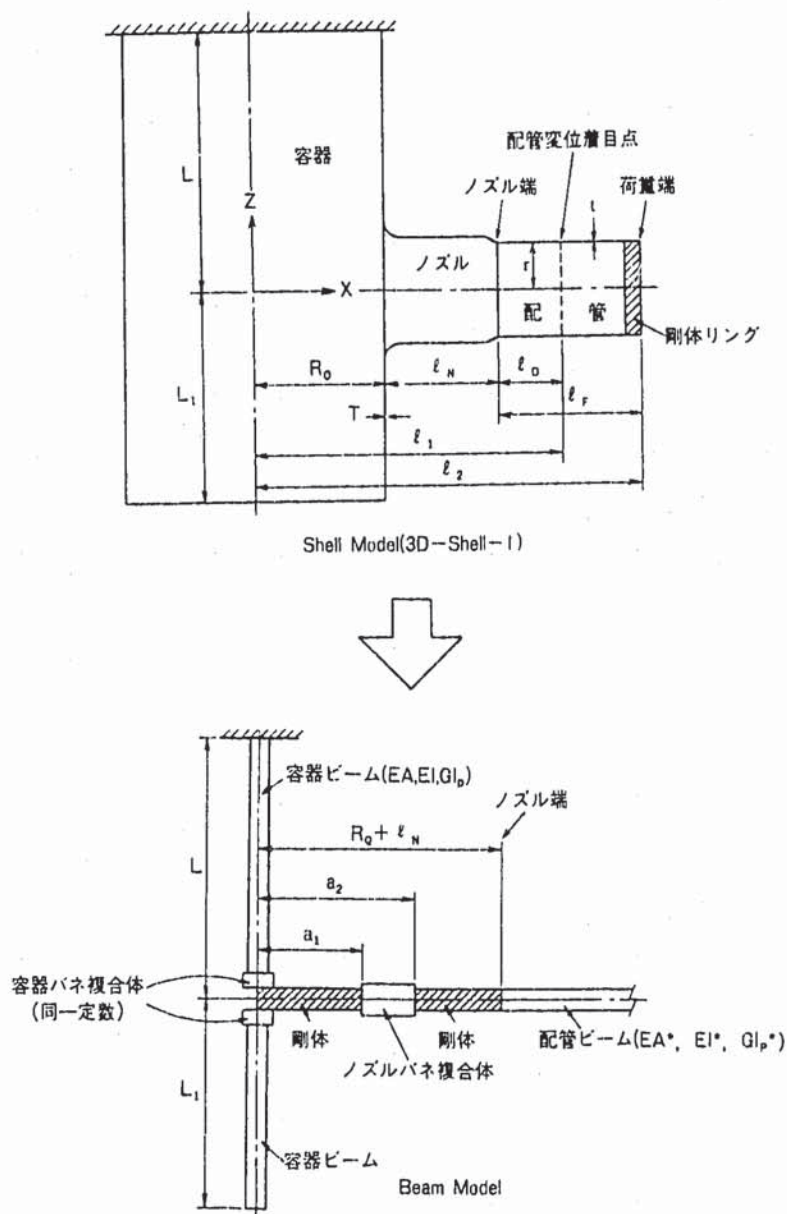


図 2.6 シェル解析によるノズルの剛性評価⁽²⁾

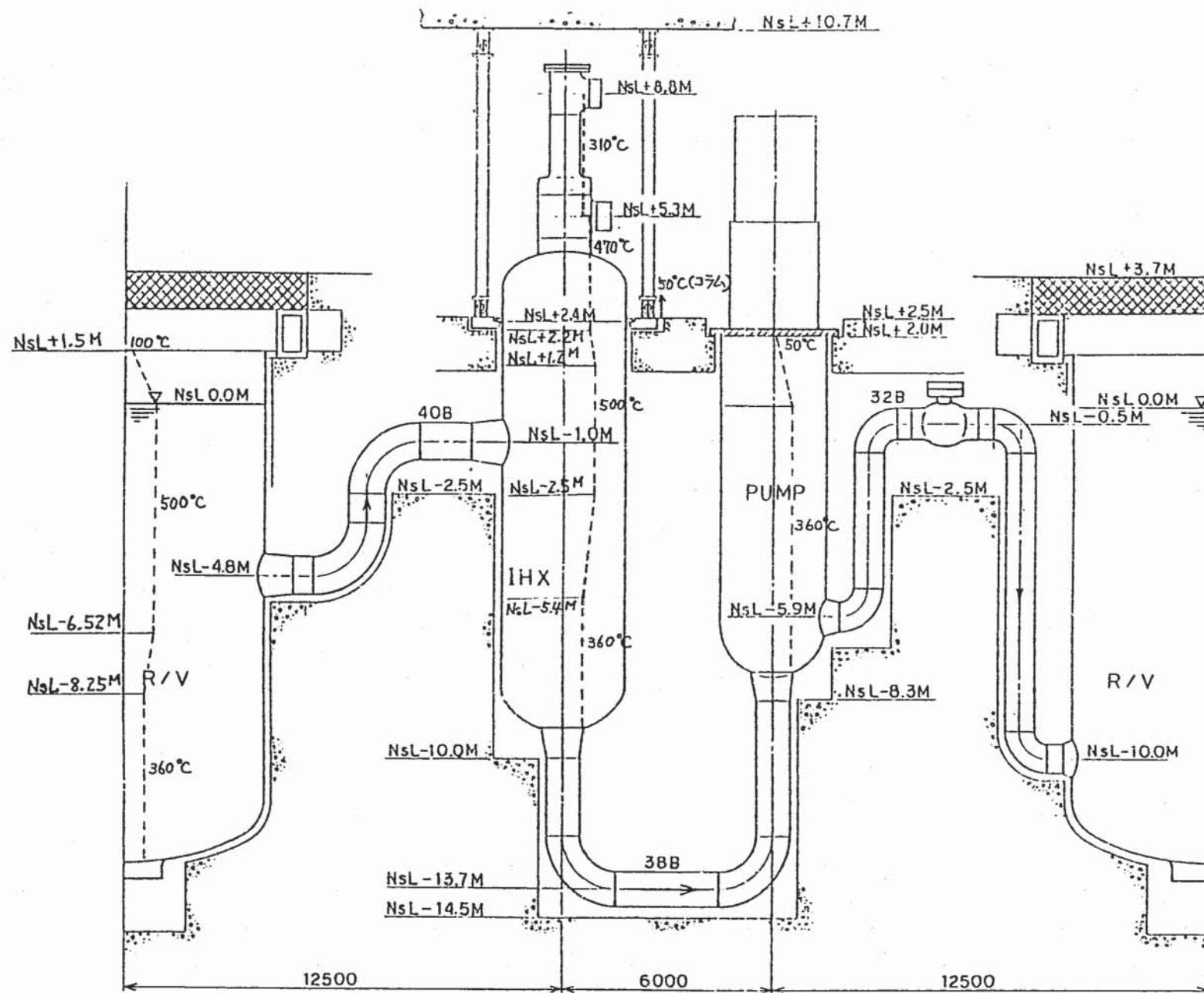


図2.7 R/V, IHx, ポンプの温度条件

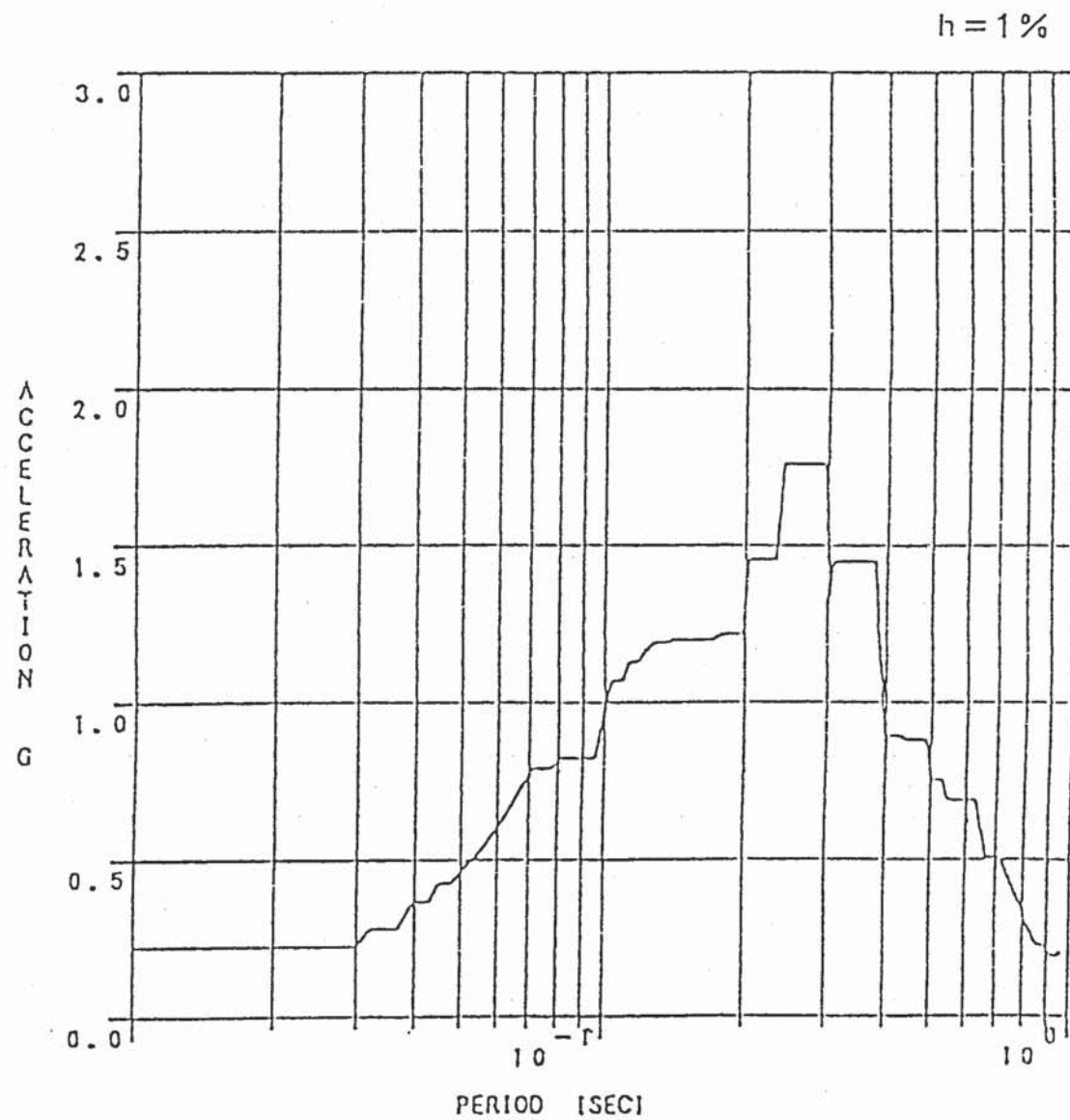
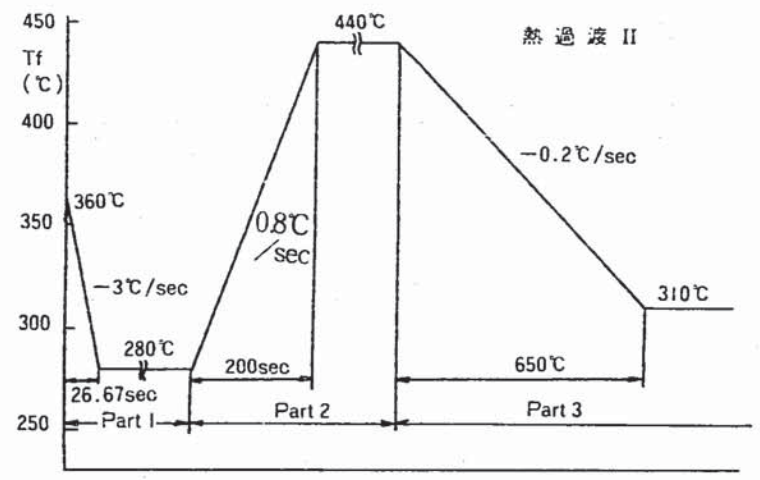
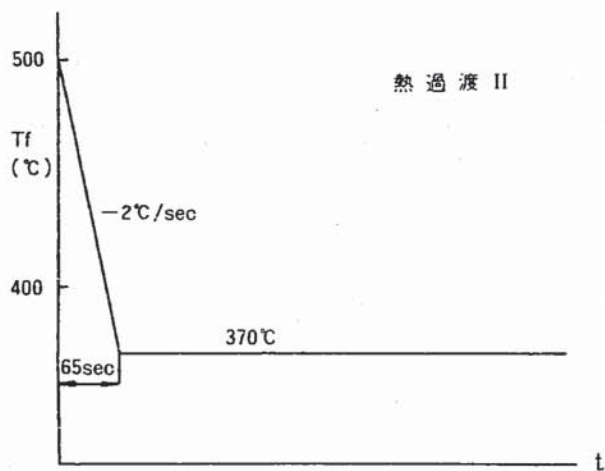
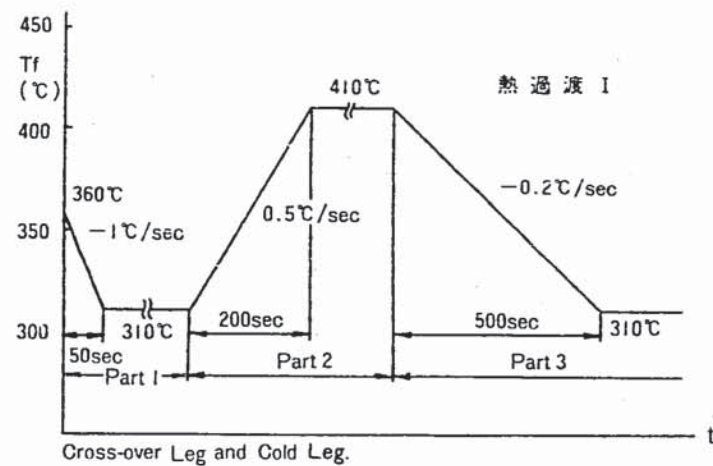
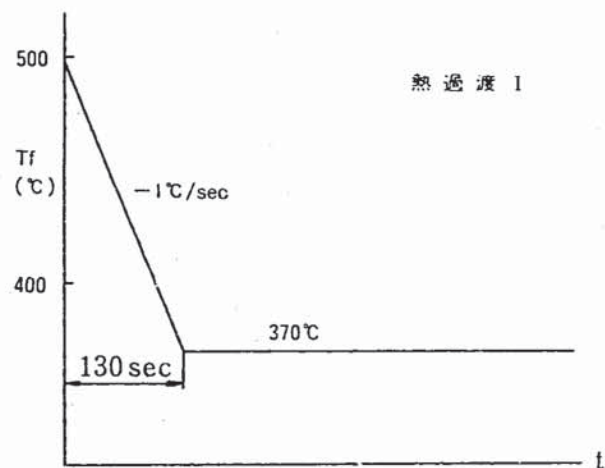


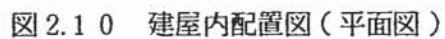
図 2.8 検討用床応答曲線 (S_1 地震 R/V 据付レベル)

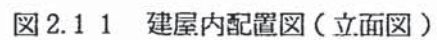


H/Lの熱過渡曲線

X/L, C/Lの熱過渡曲線

図 2.9 熱過渡条件





3. 解析モデルの検討

昭和60年度に検討した1次冷却系ループの解析モデルについて、各配管のモーメント分布などを再度分析、評価し、新たな解析モデルとなる基本形状を設定した。

3.1 耐震支持方法の検討

図3.1に60年度設計解析モデル⁽¹⁾を示す。ここでIHXの支持台を支持する(ノード103)スナツバ以外は全て1次系の高温雰囲気セル内に設置されることになる(本参照設計プラントでは1次系配管には保温材を設置せず成行としているため、雰囲気はナトリウム温度にはほぼ等しい高温となる)。メカニカルスナツバとは言え、400℃近い高温雰囲気中での長時間の使用は不可能であり、また保守性にも難点がある。このため、前述のようにこれらのスナツバを廃止し、保守上の制約条件を緩和することを前提とした配管系の基本形状を検討した。

検討対象とした配管系解析モデルを表3.1に示す。各配管に生じる熱膨張、地震及び自重による応力の最大値をモデル毎を表3.2に示す。表3.2において、熱膨張応力(S_e)に対しては $3\bar{S}_m$ または $3S_m$ 以下とすることが必要であるが、モデルBのC/Lはこれを超えている。これはポンプ出口エルボのフレキシビリティが不明なことから安全側に剛(直管相当)として解析したためと考えられ、実際には更に小さな値になるものと予測される。

次に地震による応力は S_1 地震の $B_2 \frac{M}{Z}$ を示している。これに対し、BDSの S^* 制限は $2C_2 \frac{M}{Z}$ に対し $3S_{mH}$ 以下とすることを求めており、この制限値を $B_2 \frac{M}{Z}$ と比較するためには $3S_{mH} \times 0.5 \times \frac{3}{4} = 0.375(3S_{mH})$ 、 S_2 地震に対しては更にその $1/1.5$ の $0.25(3S_{mH})$ とする必要がある。これらの値を表3.2の欄外に示した。ただし、 $S_n^* \leq 3S_{mH}$ を満足できない場合には、別途救済規定があるため、これを満足しない場合でも直ちに不成立となるものではない。しかしながら、モデルCのC/Lの 23.8 kg/mm^2 は過大である。

以上から応力評価上は、Cを除いたモデルについては一応成立する可能性はあるものと考えられる。残るモデルA、B、Dのうち、Aの場合はC/Lにメカニカルスナツバが設置されることから、またDにおいてはC/LのレストレイントがNsL-5.6~5.7Mの位置にあって入口配管廻りのセルライナとの狭い空間に設置せざるを得ないため施工及び検査が事実上不可能なことから、いずれの場合も検討条件に合致しない結果となった。

従って、モデルBを暫定的な詳細解析のため基本形状とした。

3.2 応力低減方策の検討

表3.2に示すようにモデルBの応力を更に低減する必要がある、このための方策を検討した。

(1) 地震応力の低減方策

地震応力は許容値を満足する見通しであるが、図3.2に示すように1次固有振動数が床応答

曲線のピーク領域と合致しているため、これを回避して更に応答を低減する検討を行った。各配管系から代表的な点を選び、各モード毎に生じる応力を表 3.3 に示す。これから次の対策を講じるものとした。

(1) 1 次モードによる応力の低減

I H X のフローティング方向面内でのロッキングによって、H/L には面内曲げモーメントが、X/L には振りと面外曲げモーメントが発生している。ロッキングの原因はコラムのスイングよりもコラムの上下方向伸縮による成分が大きい。このためコラムの軸剛性を増す（支持コラムの断面積を 2 倍にする）ことによってロッキングを低減するものとした。

(2) 2 次，3 次モードによる応力の低減

X/L だけの面内及び振りモードに起因しており、このため X/L の I H X 出口ノズル付近の肉厚を 20.2 mm とし剛性を高めた。

(3) 5，7，8 次モードによる応力の低減

逆止弁の重量が影響して C/L の面内振動を誘起しており、このため逆止弁入口側配管の肉厚を増して補強した。

これらの対策の結果、図 3.3 に示すように固有振動数は 1 次で 5 Hz 以上となり、床応答曲線のピークを回避することができた。これに伴い、地震応力も低減した。

(2) 熱膨張応力の低減方策

表 3.2 に示すように C/L の熱膨張応力を更に低減する必要がある。この対策として耐震サポートを基本的にレストレイントのみとし、かつその最適な設置位置をサーベイするとともに、エルボ部のフレキシビリティ・ファクタ及び応力指数を現実的なものとなるよう解析によって見直した。

この結果、C/L の面内方向レストレイントをポンプ出口上方に設置するものがもっとも適していることがわかった。また、I H X 出口部エルボ及びポンプ出口部エルボのフレキシビリティ・ファクタ及び応力指数をそれぞれ 17.0，9.3 および 23.6，12.1 とし、更に I H X 出口部エルボについては肉厚を 20.6 から 22.2 mm とした。なお、熱膨張応力は次のように収束した。

熱膨張応力	$3 \overline{S}_m$ または $3 S_m$
・ H/L	$20.9 \text{ kg/mm}^2 < 27.4 \text{ kg/mm}^2$
・ X/L	$30.4 \text{ kg/mm}^2 < 33.6 \text{ kg/mm}^2$
・ C/L	$27.6 \text{ kg/mm}^2 < 33.6 \text{ kg/mm}^2$

求められた解析モデルを図 3.4 に示す。また、図 2.2～図 2.3 及び図 2.10～図 2.11 に示すように、本解析モデルが示す基本形状の主要な寸法と特長は次のようにまとめることができる。

① R/V と I H X，R/V とポンプの水平中心間距離は同一で 12.5 m，I H X とポンプ間は

6 mとなっている。

- ② I H Xは上部天井から支持コラム、ピン及び支持台を介して支持する。耐震サポートは I H X支持台にメカニカルスナバを水平に取り付ける。これらの支持部及びメカニカルスナバは保守できるように常温空気雰囲気中に設置している。
- ③ I H XはH/L配管軸長方向伸びのみを許容し、それと直角方向変位は支持コラムにクロス状に配置したすじかいでおさえている。
- ④ 逆止弁は上部より保守可能なようにC/Lの高所水平配管部に設置している。
- ⑤ 各機器間の配管引廻しは垂直な同一平面内のみで行っているため、構成が単純で、現象が把握しやすい。
- ⑥ ホットレグは2つのエルボを用いたS字配管で極めて単純な構成となっている。
- ⑦ クロスオーバーレグは2つのエルボを用いたU字配管で単純である。
- ⑧ 1次系を収納する格納施設の大きさは約2.8M x 3.15Mとなり、コンパクト化がはかられている。

表 3.1 耐震支持方法検討のためのモデルの説明

部位 モデル	H/L	X/L	C/L	IHX	ポ ン プ
A	◇耐震支持なし	◇耐震支持なし	◇(156)(NSL-2.0M)に面外 レストレイント。 ◇(166)(NSL-2.0M)に面外 レストレインと面内方向スナツバ	◇(103)(NSL+2.4M)にフロ ート方向スナツバ。 ◇(107)(NSL-2.0M)にフロ ート方向スナツバと直行方向レス トレイント	◇上端固定, (130) ◇(127)(NSL-1.9M)に2方 向レストレイント。
B	同 上	同 上	◇(166)の面内方向スナツバをレ ストレイントに変更。 ◇その他は同上。	◇(107)のフロート方向スナツバ を廃止。 ◇その他は同上。	同 上
C	同 上	同 上	◇(166)の面内方向レストレイン トを廃止。 ◇その他は同上。	同 上	同 上
D	同 上	同 上	◇Bのモデルから(166)の2方向 レストレイントを(180)(181) (NSL-5.6M)にレベル変更。 ◇その他はBと同じ。	同 上	同 上

表 3.2 応力のまとめ

(単位: kg/mm²)

モデル	配管	熱膨張応力	耐震応力 (S ₁ +鉛直)	自重応力
		$C_2 \frac{M}{Z} \cdot \frac{E_C}{E_H}$	$B_2 \frac{M}{Z}$	$B_2 \frac{M}{Z}$
A	H L	2 0.7	4.4	1.1
	X L	3 2.7	9.4	0.8
	C L	2 5.9	8.2	6.0
B	H L	2 0.7	1 0.9	1.1
	X L	3 2.7	1 3.0	0.8
	C L	5 1.9	7.5	6.0
C	H L	2 0.7	1 0.9	1.1
	X L	3 2.7	1 3.0	0.8
	C L	2 5.9	2 3.8	6.0
D	H L	2 0.7	1 1.0	1.1
	X L	3 2.7	1 3.1	0.8
	C L	2 5.6	8.7	6.0

・熱膨張応力 $S_0 \leq 3 \bar{S}_m = 27.4$ for H/L

$3 S_m = 33.6$ for X/L and C/L

・S₁ 地震応力 $S_n^* \leq 3 S_{mH} = 30.0$ (H/L) $\Rightarrow 11.3$ (7.5)

33.6 (X/L & C/L) $\Rightarrow 12.7$ (8.5)

(S₁) (S₂)

表 3.3 モード毎の地震応力とその主な成分

	応 力 (kg/mm ²)						振動数 (Hz)	応 力 の 主 な 成 分
節 点	2 5 3		1 1 4		1 5 7			
方向 Mode	X	Z	X	Z	X	Z		
1	0.2	(0.96) 10.1	0.2	(0.93) 12.6	0.0	1.8	4.0	(253) 面内曲げ, (114) は振りと面外曲げ
2	(0.21) 1.6	0.1	(0.54) 8.7	0.6	1.4	0.1	5.9	(114) 面外≒面内曲げ
3	0.7	0.0	(0.43) 7.7	0.1	0.8	0.0	6.3	(114) 面外曲げ
4	(0.29) 1.9	0.2	0.2	0.0	(0.27) 3.4	0.3	7.4	
5	0.1	1.5	0.0	0.5	0.3	(0.16) 4.4	7.4	(157) 面内曲げ
6	0.2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.0	8.2	
7	0.0	0.0	0.1	0.5	1.0	(0.19) 4.9	8.7	(157) 面内
8	0.0	0.1	0.8	2.8	(0.13) 2.3	(0.60) 8.6	8.9	(157) 面内
9	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	1.4	9.5	
10	0.8	0.2	1.3	0.3	(0.50) 4.6	1.1	9.6	
11	0.3	1.0	0.5	1.9	0.0	0.0	12.7	
12	(0.43) 2.3	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	12.9	
Total	3.5	<u>10.3</u>	<u>11.8</u>	<u>13.1</u>	6.5	<u>11.1</u>		

()はTOTALに対する割合。

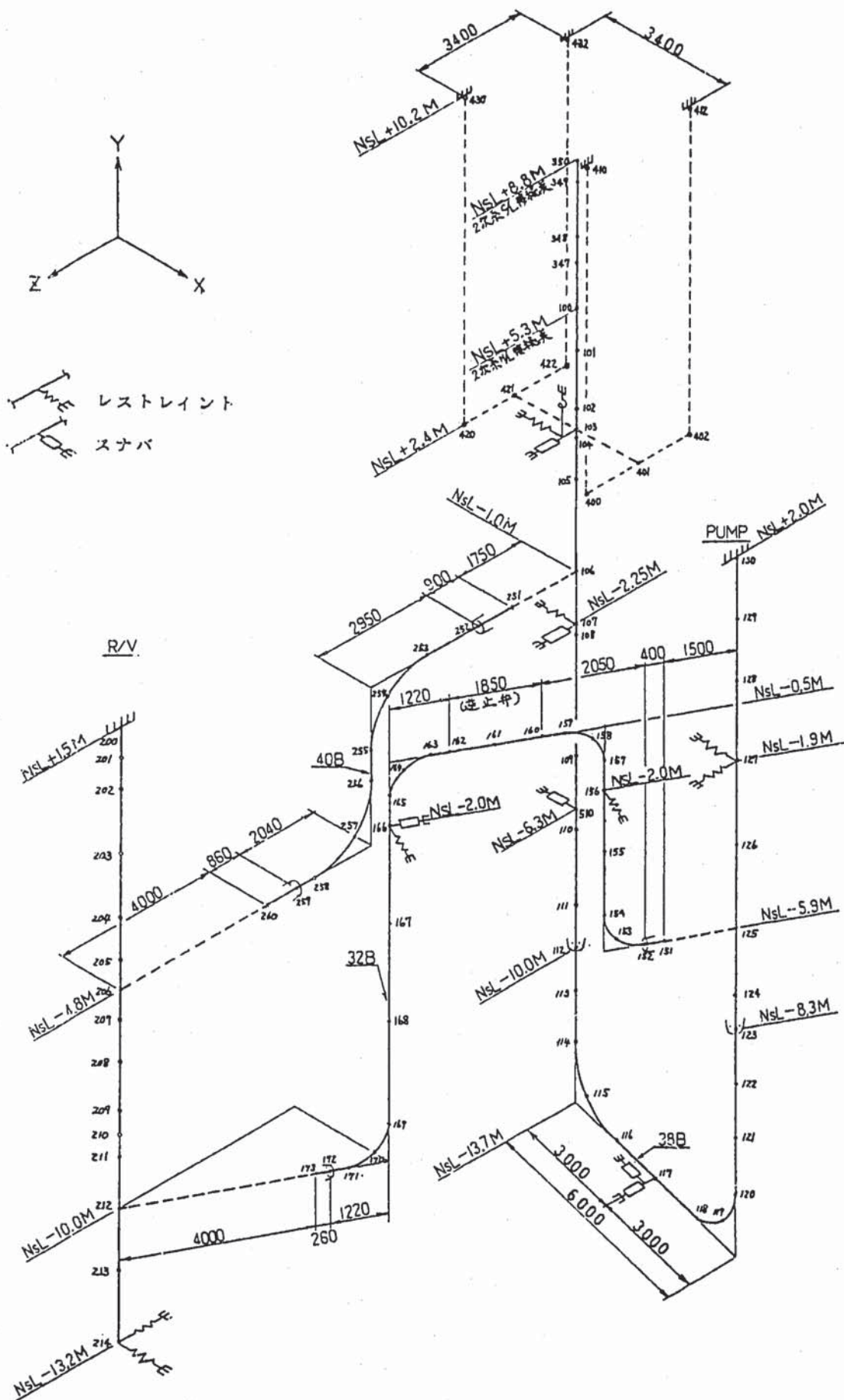


図 3.1 1次系配管解析モデル(2)

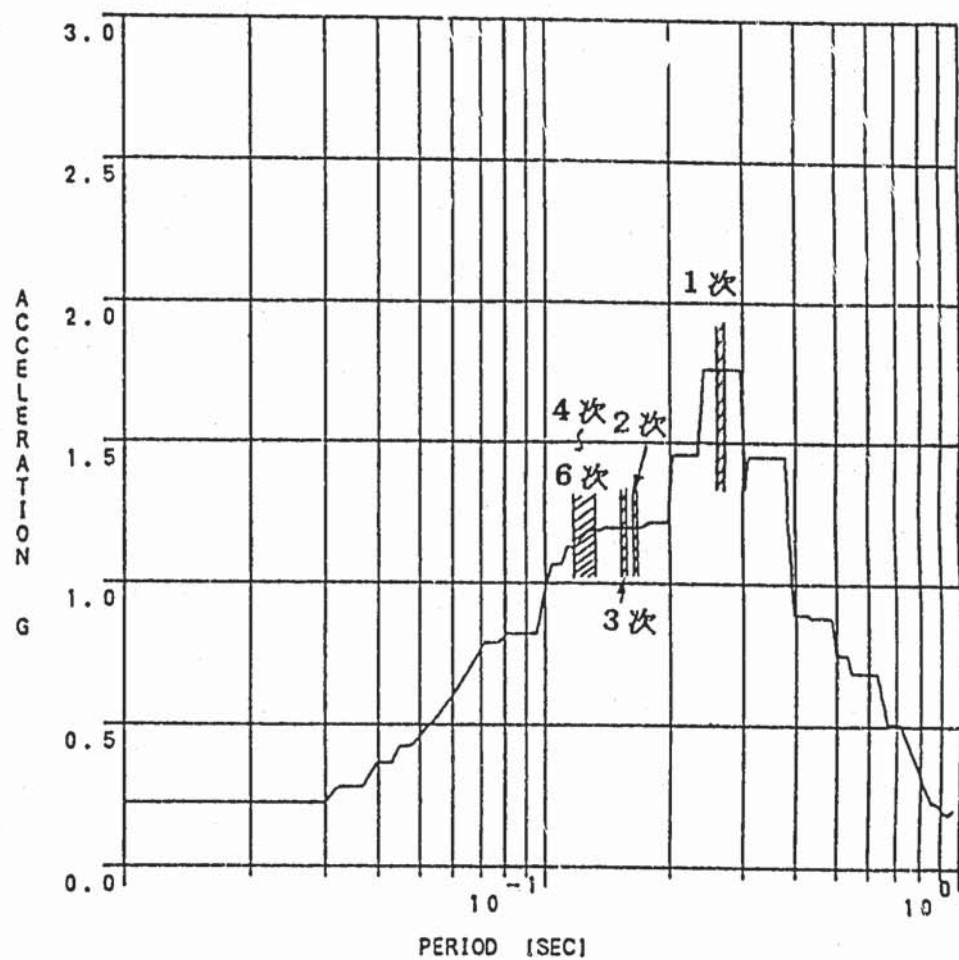


図 3.2 床応答曲線 (S₁地震) と固有振動数との関係

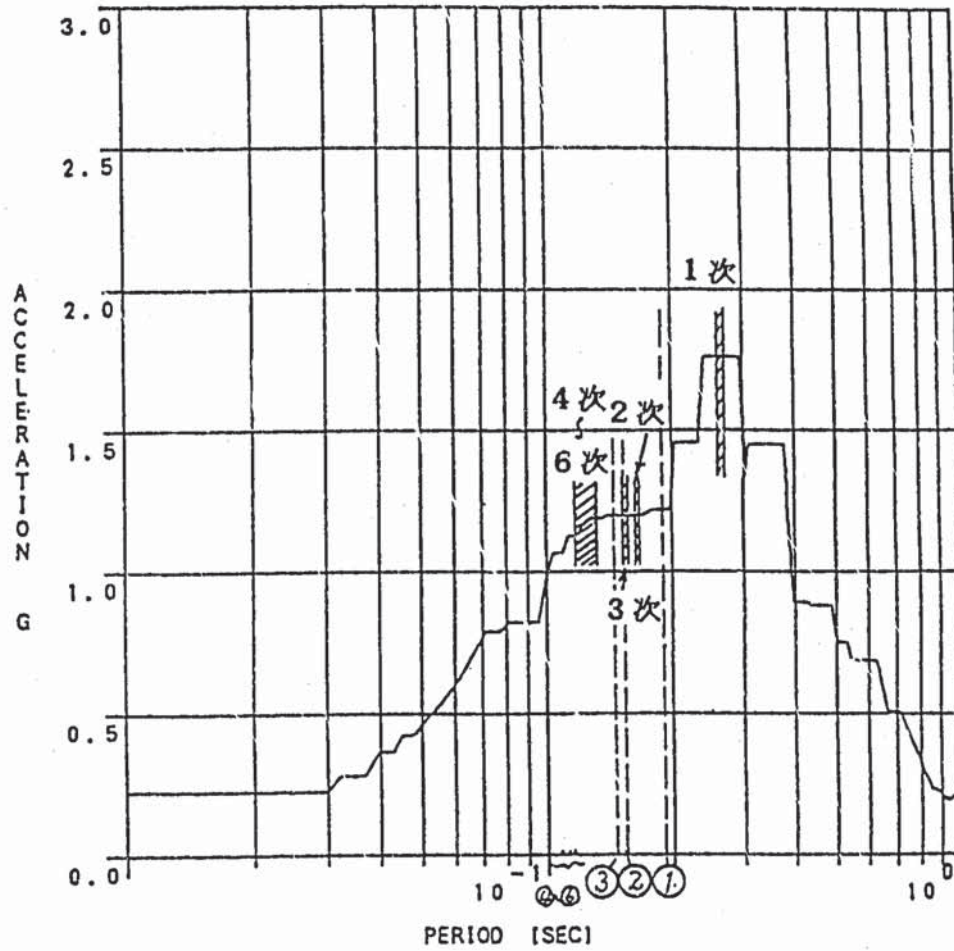


図3.3 床応答曲線（S₁地震）と固有振動数との関係
（応力低減対策後）

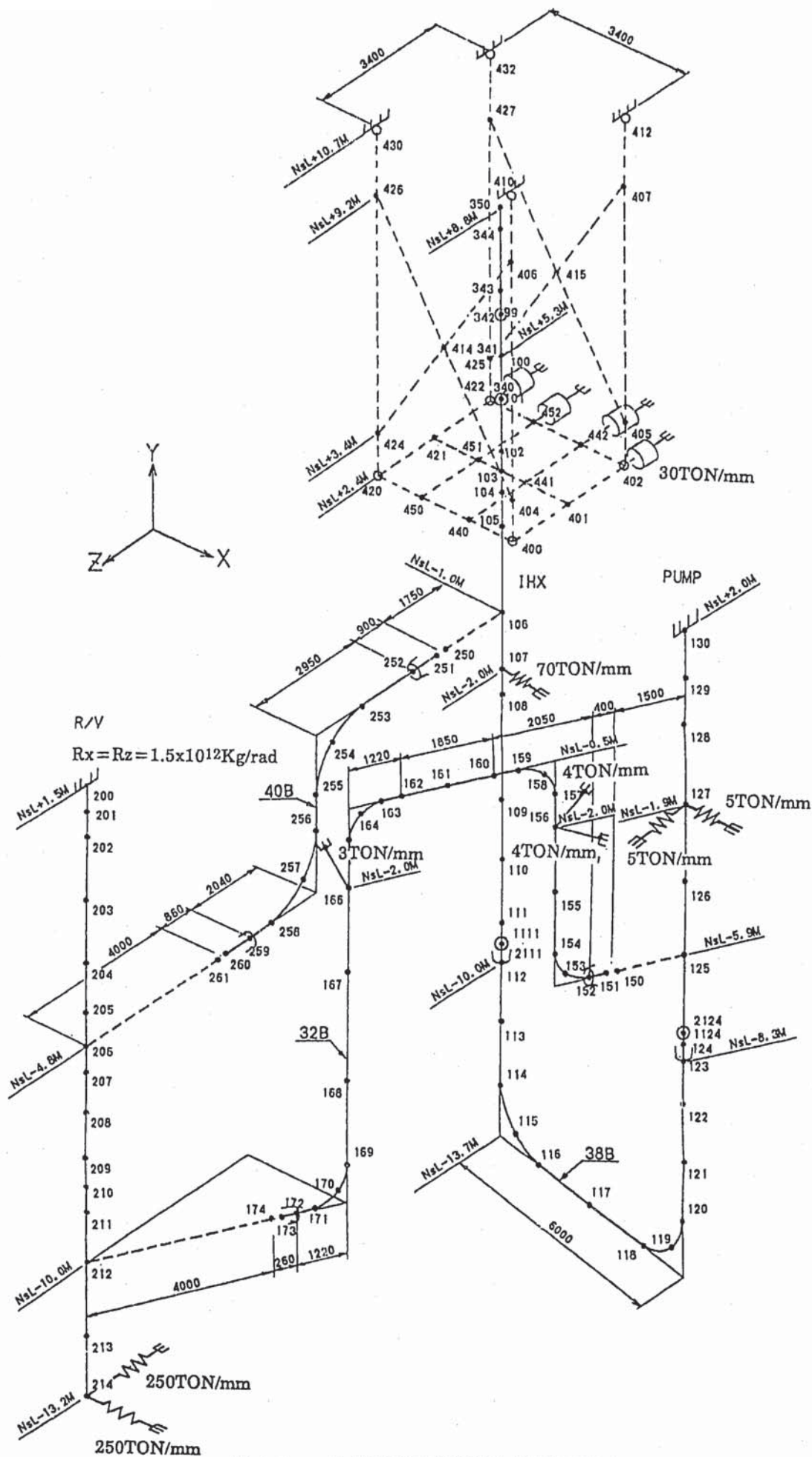


図 3.4 一次熱輸送系配管応力解析モデル

4. I H X 浮動支持方式の成立性の検討

I H X 浮動支持方式の成立性を主として構造健全性の観点から検討した。検討内容は以下の通りである。

- (1) 配管の弾性追従評価
- (2) 配管の健全性評価
 - ① 自 重
 - ② 熱膨張（定格時，熱過渡(I)，熱過渡(II)）
 - ③ 地 震
 - ④ 総合評価
- (3) ノズルの健全性評価
 - ① 自 重
 - ② 熱 膨 張
 - ③ 地 震
 - ④ 熱過渡応力
 - ⑤ 総合評価
- (4) 耐震支持構造物の検討（5章にて述べる）

検討のフローを図4.1に示す。

4.1 弾性追従評価

高温のH/L配管のエルボについて弾性追従解析を実施し，熱膨張応力の応力分類を行う。弾性追従ひずみを非弾性解析により求めた。

4.1.1 解析方法

(1) モデルの簡略化の検討

解析に当っては配管の応力及び変位に影響を及ぼさない範囲でモデルの簡略化を行った。まず，2次系ホットレグ，コールドレグ及びI H Xコラム部を剛性模擬して熱弾性解析を実施した。2次系配管の剛性は汎用構造解析コードMSAPによって1次系及び2次系連成モデルの熱弾性解析を行い，節点100（ホットレグ），節点350（コールドレグ）を含む要素の部材力と節点変位より求めた。その結果を表4.1.1に示す。I H Xコラム部の剛性はI H Xコラムを梁でモデル化してMSAPにより求めた。表4.1.2に結果を示す。

モデルの簡略化をするため，まず2次系配管（ホットレグ，コールドレグ）を削除した場合の熱膨張応力解析を行った。その結果を表4.1.3に示す。削除しない場合と比較して3%以内の差違であり，2次系は剛性模擬とすることが可能である。次に，2次系に加えてI H Xコラムを削除した場合及び2次系，I H Xコラム及び1次系コールドレグ配管を削除した場

合の熱膨張応力解析を行い、その結果を比較してそれぞれ表 4.1.4 及び表 4.1.5 に示す。いずれの場合も、全く簡略化しない場合との差異は 3% 以内であり、解析上 2 次配管系、IHX コラム部及び 1 次系コールドレグ配管を削除したモデルとしても問題のないことがわかった。

(2) 非弾性解析

解析は H/L 配管のみを図 4.1.1 に示す ELBOW 6 R でモデル化し、R/V, IHX, ポンプ及びクロスオーバーレグについては弾性梁としてモデル化した。荷重は低温状態 20℃ から 500℃ までの熱弾塑性解析を実施し、その状態で 23 万時間のクリープ解析を実施した。

4.1.2 解析結果

図 4.1.2 に弾性域 (20℃→250℃) での応力コンタを示す。これより、応力集中はエルボの中央部近傍に発生しており、しかも IHX 側のエルボが若干高い傾向を示している。最大発生応力は 10 kg/mm² であり、また 500℃ では 20.9 kg/mm² となり、弾性応力として梁モデルの応力値とはほぼ一致する。図 4.1.3 に 500℃ での熱弾塑性解析結果として相当塑性ひずみコンタを示す。ひずみの集中は弾性解析の結果と同じ個所で発生しており、相当塑性ひずみは IHX 側のエルボで 0.124%, R/V 側のエルボで 0.07% であった。

図 4.1.4 に弾塑性クリープ挙動として周方向の応力-弾塑性クリープひずみを示す。23 万時間では弾塑性クリープひずみは 0.313% となり、BDS の判断基準 0.5% 以下であることから H/L 配管の熱膨張応力は 2 次応力として分類することが可能となる。また累積非弾性ひずみ 0.31% と弾性的に求めた弾性ひずみ 0.12% の比から弾性追従パラメータ q は 2.6 となった。

表 4.1.1 2次系配管の剛性

K, 軸剛性: kg/mm

r, 曲げ剛性: kg-mm/rad

	2次系H/L, IHX出口部 (100)	2次系C/L, IHX入口部 (350)
K_X	1.64×10^4	8.03×10^2
K_Y	19.63	1.97×10^2
K_Z	17.77	10.95
r_X	1.32×10^{10}	1.85×10^{10}
r_Y	1.38×10^{10}	7.07×10^8
r_Z	2.459×10^{10}	2.21×10^{10}

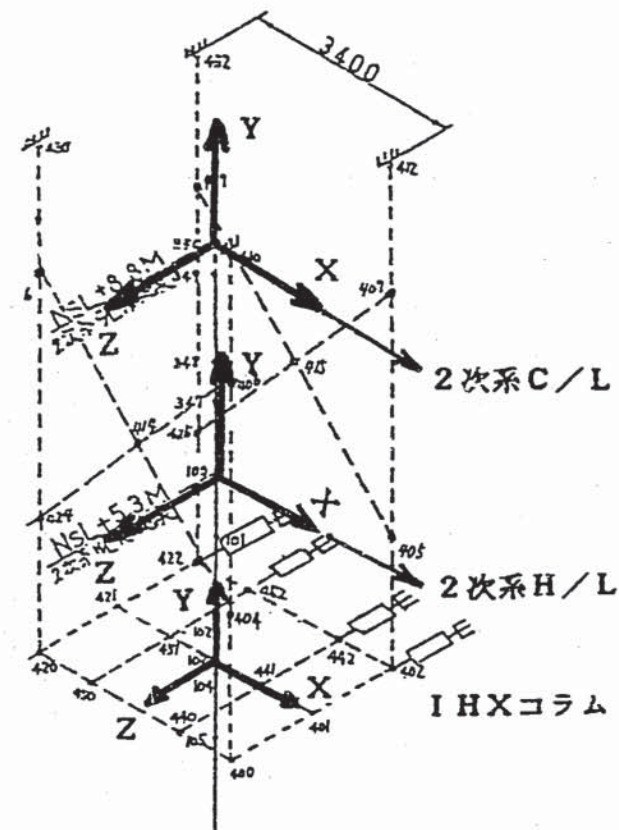


表 4.1.2 I H X コラムの剛性

K ; 軸 剛 性 kg/mm r ; 曲げ剛性 kg-mm/rad

	I H X と I H X コラムの接合部 (1 0 3)
K_X	3.36×10^4
K_Y	1.42×10^6
K_Z	0.0
r_X	4.56×10^{12}
r_Y	1.16×10^{11}
r_Z	4.51×10^{12}

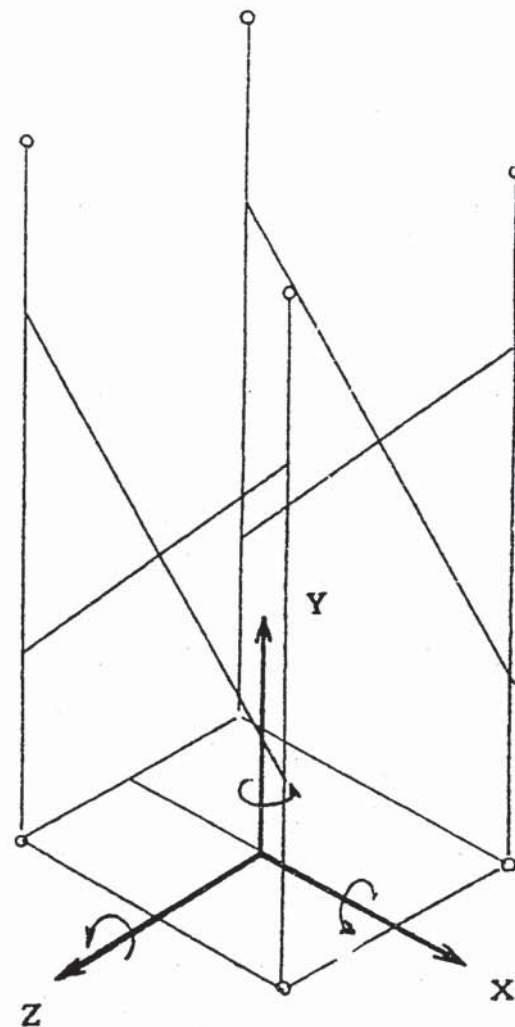
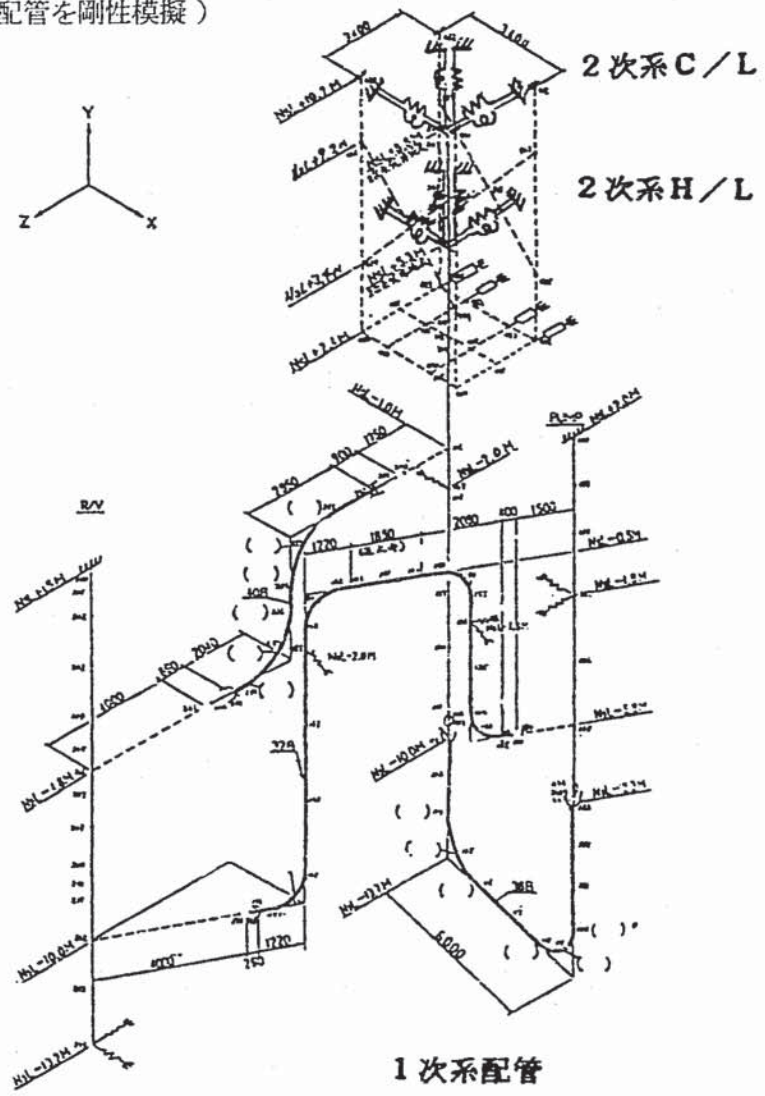
K ; 軸 性 kg/mm r ; 曲げ剛性 kg-mm/rad 

表 4.1.3 熱膨張応力の比較 (2 次系配管を剛性模擬)

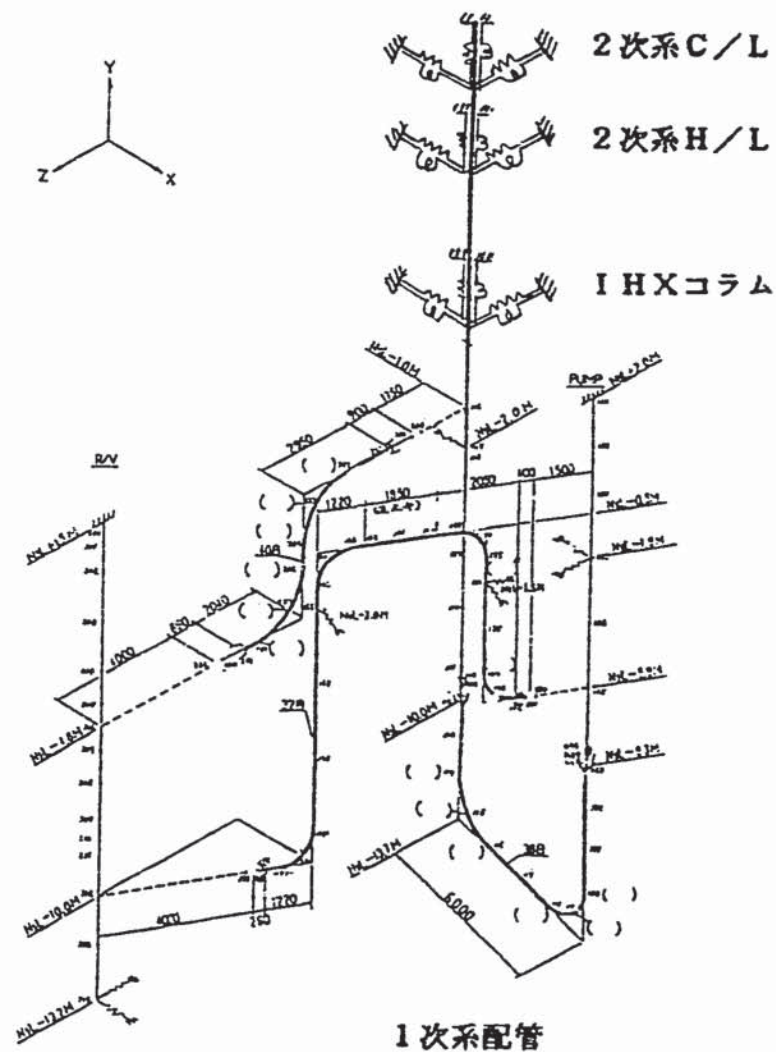
節 点		2 次 系 考 慮	2 次 系 は バ ネ
ホ ッ ト レ グ	2 5 3	7.0	6.9
	2 5 4	1 9.5	1 9.6
	2 5 5	7.6	7.6
	2 5 6	7.2	7.2
	2 5 7	1 9.1	1 9.2
	2 5 8	6.3	6.3
ク ロ ス オ ー バ レ グ	1 1 4	2 7.0	2 7.0
	1 1 5	1 6.1	1 6.2
	1 1 6	3 2.2	3 2.6
	1 1 8	2 7.6	2 7.4
	1 1 9	9.0	8.9
	1 2 0	2 6.4	2 6.4



エルボの曲げ応力指数は、両端、中央とも 1.0
単位 ; kg/mm^2 , 使用コード ; MSAP

表 4.1.4. 熱膨張応力の比較 (2次系配管, I H X コラムを剛性模擬)

節 点		2次系, I H X コラムを考慮	2次系, I H X コラムはバネ
ホ ッ ト レ ダ ー	2 5 3	7.0	6.9
	2 5 4	1 9.5	1 9.5
	2 5 5	7.6	7.6
	2 5 6	7.2	7.2
	2 5 7	1 9.1	1 9.1
	2 5 8	6.3	6.3
ク ロ ス オ ー バ レ ダ ー	1 1 4	2 7.0	2 7.0
	1 1 5	1 6.1	1 6.2
	1 1 6	3 2.2	3 2.6
	1 1 8	2 7.6	2 7.4
	1 1 9	9.0	9.0
	1 2 0	2 6.4	2 6.4

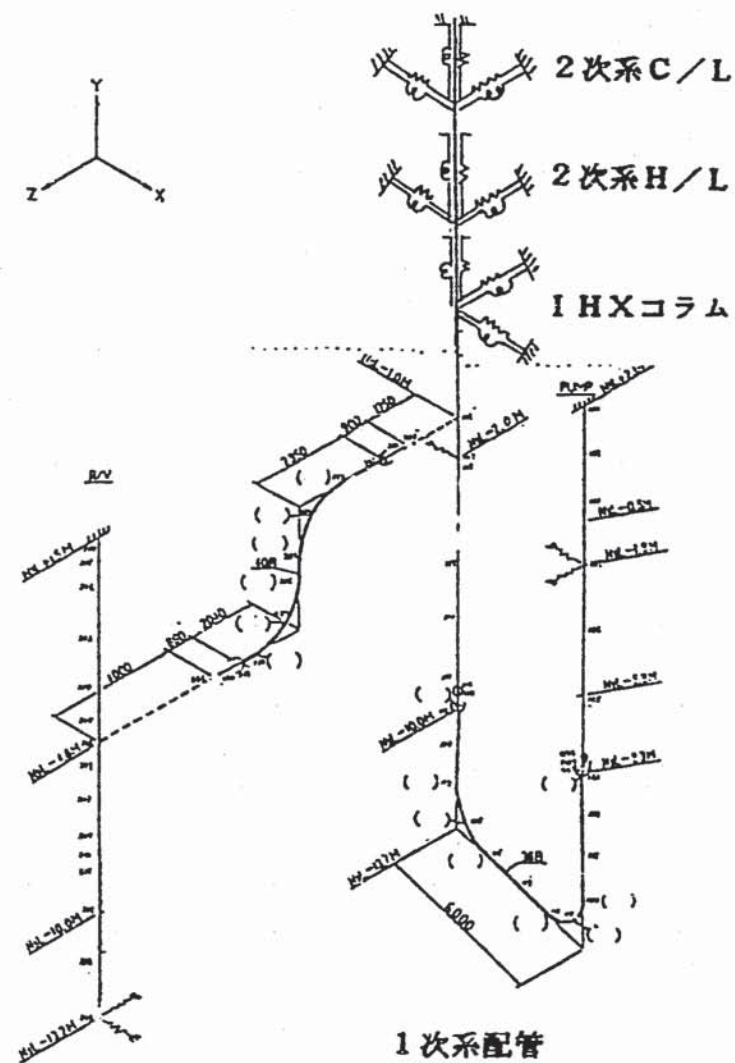


エルボの曲げ応力指数は, 中央, 両端とも 1.0

単位 ; kg/mm^2 , 使用コード ; MSAP

表 4.1.5 熱膨張応力の比較 (2次系, I H Xコラムを剛性模擬, C/L削除)

節 点		I H X上部, C/L を考慮	2次系, I H Xコラ ムバネC/L削除
ホ ッ ト レ グ	2 5 3	7.0	6.9
	2 5 4	1 9.5	1 9.6
	2 5 5	7.6	7.6
	2 5 6	7.2	7.2
	2 5 7	1 9.1	1 9.2
	2 5 8	6.3	6.3
ク ロ ス オ ー バ レ グ	1 1 4	2 7.0	2 7.0
	1 1 5	1 6.1	1 6.2
	1 1 6	3 2.2	3 2.6
	1 1 8	2 7.6	2 7.4
	1 1 9	9.0	8.9
	1 2 0	2 6.4	2 6.4



エルボの曲げ応力指数は, 中央, 両端とも 1.0

単位; kg/mm^2 , 使用コード; MSAP

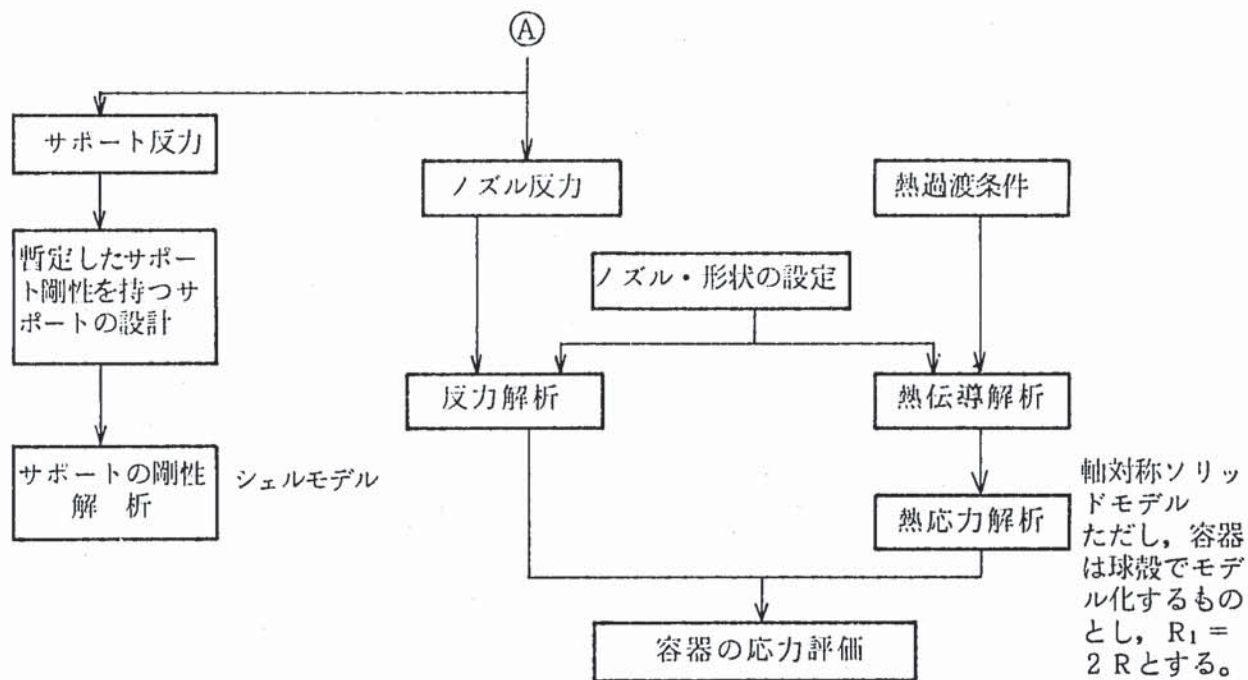
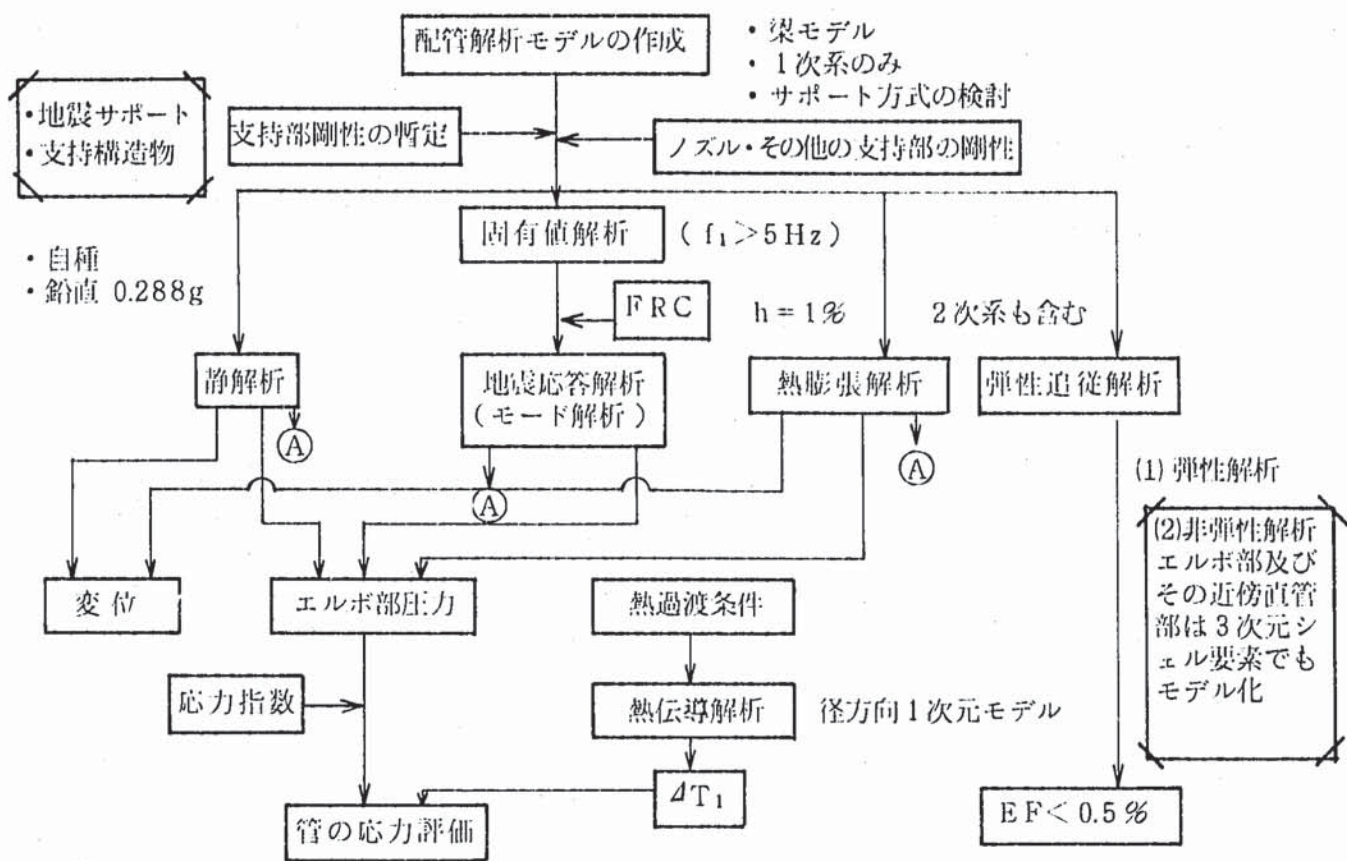
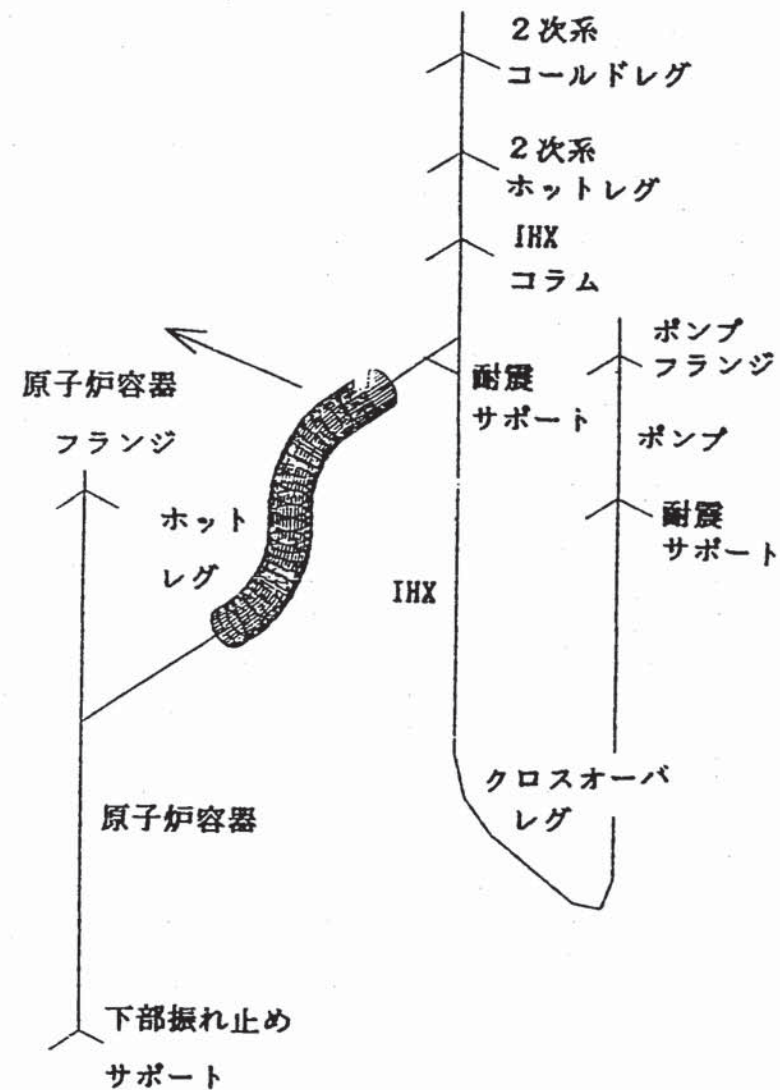
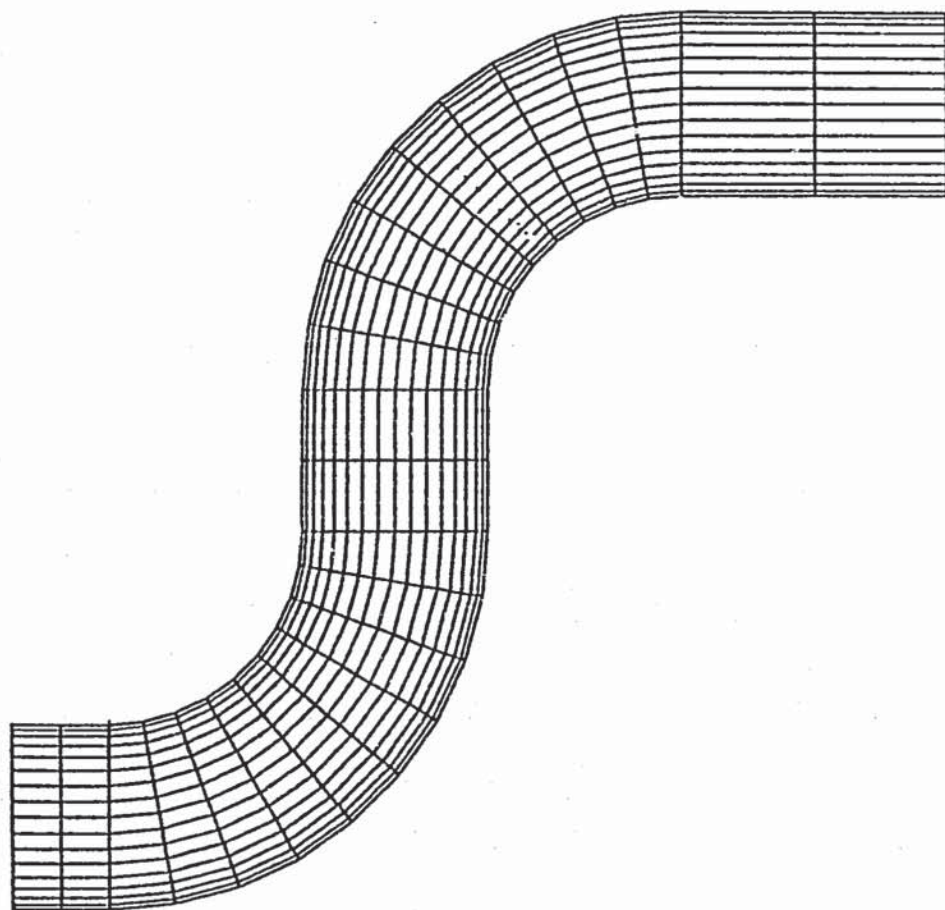


図 4.1 検討フロー図

GEOM. SCALE 1000.00

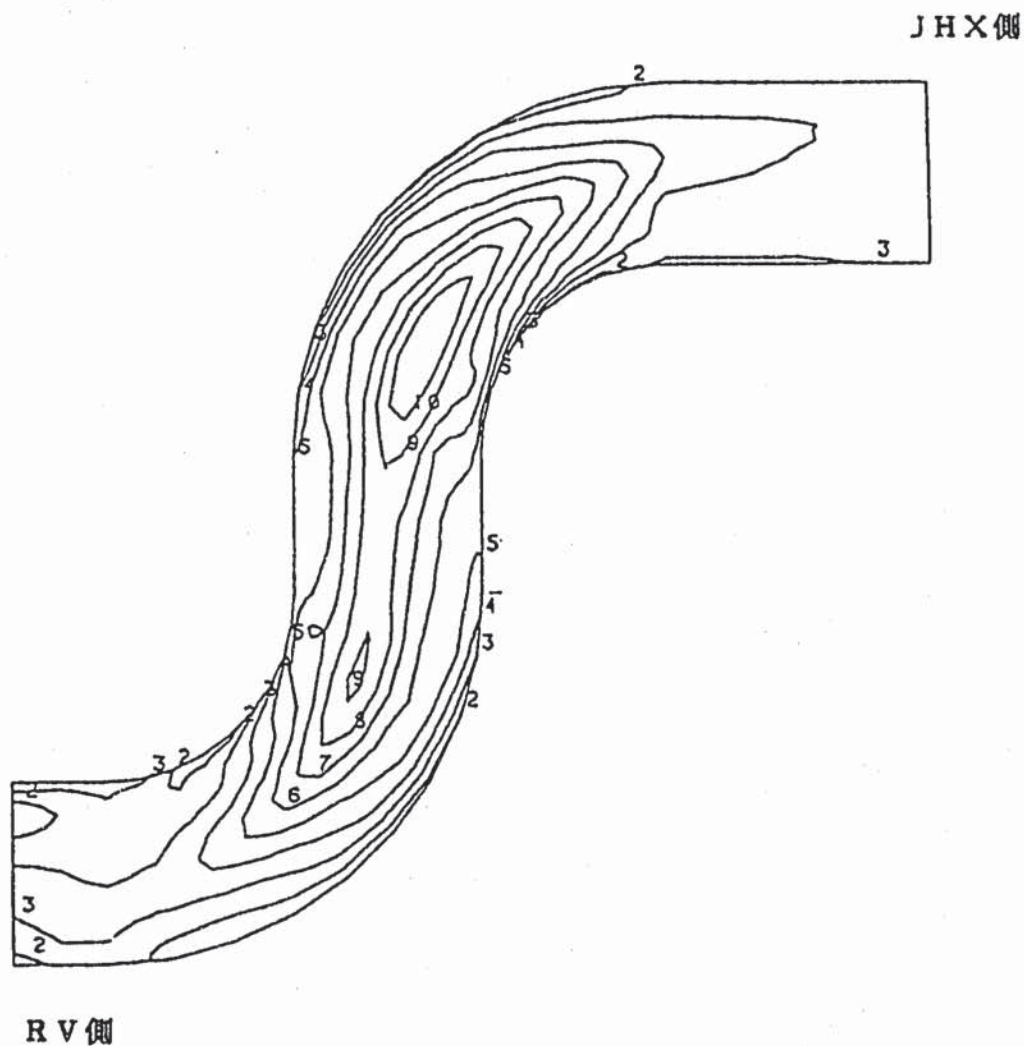


GEOM. SCALE 3000.00

図 4.1.1 非弾性解析モデル図

CONTOUR VALUES

1	0.500000
2	1.500000
3	2.500000
4	3.500000
5	4.500000
6	5.500000
7	6.500000
8	7.500000
9	8.500000
10	9.500000



STEP NO. 1

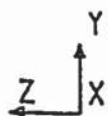
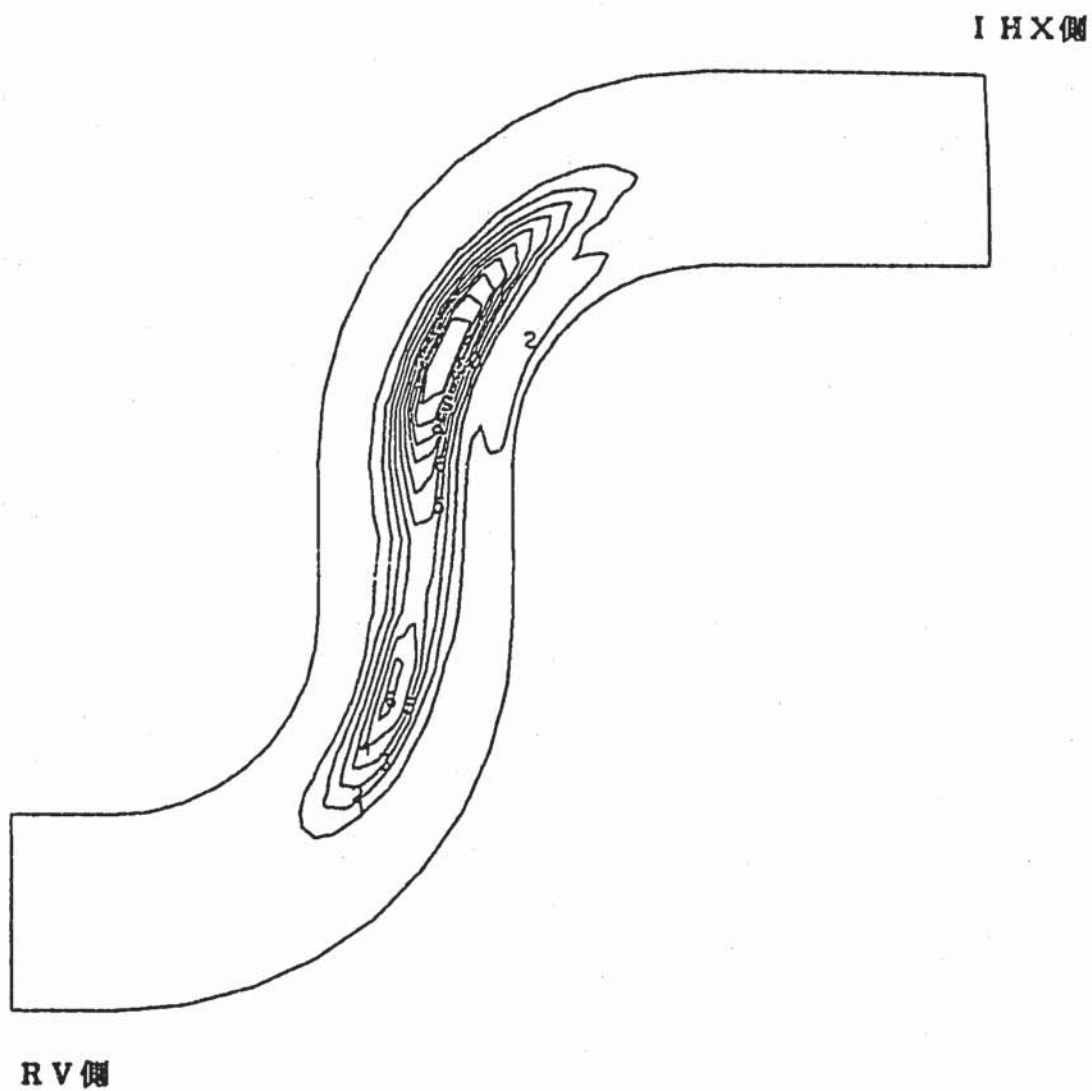
GEOM. SCALE 1000.00

図 4.1.2 弾塑性応力コンタ ($T = 250^{\circ}\text{C}$)

(ミーゼスの応力)

CONTOUR VALUES

1	7.000-05
2	2.000-04
3	3.300-04
4	4.600-04
5	5.900-04
6	7.200-04
7	8.500-04
8	9.800-04
9	1.110-03
10	1.240-03



GEOM. SCALE 1000.00

図 4.1.3 弾塑性ひずみコンタ ($T = 500^{\circ}\text{C}$) 相当塑性ひずみ

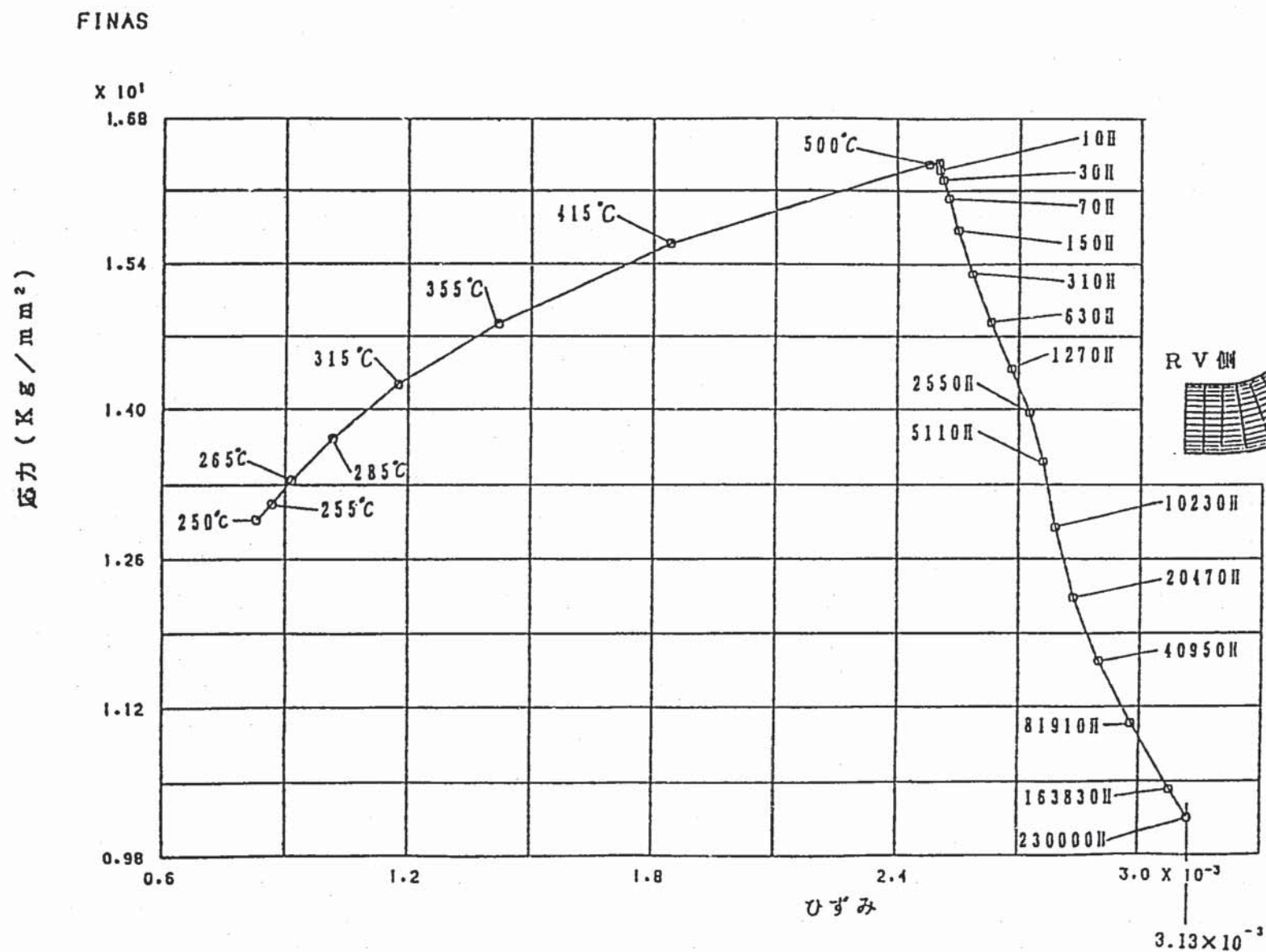


図4.1.4 周方向応力とひずみの関係

4.2 配管の健全性評価

パラメータサーベイで最終決定された図 2.2 ～図 2.3 に示す配管系について、自重、熱膨張、地震による応力を求め、健全性を評価した。

4.2.1 解析モデル

使用した解析モデルは図 3.4 に示す通りである。解析に当っては次の事項を考慮した。

- ① 熱膨張解析に際しては、二次系を連成した解析とする。
- ② 一次系配管については R/V, I H X 及びポンプの各機器のノズル剛性を考慮する。剛性は三次元シェル解析を用いてもとめた(表 2.3)。
- ③ 各支持部での支持剛性は、熱膨張解析時に剛支持とし、自重、地震解析時には表 4.2.1 に示す剛性を用いる。
- ④ R/V, I H X, ポンプは等価な剛性を有する梁モデルとする。
- ⑤ C/L 配管のポンプ出口のエルボはポンプノズルに直付けしているが、このフレキシビリティファクターや応力指数は三次元シェル解析によりもとめる(添付資料参照)。
- ⑥ I H X 支持コラムは使用したパイプと同等な剛性を有する梁モデルとする。

4.2.2 自重による解析

図 4.2.1 に変形図を、図 4.2.2 に各部の応力を示す。変形の最大値は約 1.8 mm, H/L の応力は 1.0 kg/mm² である。

4.2.3 熱膨張解析

(1) 荷重条件

荷重条件は以下とした。

- ① H/L 配管, X/L 配管及び C/L 配管の運転温度, 最高使用圧力, 運転圧力および重量等は表 2.2 に示すとおりである。
- ② R/V, I H X 及びポンプの温度条件は図 2.9 に示すとおりである。
- ③ 熱過渡条件は図 2.9 に、応力評価用荷重ヒストグラムは表 2.4 にそれぞれ示すとおりである。

(2) 解析結果

熱膨張応力の解析結果を図 4.2.3 ～図 4.2.8 に示す。

① 定格運転時

図 4.2.3 に変形図を、図 4.2.4 に各部の応力をそれぞれ示す。各配管に生ずる応力はそれぞれ $3 \bar{S}_m$ (27.5 kg/mm²), $3 S_m$ (33.6 kg/mm²) 以下である。

② 熱過渡(I)

熱過渡(I)の事象で一時的に系のバランスが崩れ、大きな熱膨張応力が発生することがあるかどうか解析した。定格で 500℃ の範囲を 400℃ に、定格で 360℃ の範囲を 410℃ として解析した。図 4.2.5 に変形図を、図 4.2.6 に各部の応力をそれぞれ示す。定格時に比べ、温度差が小さくなった H/L ～ X/L では全般的に応力が低下するのに対

して、 $360^{\circ}\text{C} \rightarrow 410^{\circ}\text{C}$ に上昇したC/Lではモーメント分布も変化し、最大応力もまたその発生点も変動している。

③ 熱過渡(II)

②と同様の解析を実施した。 $500^{\circ}\text{C} \rightarrow 400^{\circ}\text{C}$ に、 $360^{\circ}\text{C} \rightarrow 440^{\circ}\text{C}$ に変えて解析をしている。図4.2.7に変形図を、図4.2.8に各部の応力をそれぞれ示す。C/Lの応力はさらに増大し、最大 $35.5 \text{ kg/mm}^2 < 3 S_m = 36.0$ となる。

4.2.4 耐震解析

(1) 床応答曲線

原子炉建物を運転床レベルまで岩盤中に埋込むことによって、床応答の低減化を図っている。検討に用いた床応答曲線の作成条件及び手順は以下のとおりである。

① 検討用基準地震動

軽水炉改良標準化委員会(改標, 昭和55年度)において策定された高地震地帯用S1近距離地震の速度応答スペクトル($M=7.0$, $\Delta=20.0 \text{ km}$)を目標スペクトルとし、混合位相(改標, 昭和59年度)による手法とJennings型の包絡関数を用いて模擬地震動を作成した。図4.2.9にその概略を示すが、最大加速度は約 265 gal 、継続時間は約 2.4 sec であり、これらの値は改標のいわゆるSinとほとんど同等である。なお、作成した模擬地震動の加速度応答スペクトルは、短周期側で目標スペクトルをやや上回る結果となっている。

② 原子炉建物の振動モデル

昭和60年度の設計研究においてプラント主要機器の配置検討に基づき概念が示された建屋を対象とする。図4.2.10に示すとおり、平面寸法が $66 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ 、高さ 59 m で、中央部約 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ にR/Vを中心とする1次系が収納される。建屋図面を基に耐震壁、柱・梁を配置し、常時荷重、地震荷重、及びしゃへい上の要求等を検討して軀体の構造計画を行い、これに基づいて建屋の振動解析モデルを作成した(図4.2.11)。なお、使用するコンクリートは $F_c = 300 \text{ kgf/cm}^2$ 級を想定した。

③ 地震・建物相互作用解析(S S I)

S S I解析は埋込み効果を考慮したS・Rモデルを用いた。基礎地盤ばねは振動アドミッタンス理論、側面ばねはNovakの方法を用い、周波数領域での解析結果を逆FFTにより時間領域に変換する手法を用いている(図4.2.12)。

地盤条件としては $V_s = 700 \text{ m/s}$ の軟質岩盤と $V_s = 1500 \text{ m/s}$ の硬質地盤の2通りを考慮し、埋込み深さに関するパラメタサーベイを行った。

図4.2.13にパラメタサーベイの結果の一例を示すが、R/V据付けレベル程度までの埋込みによりかなりの床応答低減効果が期待されることがわかる。表層埋戻し土の考慮による逸散減衰効果も見られるが、今回は埋戻しの効果は採り入れていない。

建屋建設後の機器搬入等を考え併わせ、機器の耐震検討に用いる床応答曲線として、運転床レベルまでの埋込みを行う場合の硬質／軟質両床応答曲線を周期方向に10%拡大した後に包絡したものを採用することとした。図2.10に検討用床応答曲線を示す。なお減衰定数は1%とした。

(2) 耐震解析モデル

基本的には熱膨張解析に用いたものと同一の、一次主冷却系の1ループを取り出した梁モデルである。熱膨張解析モデルとの相違点は以下のとおりである。

- ① 2次系との連成は考慮しない。
- ② 耐震支持部の剛性は以下の手順により出来るだけ現実的な値とする。
 - (i) まず、支持構造物として現実的な剛性を有する構造形態を想定し、2mm程度のガタを考慮して初期剛性を設定する。支持構造自体の剛性としては、機器の支持構造物に対しては200 ton/mm、配管の支持構造物に対しては50 ton/mmの値を採用する。
 - (ii) 耐震解析を行い、各支持点の反力Fを算定する。
 - (iii) 構造物自体の剛性をK、考慮するガタ量を Δ として、

$$K_0 = F / (\Delta + F / K)$$
 により等価線型剛性を補正する。
 - (iv) 解析前後の剛性を比較して、収束していなければ、(ii)、(iii)を繰返す。

図4.2.14に等価線型化手法の概念と繰返し計算による剛性収束状況を示すが、今回の解析では5回程度の繰返して剛性値は収束している。

表4.2.1および表2.3は耐震解析に用いた支持部剛性とノズル剛性である。

(ノズル剛性は熱膨張解析と同一である。)

(3) 解析結果

① 固有値解析結果

図4.2.15に固有値の一覧と床応答曲線との関係、図4.2.16に8次までの固有振動モードを示す。床応答曲線のピークは $T = 0.25 \sim 0.3$ sec 近辺にあるが、一次主冷却系の最低次の固有周期はこのピークを短周期側にはずれている。10次モードあたりまでが、スペクトル加速度1.0～1.3 Gの領域にある。

次に各次数のモードを見る。1～3次はクロスオーバーレグの振動が卓越するモード(1次：面外、2次：面内、3次：ねじれ+IHXの振動)である。これらのモードから、耐震上はクロスオーバーレグの両ノズル(IHX出口、ポンプ入口)が厳しくなることが予想される。4次はコールドレグの面内振動、5、6次はポンプの振動が卓越するモードである。5次モードでは、IHXとポンプが逆位相で振れている。R/Vの振動は7次モードで初めて現われる。

② 応答(応力)解析結果

解析の結果得られるモーメントからの配管エルボの応力計算方法は次の通りとする。

a. 2次応力

$$(イ) \text{ エルボ中央} \quad S = \left(C'_2 \frac{M_X}{2Z} + C_2 \sqrt{\frac{M_Y^2 + M_Z^2}{Z}} \right) \frac{E_c}{E_h}$$

$$(ロ) \text{ エルボ端部} \quad S = \left(C'_2 \frac{M_X}{2Z} + 0.6 C_2 \sqrt{\frac{M_Y^2 + M_Z^2}{Z}} \right) \frac{E_c}{E_h}$$

ここで, S : 応力レンジ

M_X : ねじりモーメント

M_Y, M_Z : 曲げモーメント

C'_2 : ねじりに対する応力係数であるが, 暫定的につき 1.0 とする。

b. 1次応力

$$S = B'_2 \frac{M_X}{2Z} + B_2 \sqrt{\frac{M_Y^2 + M_Z^2}{Z}}$$

ここで, B'_2 : ねじりに対する応力係数, 暫定的に 1.0 とする。

図 4.2.1 7 は水平 X, Y 方向それぞれの S_1 地震時の配管エルボに生じる応力を示している。ここで, 応力値は B_2 係数を用いている。固有振動モードとの対応から明らかなように, クロスオーバーレグの両エルボが応力的には厳しくなっている。次はコールドレグのポンプ出口側エルボで, これは逆止弁 (節点 1 6 1 に集中質量として付加) の慣性荷重が効いている。なお, 相対的に応力的に厳しいこれらのエルボには板厚補強を行っている。

図 4.2.1 8 は水平+鉛直地震による応力 ($\text{Max} \{ \text{水平}(x), \text{水平}(y) \} + \text{鉛直}$) を示す。地震による応力が最大となるのはクロスオーバーレグの I H X 出口側エルボ中央であるが, ここでの応力と自重及び内圧による長期 1 次応力を加えた応力は下記のとおり B D S の第 1 種管の 1 次応力の制限を満足している。

$\langle P_L + P_L^* + P_B + P_B^* \rangle$		許 容 値
$S_1 (\text{III})$	9.9 kg/mm^2	$< 16.1 \text{ kg/mm} (1.2 \text{ ks } S_m)$
$S_2 (\text{IV})$	14.7 kg/mm^2	$< 26.9 \text{ kg/mm} (2 \text{ ks } S_m)$

(425℃)

表 4.2.2 は地震時の 1 次及び 2 次応力範囲の制限による評価を示している。B D S では, 地震時の短期荷重に対する 1 次及び 2 次応力範囲の算定に C_2 係数を用いることを要求しているので, 図 4.2.1 8 の応力を $2C_2/B_2$ 倍して 1 次及び 2 次応力範囲を評価した。

結果は, 全てのレグについて, シェークダウン基準及びメカニカルラチェットの制限基準が満足されている。

以上の結果，1次主冷却系配管は耐震上成立の見通しが十分あるものと考えられる。

4.2.5 総合評価

検討条件とした温度条件，熱過渡条件，床応答曲線等に基づいて，1次主冷却系配管の応力解析を行い，設定した荷重ヒストグラムを用いて，BDSによる健全性評価を行った。

表4.2.3に各LEGについての評価結果（総合応力評価表）をまとめて示すが，いずれの配管も1次応力，1次及び2次応力，（クリープ）疲労損傷の制限を満足しており，設計の成立性に対する見通しが得られた。

表 4.2.1 耐震支持構造物の剛性値

原子炉容器下部振止め	250 ton/mm	IHX支持メカニカル防振器	30 ton/mm × 4台
IHX胴部支持構造	70 ton/mm	ポンプ胴部支持構造	5 ton/mm
C/L配管R/V側レストレント	3 ton/mm	C/L配管R/V側レストレント	3 ton/mm

表 4.2.2 地震による応力の評価

(kg/mm²)

	S ₁ (III A S)		S ₂ (N A S)	
	S _n *	3 S _{mH}	S _n *	2.5 (3 S _{mH})
HOT LEG	5.8	(30.0)	8.7	(75.0)
CROSS OVER LEG	22.6	(31.4)	33.9	(79.5)
COLD LEG	11.8	(31.4)	23.8	(79.5)

H/L : 500℃
X/L, C/L : 360℃

表 4.2.3 総合応力評価表 (ホットレグ配管)

単位 (応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限									クリープ疲労損傷の制限		
			一次 + 二次応力の制限					S _a 制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態 N に関する制限			
			S _a [*] (3S _{mH})	S _a (3S _m)	S _a (2.5(3S _m))	S _a ' (3S _m)	S _e (3S _m)	P ⁺ +Q ⁺ (S _a)	εEC+ε _m EF	εEC+ε _m EF +ε _b EF (0.02)	S _a [*] (2.5(3S _{mH}))	傾 域 (E, S1, S2, P)	D _f D _e	D _f +D _e (D)
1	合 格	B	5.8 (30.0)	30.5 (27.6)	30.5 (69.5)	5.7 (21.6)	22.0 (27.6)	35.4 (16.1)	0.0029	0.0029	8.7 (75.0)	E	0.001 0.301	0.302 (0.601)

(ミドルレグ配管)

単位 (応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限									クリープ疲労損傷の制限		
			一次 + 二次応力の制限					S _a 制限	累積非弾性ひずみの制限	運転状態 N に関する制限				
			S _a [*] (3S _{mH})	S _a (3S _m)	S _a ['] (2.5(3S _m))	S _a ['] (3S _m)	S _e (3S _m)	P [*] +Q [*] (S _a)	ε EC+ε _m EF	ε EC+ε _m EF + ε _b EF (0.02)	S _a [*] (2.5(3S _{mH}))	領域 (E, S1, S2, P)	D _f D _e	D _f +D _e (D)
1	合格	C	22.6 (31.4)	25.5 (32.6)	25.5 (81.4)	17.5 (29.7)	9.2 (32.6)	47.4 (12.2)	0.000	0.000	33.9 (79.5)	P	0.000 0.300	0.300 (0.600)

(コールドレグ配管)

単位 (応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限									クリープ疲労損傷の制限		
			一次 + 二次応力の制限					S _a 制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態 N に関する制限		D _f	D _f + D _e
			S _a [*] (3S _{mH})	S _a (3S _m)	S _a (2.5(3S _m))	S _a ' (3S _m)	S _e (3S _m)	P [*] + Q [*] (S _a)	ε EC + ε _m EF	ε EC + ε _m EF + ε _b EF (0.02)	S _a [*] (2.5(3S _{mH}))	領域 (E, S1, S2, P)		
1	合格	C	6.3 (31.4)	15.7 (32.6)	15.7 (81.4)	9.2 (29.7)	5.5 (32.6)	21.2 (16.3)	0.000	0.000	9.5 (79.5)	E	0.000 0.300	0.300 (0.600)

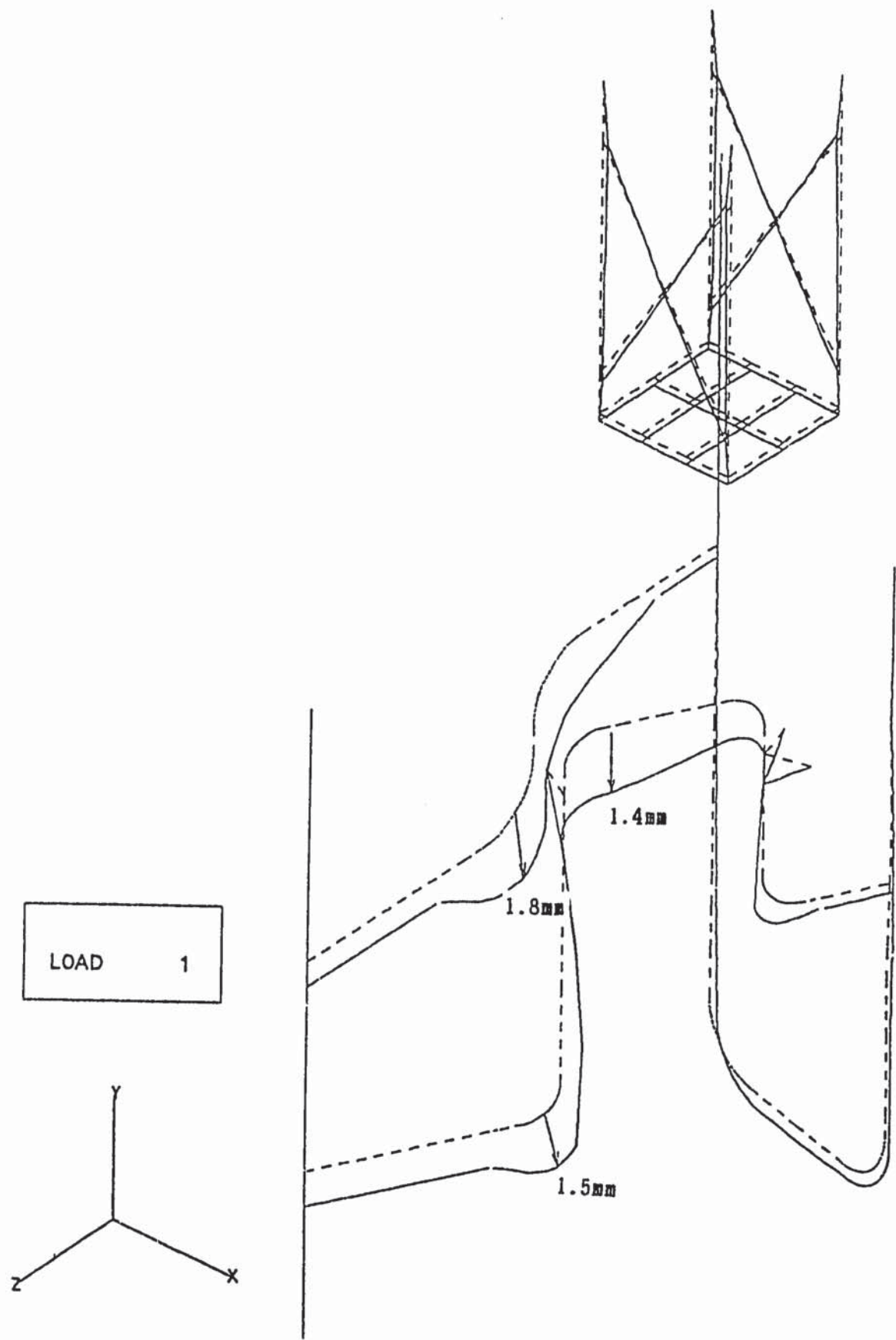


図 4.2.1 自重による変位図

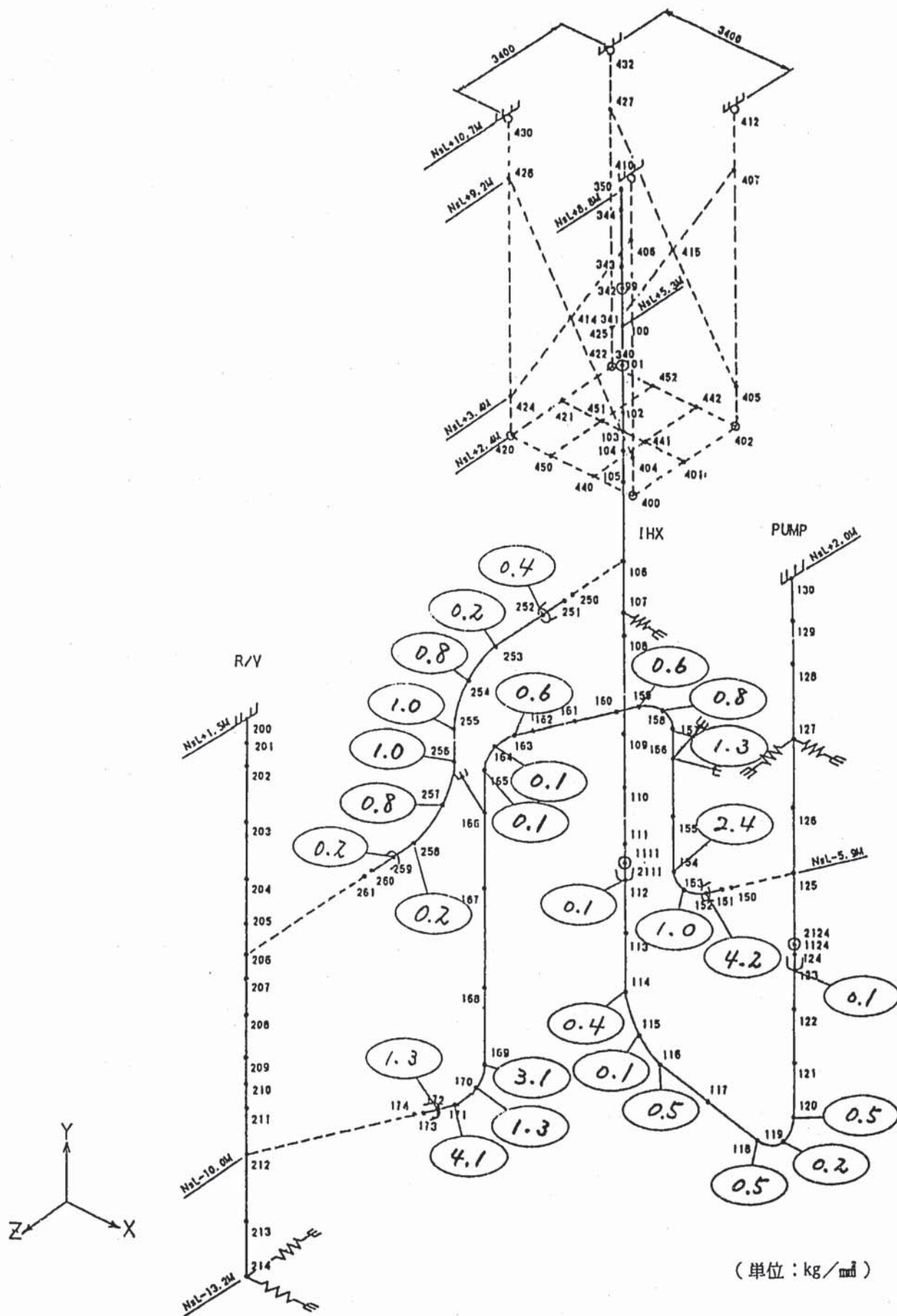


図 4.2.2 自重による応力解析結果

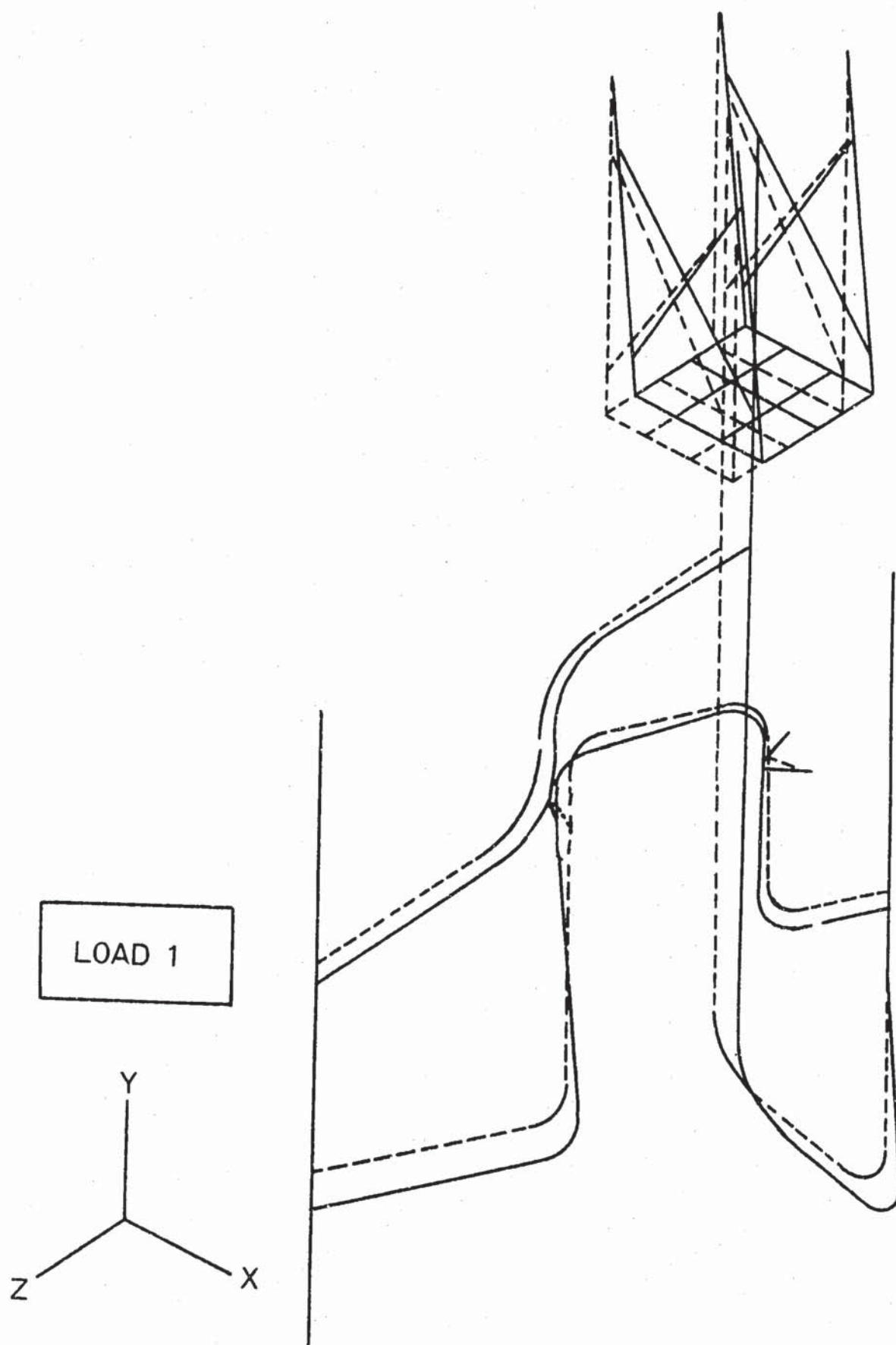


図 4.2.3 熱膨張による変位（定格運転時）

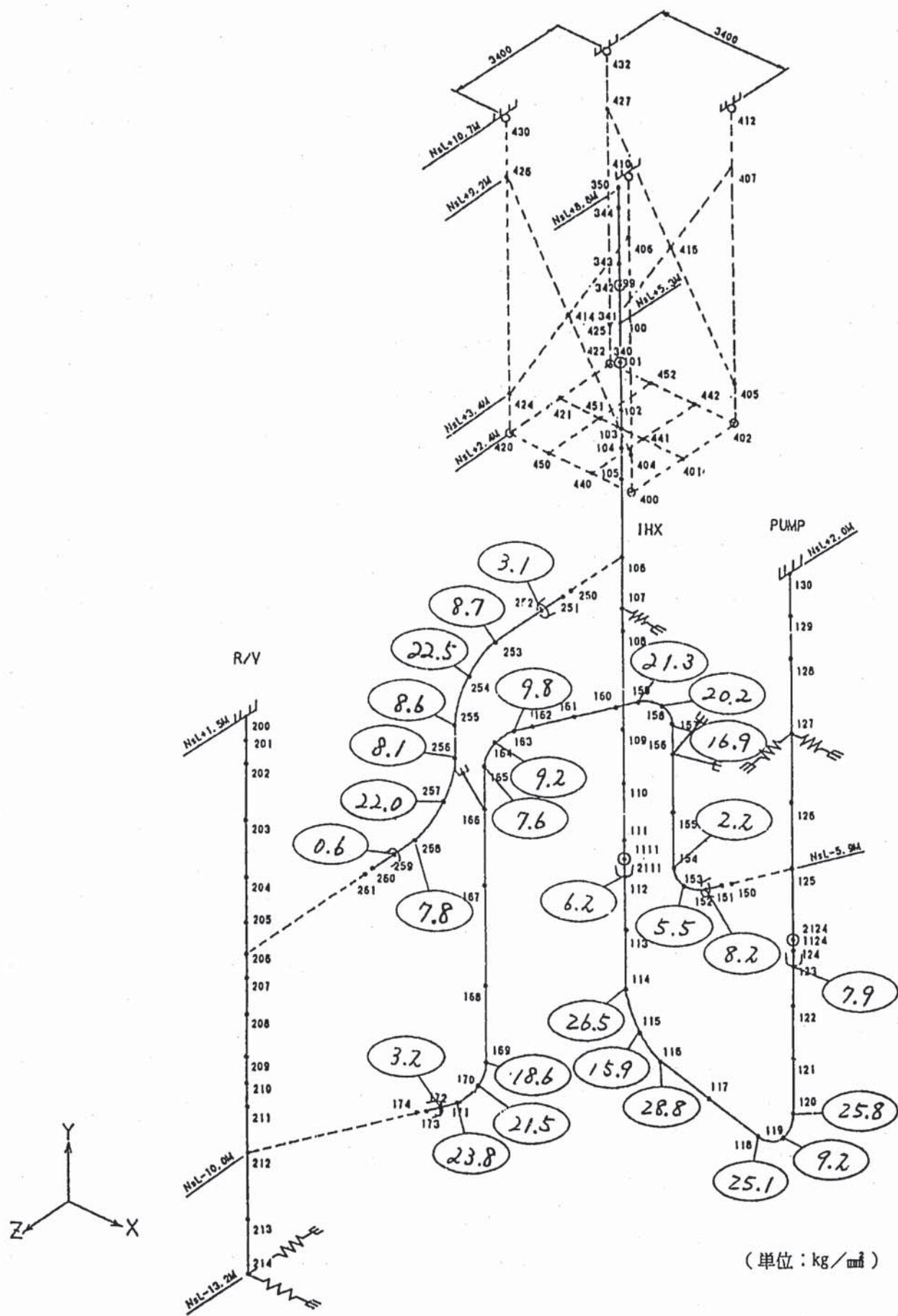


図 4.2.4 熱膨張による応力解析結果 (定格運転時)

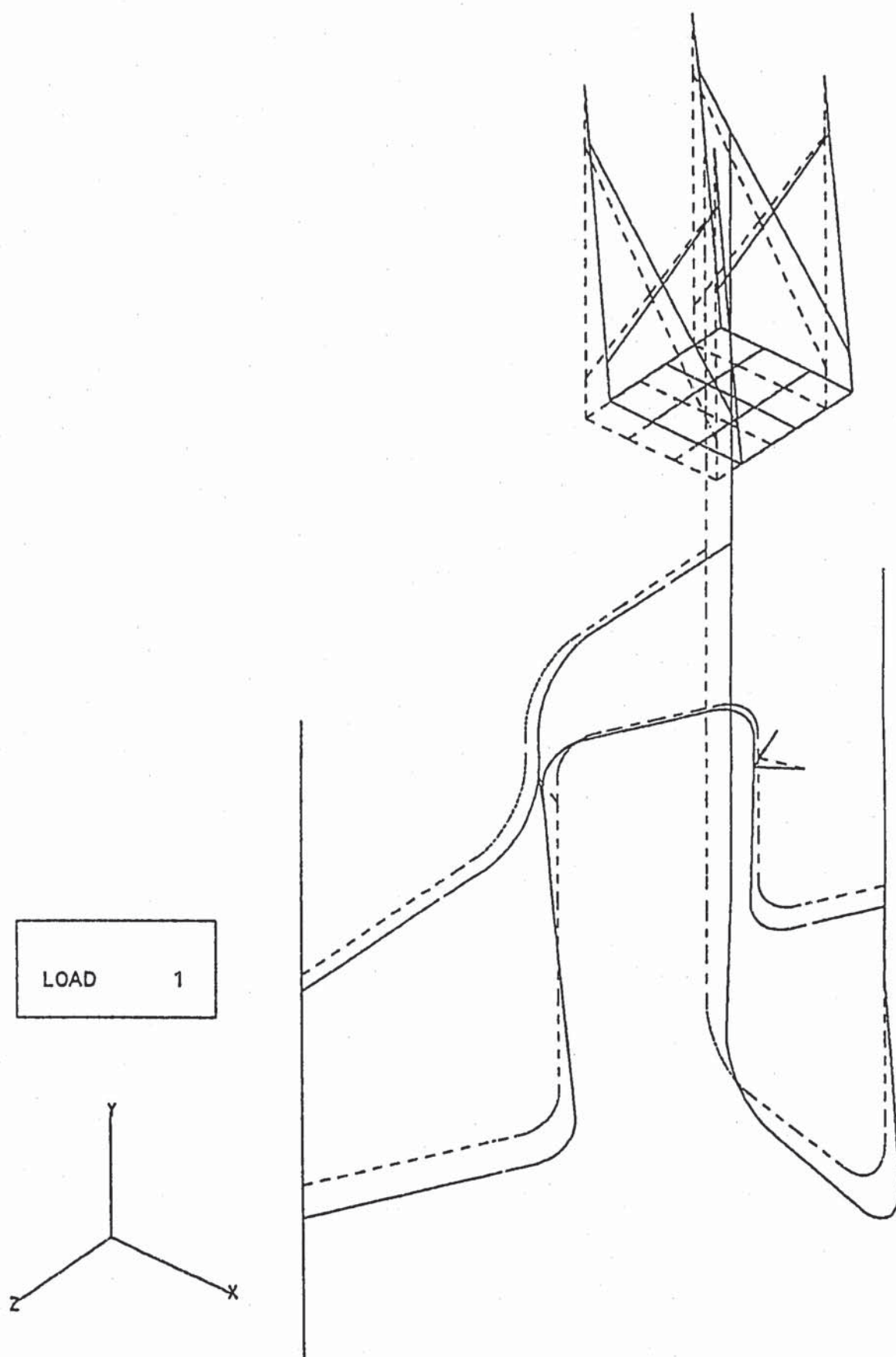


図 4.2.5 熱膨張による変位（熱過渡（I））

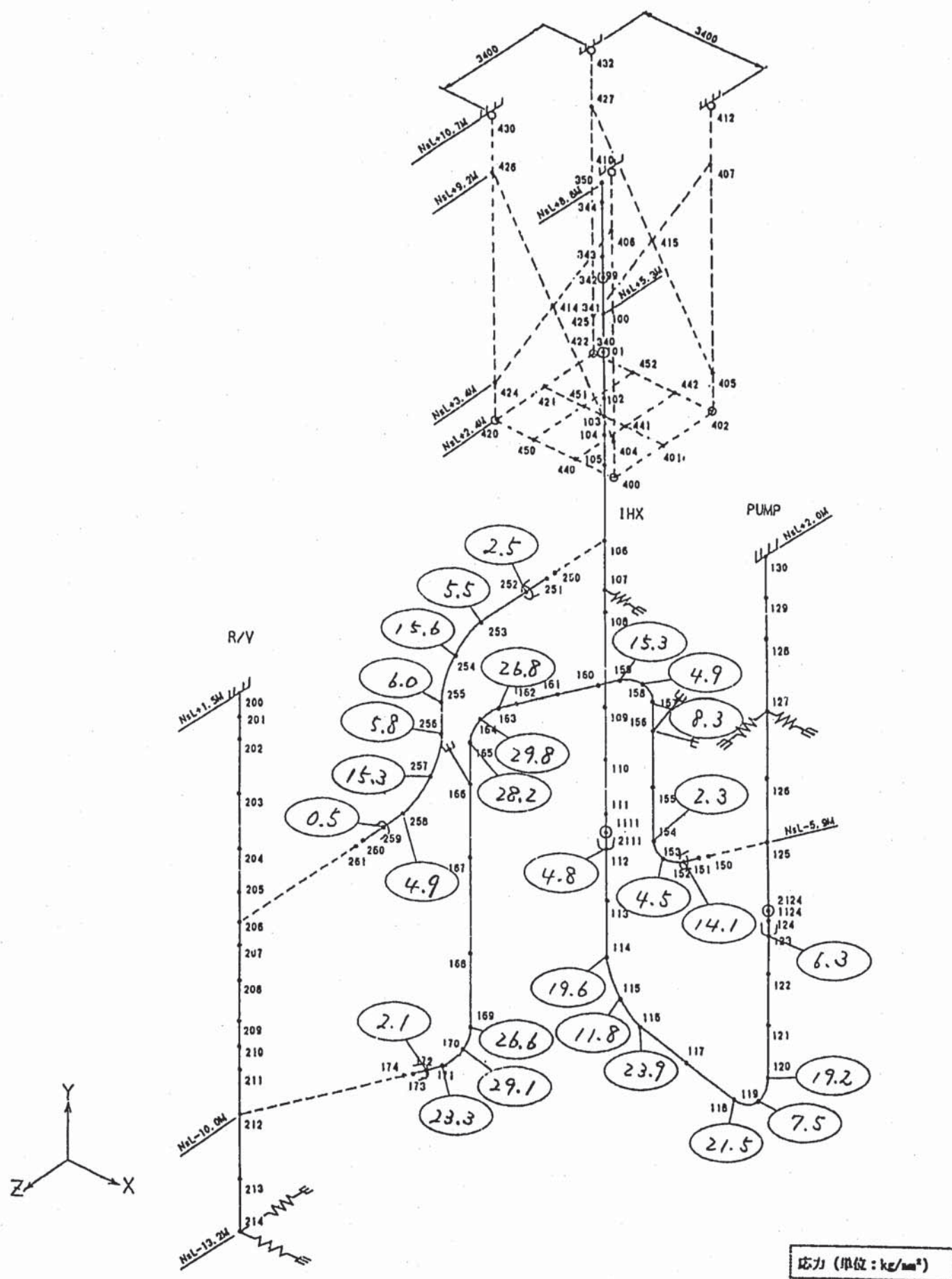


図 4.2.6 熱膨張による応力解析結果（熱過渡（I））

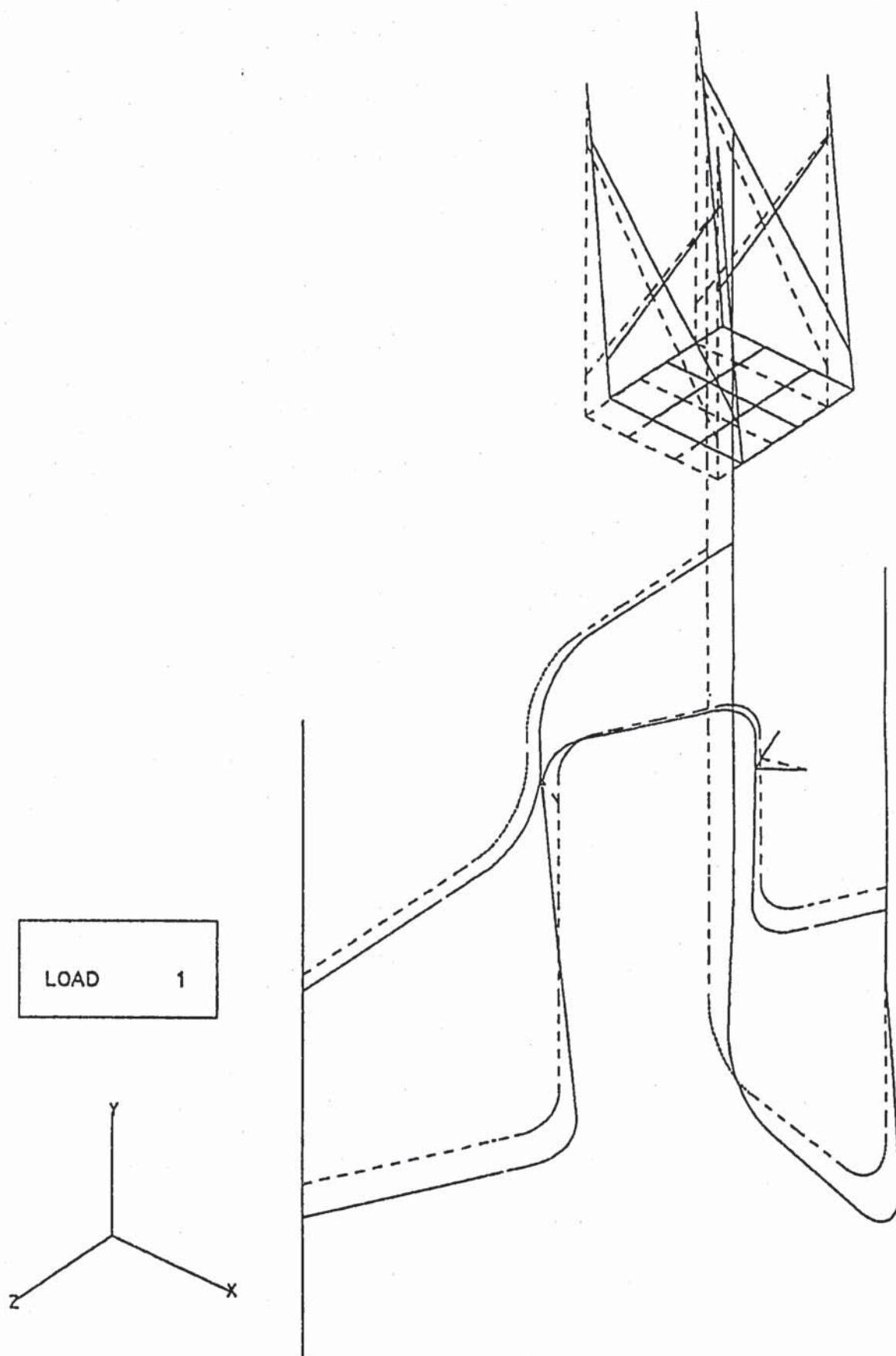


図 4.2.7 熱膨張による変位（熱過渡（Ⅱ））

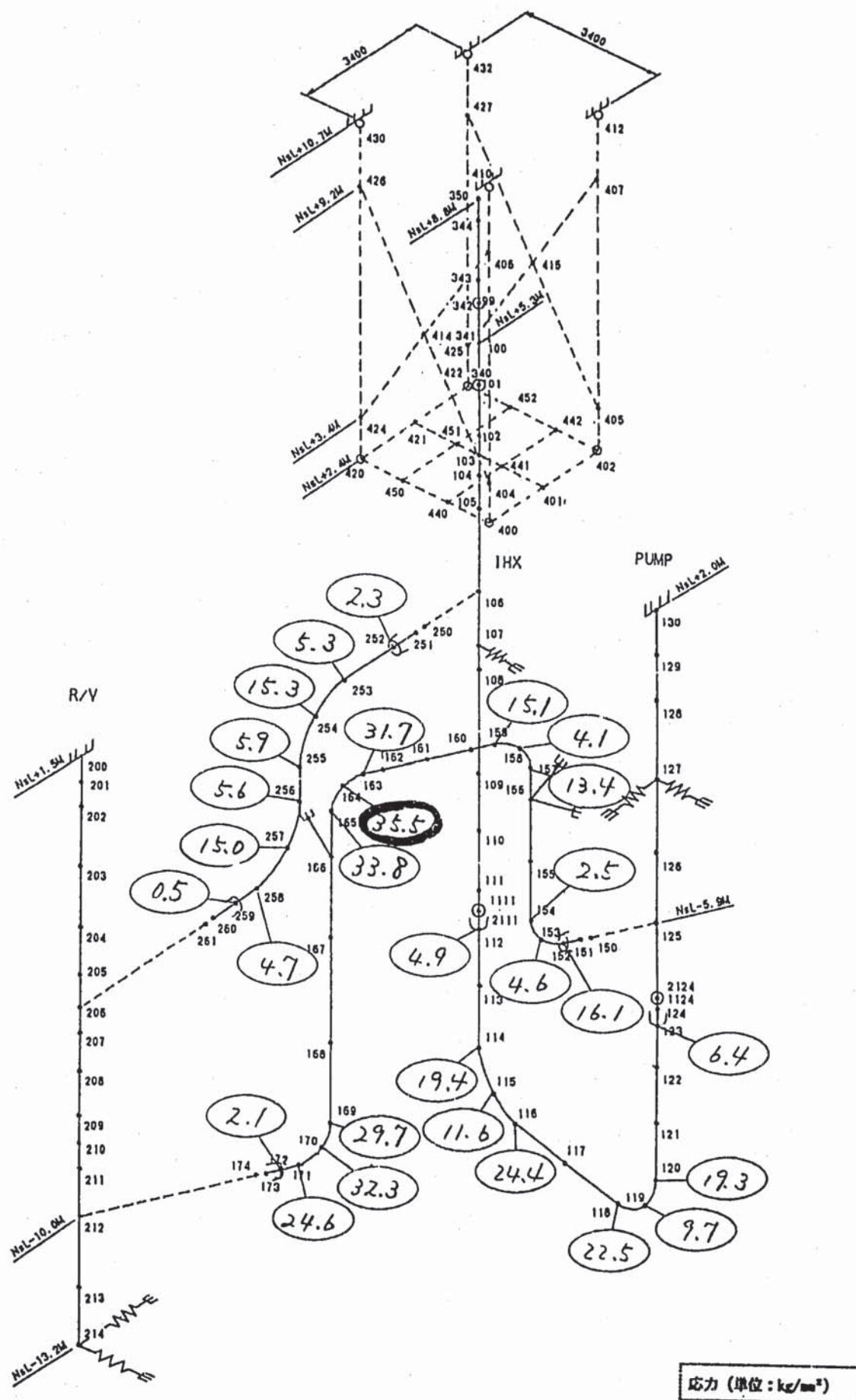
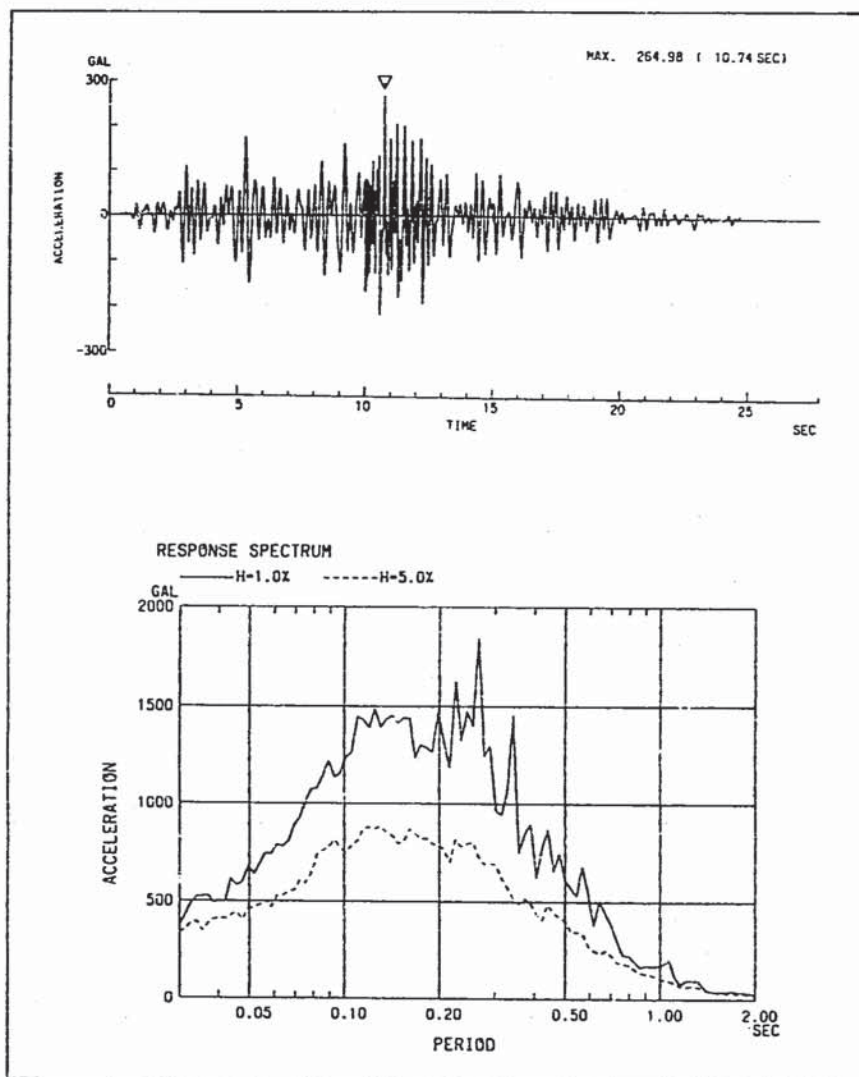


図 4.2.8 熱膨張による応力解析結果 (熱過渡 (II))



模擬地震波の作成条件

(1) 目標応答スペクトル

- ・大崎スペクトル (速度スペクトル)
- ・ $M=7.0$, $\Delta=20\text{km}$

(2) 位相特性

- ・混合位相
(軽水炉改良標準化耐震設計調査 (昭和59年度))
- ・ $\Phi_1 = af_1 + de^{-x_{f_1}} - d + we^{-z_{f_1}}[-\Pi, \Pi]$

(3) 最大速度

- ・金井式
- ・ $V_{\max} = 10^{0.61M - (1.66 + 3.6/x)\log_{10}x - (0.631 + 1.83/x)}$

(4) 包絡形

- ・継続時間 T_d : 久田式
- ・包絡形 : Jennings 型

図 4.2.9 検討用基準地震動

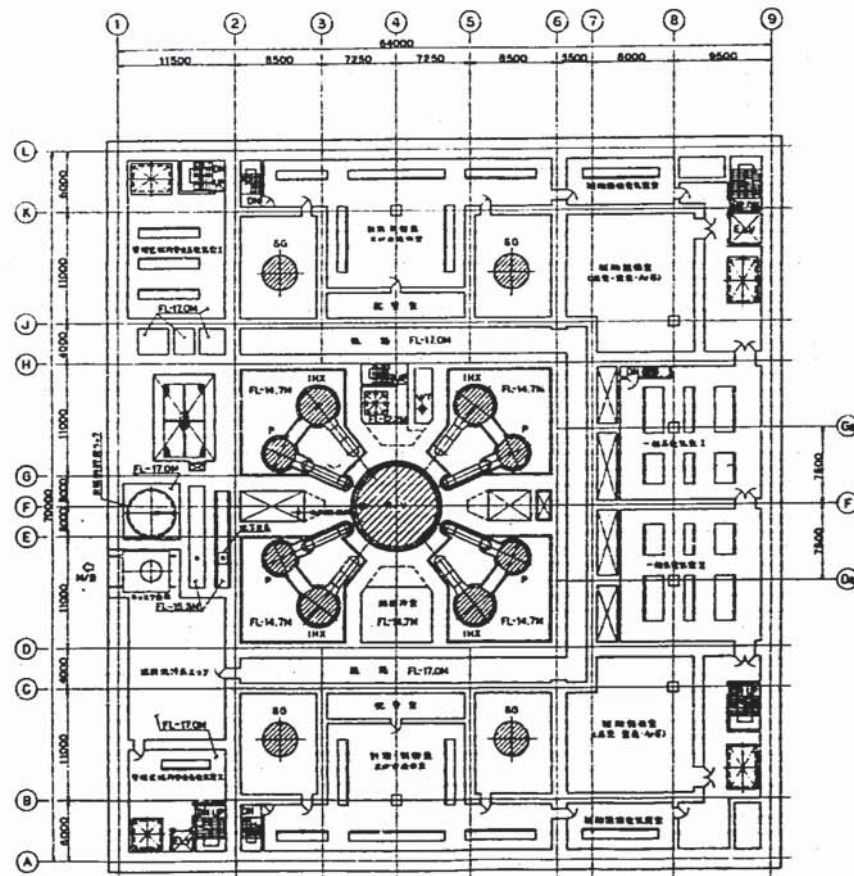
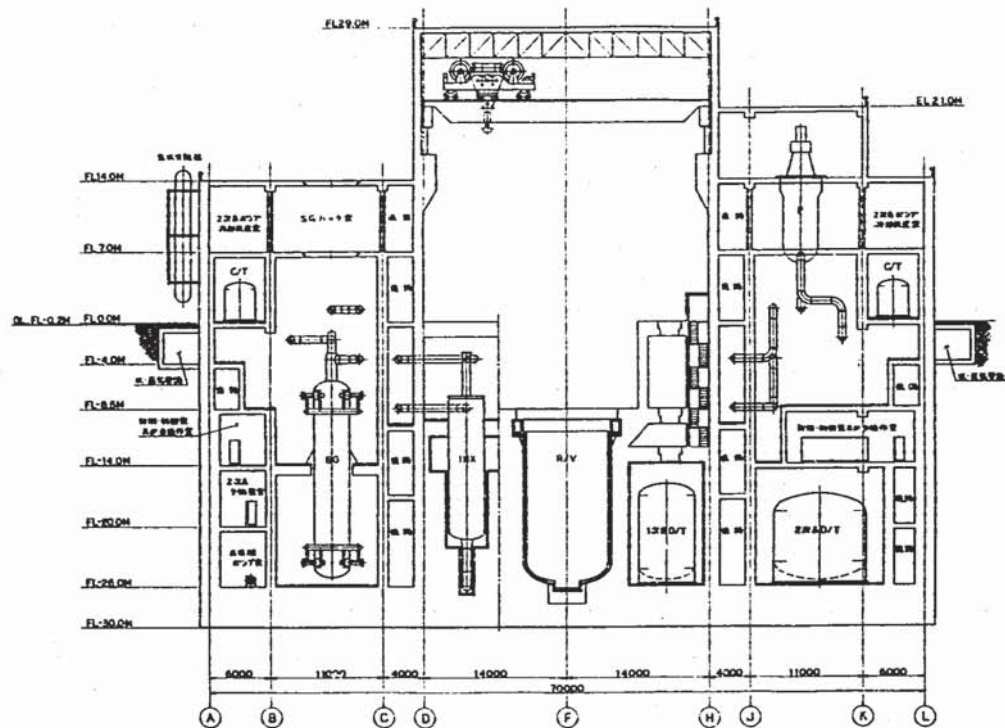
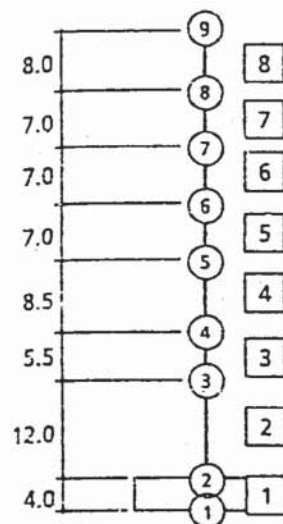
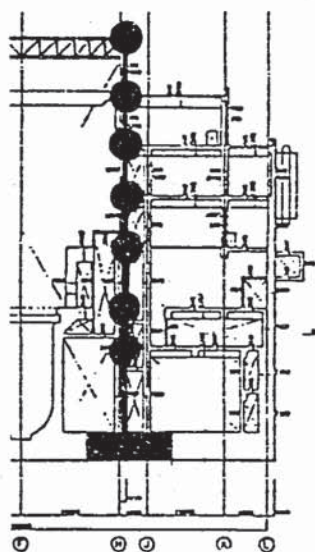


図 4.2.10 原子炉建物／原子炉補助建物



振動モデルの諸定数

モデル諸定数 (1)

質点番号	質量 (ton)	回転慣性 ($\times 10^5 \text{tm}^2$)
⑨	1260	1.18
⑧	2410	1.71
⑦	11570	42.0
⑥	17550	63.7
⑤	28460	103.5
④	31700	115.3
③	40970	149.2
②	52680	192.1
①	22810	83.1

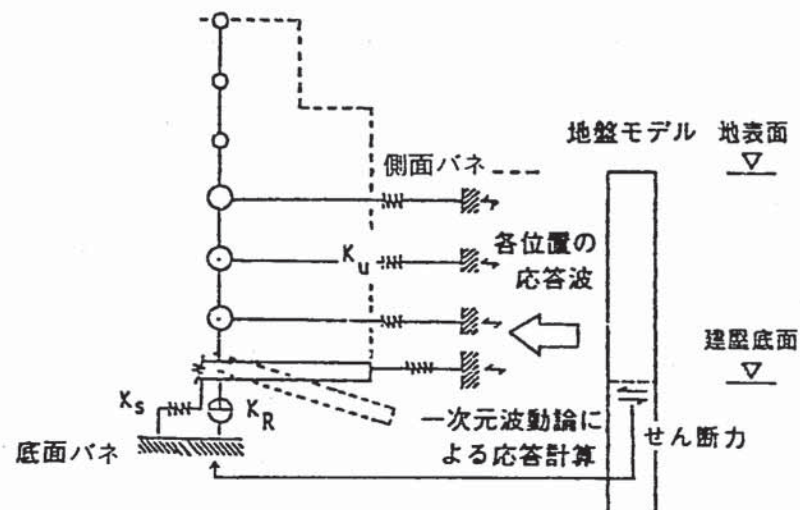
モデル諸定数 (2)

部材番号	せん断断面積 $A_s (\text{m}^2)$	断面二次モーメント ($\times 10^3 \text{m}^4$)
8	20.1	4.26
7	29.4	5.43
6	160.0	142.7
5	315.1	262.7
4	418.2	316.6
3	542.9	448.7
2	600.1	543.8
1	4752.0	172.5

総重量 209410ton

コンクリート物性値	($F_c = 30.0 \text{kgf/cm}^2$ 級)
ヤング率	$E = 2.57 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$
剪断弾性係数	$G = 1.10 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$
ポアソン比	$\nu = 1/6$
減衰定数	$h = 0.05$

図 4.2.1.1 建屋解析モデル



地盤種別	支持地盤	
$V_s(\text{m/s})$	700	1500
地盤種別	700	1500
$p(\text{t/m}^2)$	1.8	2.3
$G(\text{t/m}^2)$	90000.0	528000.0
ν	0.41	0.38
$h(\%)$	2.0	2.0

地震応答解析法

- (1) 埋込み効果を考慮したS-Rモデル
(格子型モデル、FEMモデルによる解析も実施)
- (2) 底面バネ (振動アドミタンス理論)
 - ・ 地反力分布 水平方向：一様分布
回転方向：三角形分布
 - ・ 基礎形状 $66\text{m} \times 72\text{m}$
- (3) 側面バネ (Novakの方法)
 - ・ 辺長比 1.09
 - ・ 等価半径 38.9m
- (4) 応答計算
 - ・ 周波数領域 → 逆フーリエ変換

図 4.2.1 2 地盤-建屋相互作用解析手法

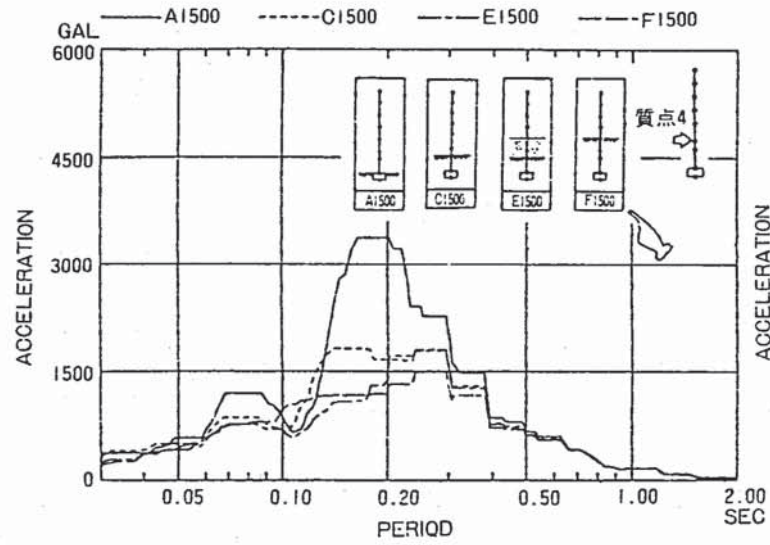
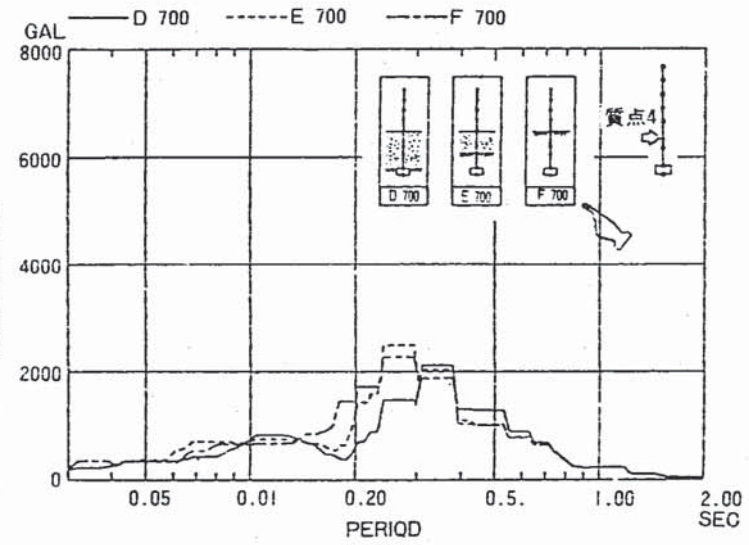
(a) 硬質地盤 ($V_s=1500\text{m/s}$)(b) 軟質地盤 ($V_s=700\text{m/s}$)

図 4.2.1 3 地盤条件・埋込み条件による床応答曲線の比較

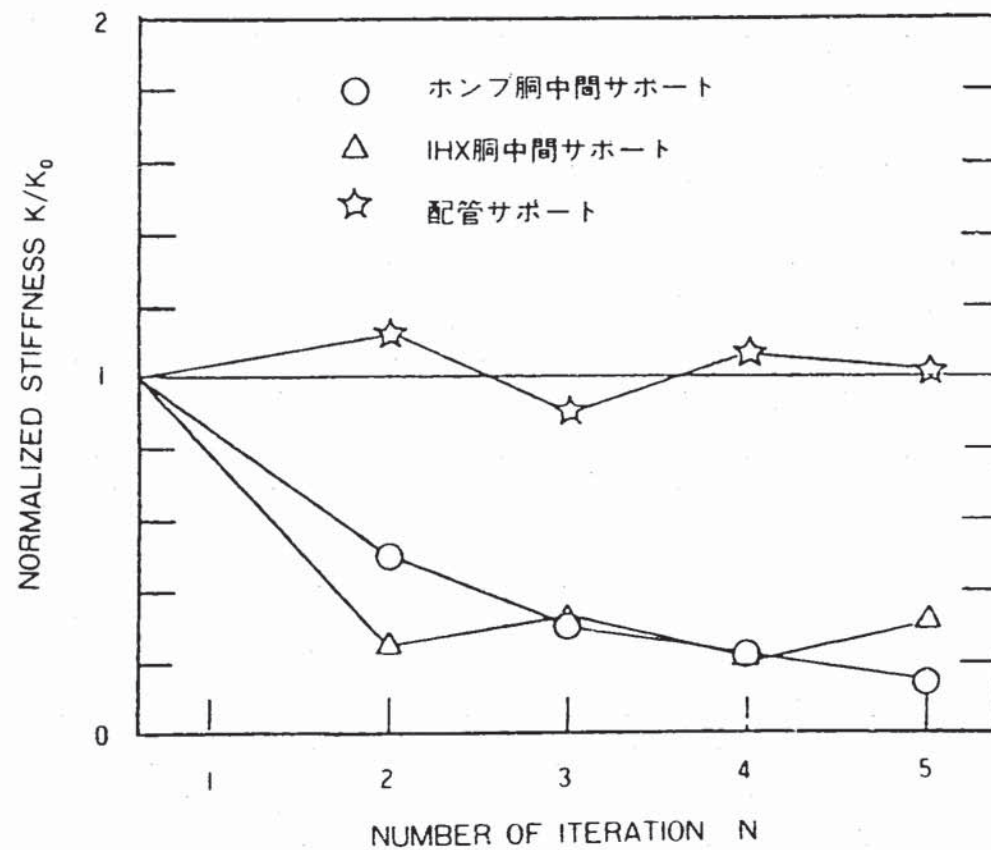
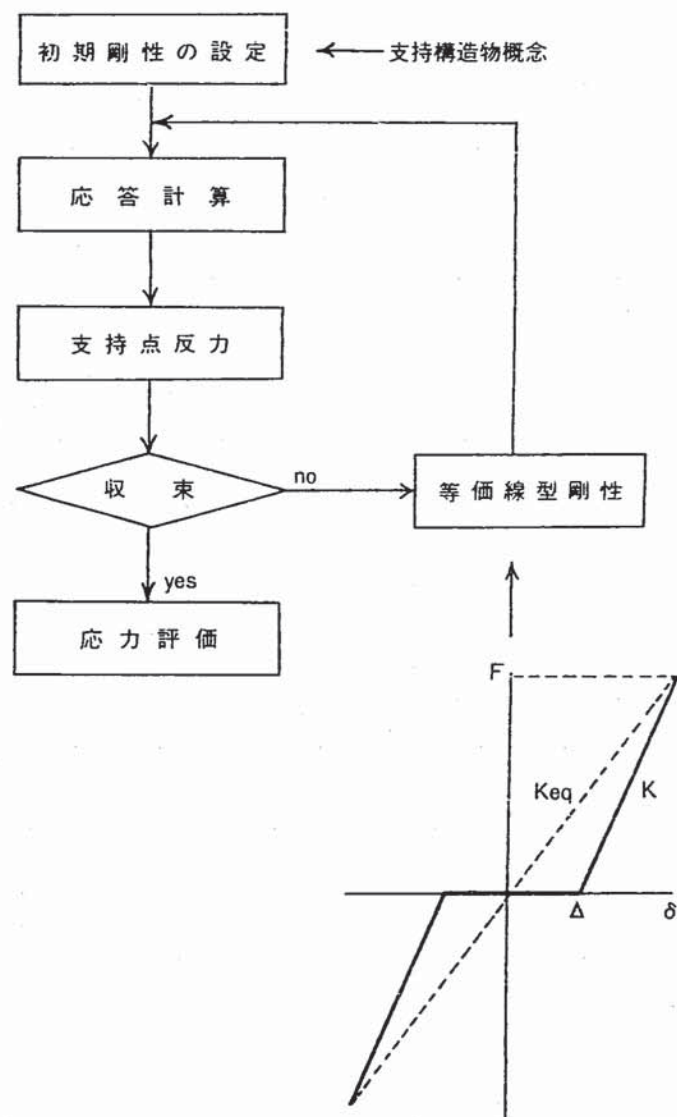


図 4.2.1 4 支持部のガタを考慮した等価線型剛性

モード	固有振動数 (Hz)	卓越節点・方向	刺激係数		
			X	Y	Z
1	5.1	118 ・ Z	-0.340	0.035	3.394
2	6.4	118 ・ X	-2.712	-0.002	-1.080
3	6.9	119 ・ Z	1.619	-0.005	-1.046
4	7.9	165 ・ Z	-0.609	-0.028	1.015
5	8.4	1124 ・ X	-0.015	-0.002	-0.032
6	8.8	116 ・ Z	0.429	-0.044	-1.774
7	9.1	169 ・ X	-1.280	0.000	-0.213
8	9.1	170 ・ Z	-0.173	-0.004	1.057
9	9.7	118 ・ X	2.227	-0.015	0.277
10	10.1	163 ・ X	2.168	0.011	0.923
11	13.4	254 ・ X	-0.847	-0.020	0.321
12	13.9	115 ・ Z	0.027	-0.023	0.550
13	14.4	168 ・ Z	-0.254	1.123	-0.175
14	14.7	254 ・ X	-1.038	-0.011	-0.057
15	14.7	255 ・ Y	-0.088	-1.961	0.083
16	16.2	168 ・ X	0.123	2.730	-0.025
17	16.9	350 ・ Z	-0.030	0.012	1.166
18	18.2	158 ・ X	-0.036	0.736	-0.026
19	18.8	167 ・ Z	0.004	-3.548	-0.010
20	21.6	167 ・ Z	-0.050	0.931	0.072

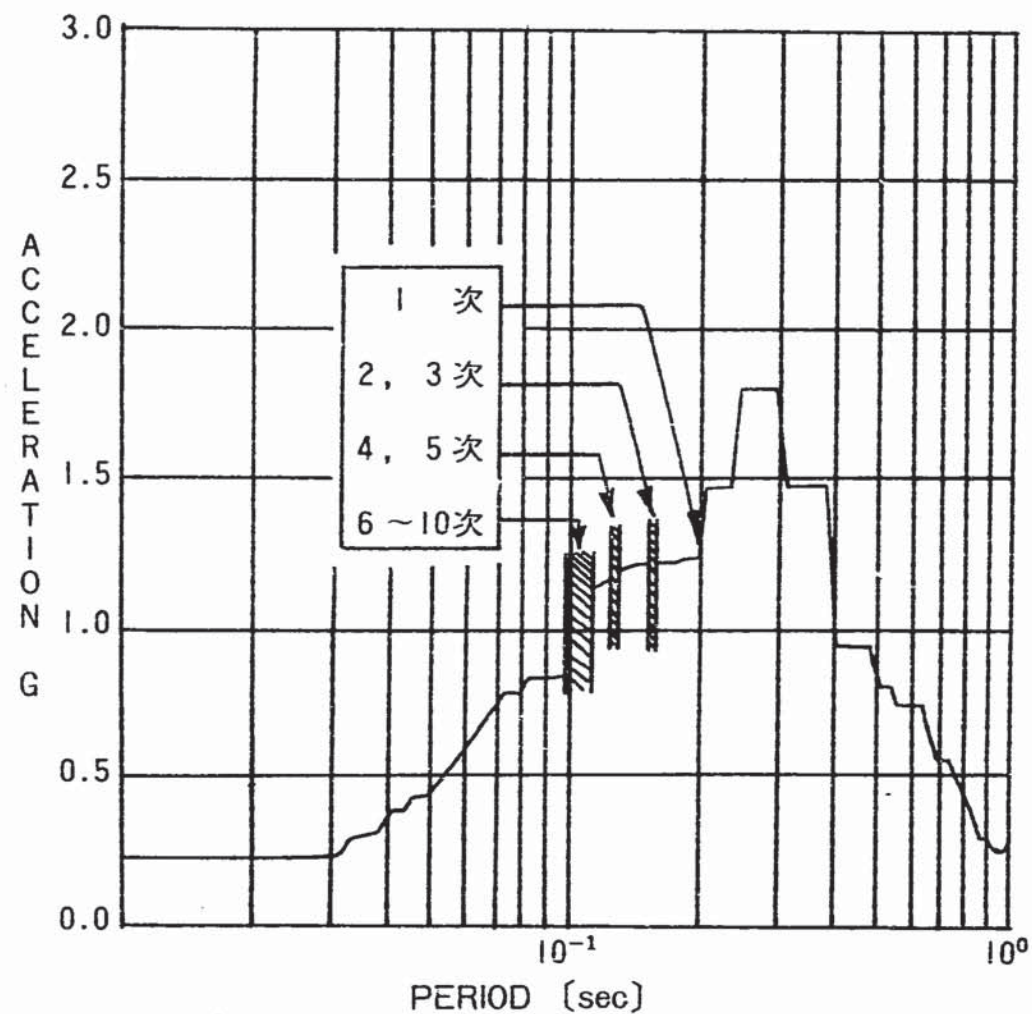


図 4.2.1 5 固有振動数と床応答曲線の関係

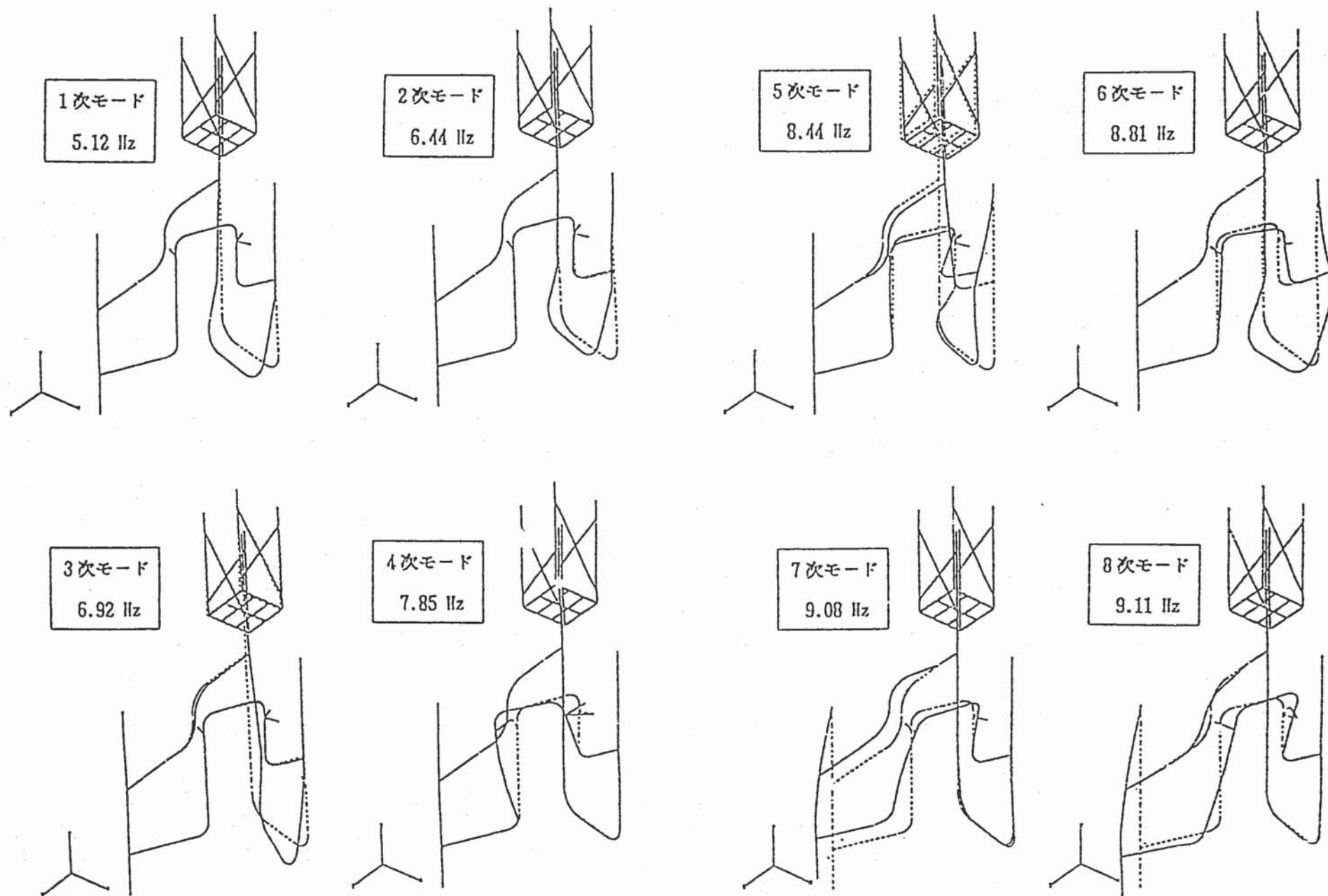


図 4.2.1 6 固有振動モード

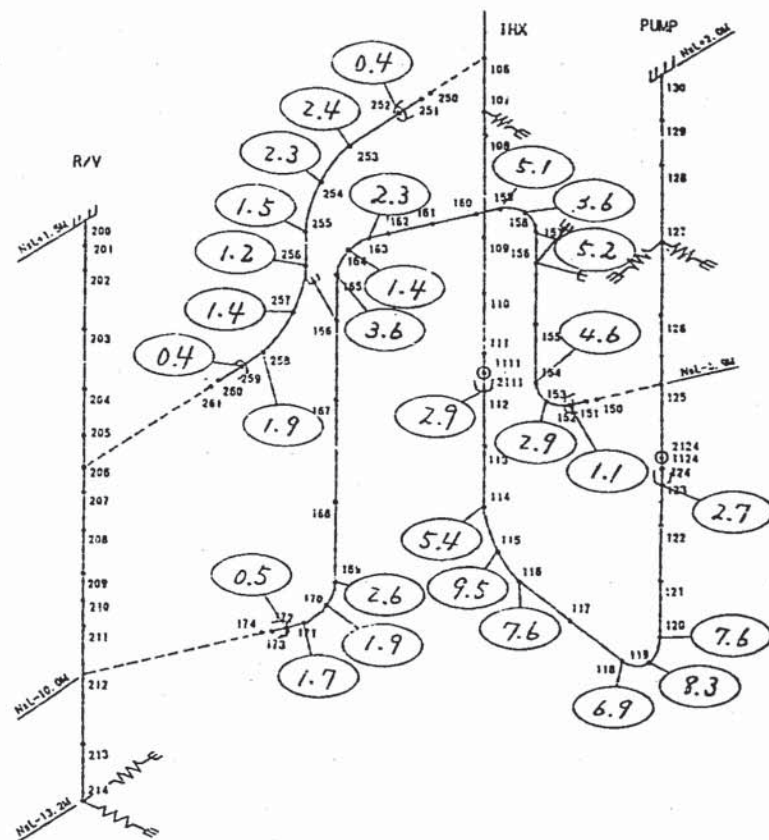
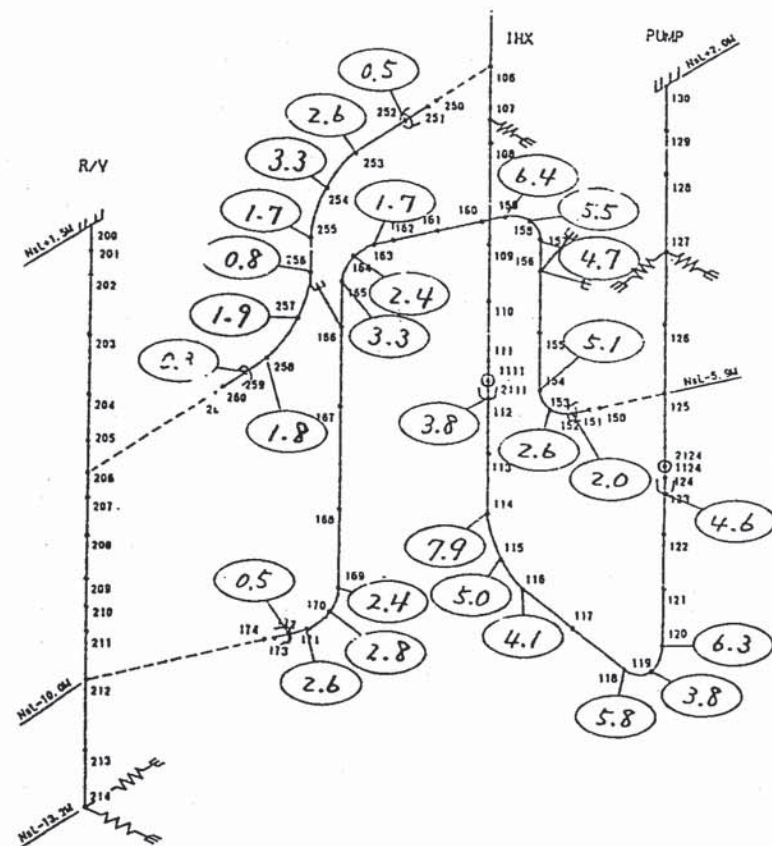


図 4.2.17 水平地震による応力 (S1)

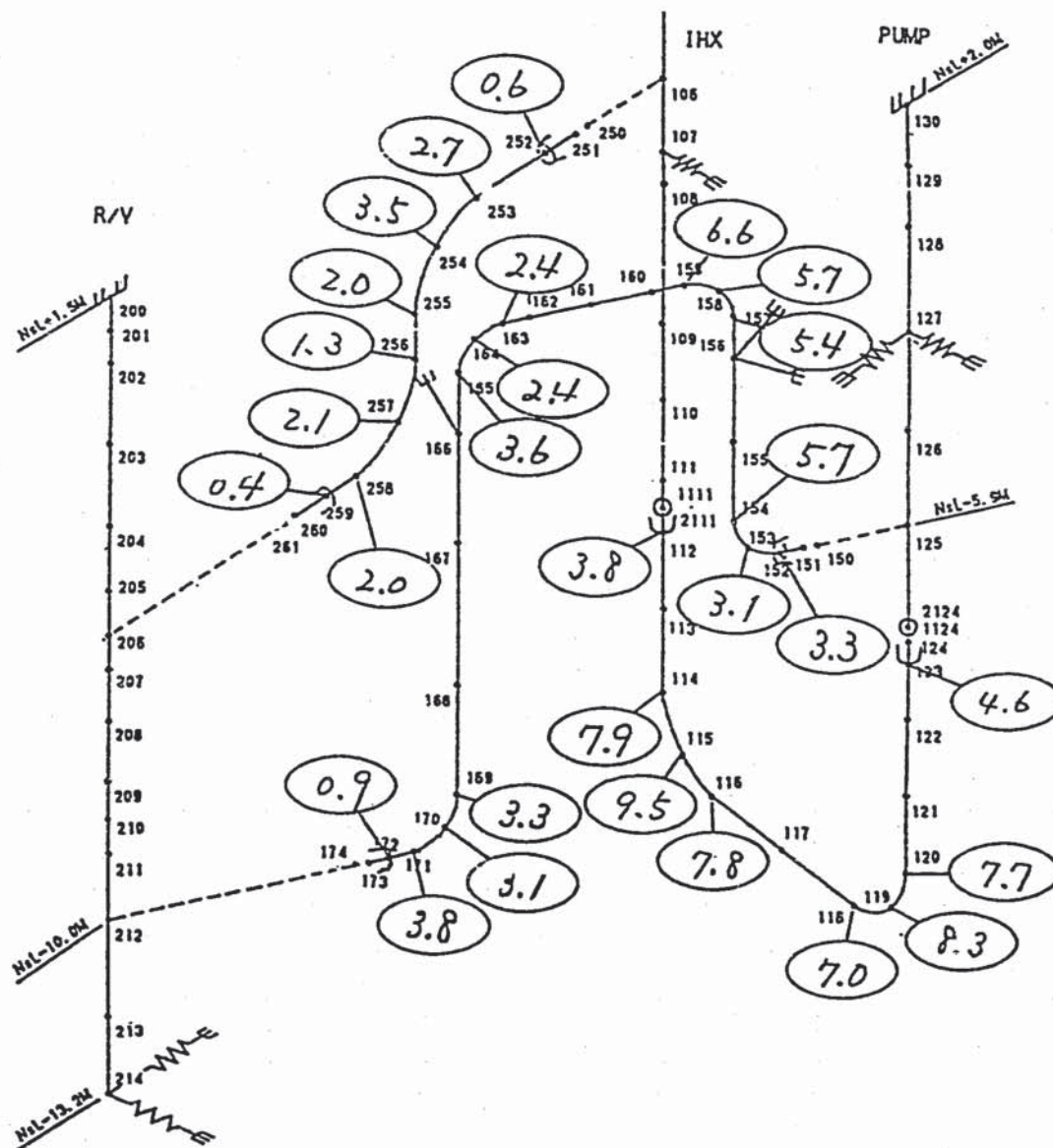


図 4.2.18 水平+鉛直地震による応力 (S1)

4.3 ノズルの健全性評価

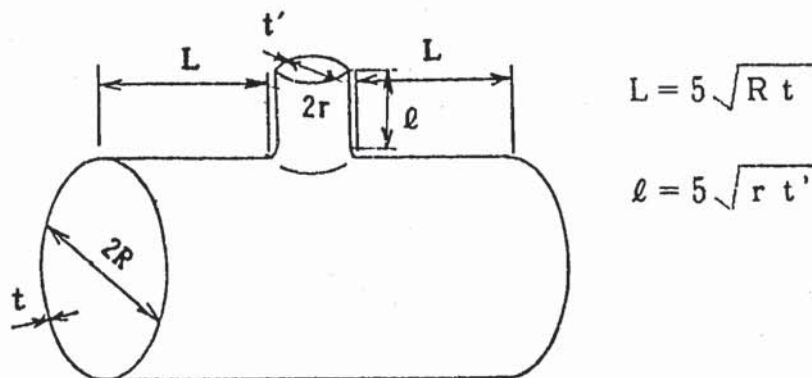
原子炉容器，中間熱交換器，ポンプのノズルについて温度，及び熱応力，機械荷重による応力解析，評価を実施し構造健全性の確認を行った。

4.3.1 熱膨張及び耐震解析モデル

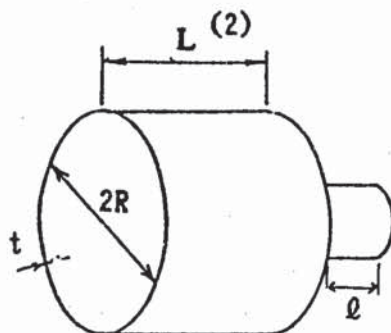
図 4.3.1 に示す R/V，IHX 及びポンプの出入口ノズル計 6 ノズルについて，配管反力に対する弾性応力解析を 3 次元シェル要素を用いて行った。

図 4.3.2 は各レグのノズル形状を示しているが，基本的には各レグのノズル形状は胴側の径及び厚さを除き同一とした。ホットレグ，コールドレグは容器胴部に取り付けられるノズルであり，ホットレグノズルにはサーマルライナを設けている。クロスオーバーレグのノズルは容器下部鏡に取り付けられるノズルである。

解析範囲として，原子炉容器出入口ノズル，中間熱交換器ノズル，ポンプ出口ノズルの様に，容器の胴部に接続されているものについては，以下の様に取り扱った。



また，中間熱交換器出口ノズル，ポンプ入口ノズルの様に鏡部で接続されているノズルについても，前述と同様に L と l を定めてモデル化した。ただし，L，l は，ノズルコーナーの不連続部より測った長さである。



また、両ノズルについても、形状がほぼ同一であることから、同一モデルにて解析を実施した。なお、評価は各ノズルに対して別々に配管反力を考慮し実施した。図 4.3.3 に解析モデル例を示す。

前章の「配管の地震：熱応力解析」で検討した結果より、配管からノズルに加わる力及びモーメントが各ノズルについて各ケース（内圧，自重， S_1 地震， S_2 地震，熱膨張）ごとに求まる。その結果をまとめたものを表 4.3.1 に示す。

3次元シェルによる解析では、まず、各方向、X、Y、Zの並進及び回転方向、計6成分にそれぞれ単位荷重として 10^3 kg 、 $10^6 \text{ kg}\cdot\text{mm}$ を負荷した。そして応力解析後に表に示す荷重に相当する係数を乗じた。

応力の評価点は図 4.3.4 に示すように、ホットレグノズルについてはセーフエンド端部及びクロッチ部の2点，他のノズルについてはクロッチ部とその近傍の2点とした。

4.3.2 熱膨張解析及び耐震解析

表 4.3.2～4.3.4 に熱膨張及び地震時の配管反力によって生じる各ノズルの応力強さを各成分（膜，曲げ，ピーク）に分類して示す。表中には過渡熱応力（極値）も比較のために併わせて示した。

表から、ホットレグノズル及びコールドレグノズルでは過渡熱応力の膜+曲げ成分が、クロスオーバーレグノズルでは地震による応力が、それぞれ支配的であることがわかる。ピーク応力成分は最も高いR/V入口ノズルで $7\sim 8 \text{ kg/mm}^2$ 程度である。

4.3.3 熱過渡解析モデル

R/V，IHX及びポンプの出入口ノズル計6ノズルについて軸対称モデル化して、非定常の熱伝導解析及び熱応力解析を行った。解析モデル図の例をそれぞれの境界条件と合わせて図 4.3.5 及び図 4.3.6 に示す。解析コードはFINASを用いた。

4.3.4 熱過渡解析

(1) 荷重条件

H/L配管に接続されるR/V出口ノズル，IHX入口ノズルの内表面に負荷される2種類の熱過渡条件（熱過渡(I)，熱過渡(II)）を図 2.10(1)に示す。またX/L，C/L配管に接続されるIHX出口ノズル，ポンプ出入口ノズル，R/V入口ノズルの内表面に負荷される2種類の熱過渡条件（熱過渡(I)，熱過渡(II)）を図 2.9(2)に示す。なお熱応力解析では熱伝導解析から求まる温度分布より求める。

(2) 解析結果

① 非定常熱伝導解析結果

各ノズルともテーパ部の前後及びノズルコーナー部（ただし，R/V出口，IHX入口ノズルはYピース部を含める）を評価箇所として，熱応力を解析する際の時刻を判断した。各ノズルの評価箇所の例を図 4.3.7 及び図 4.3.8 に示す。

各ノズルの評価箇所での内外面、中央部での温度履歴の代表例を図 4.3.9 及び図 4.3.10 に示す。ここでは熱過渡の厳しい熱過渡(II)について内外面の温度差が顕著となる代表的なものを示している。

(2) 非定常熱応力解析

内外面では最大温度差が発生する時刻近傍で熱応力解析を実施した。解析結果の例を図 4.3.11 及び図 4.3.12 に示す。これらの結果から顕著な発生応力を示すのは、いずれも Y ピース部とノズルコーナー部であることがわかった。

4.3.5 総合評価

検討条件とした温度条件、熱過渡条件、床応答曲線等に基づいて、1 次主冷却系配管の全てのノズル応力解析を行い、設定した荷重ヒストグラムを用いて B D S による健全性評価を行った。

表 4.3.5 ～表 4.3.10 に各ノズルについての評価結果(総合応力評価表)をまとめて示すが、いずれの配管も 1 次応力、1 次及び 2 次応力、(クリープ)疲労損傷の制限を満足しており、設計の成立性に対する見通しが得られた。

表 4.3.1 各ノズルの反力条件

単位 F : kg, M : kg-mm
モーメントは右まわりを(+)とする。

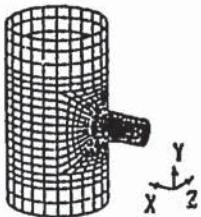
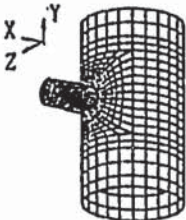
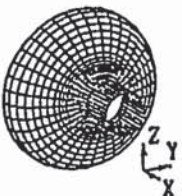
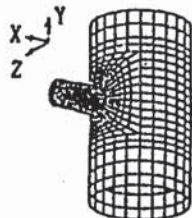
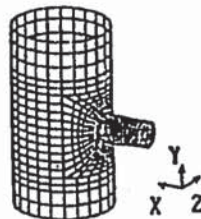
		自 重	熱 膨 張	S ₁ 地震	S ₁ 地震	S ₂ 地震	S ₂ 地震
	RV 出口ノズル						
	F _X	8.6×10^1	3.4×10^4	3.1×10^3	5.7×10^3	S ₁ *1.5	S ₁ *1.5
	F _Y	-4.0×10^3	-3.5×10^4	2.8×10^3	4.4×10^3		
	F _Z	-2.1	1.2×10^3	3.6×10^3	2.0×10^3		
	M _X	3.3×10^3	3.1×10^6	4.4×10^6	3.1×10^6		
	M _Y	-5.2×10^3	1.2×10^6	1.8×10^6	1.1×10^6		
	M _Z	5.3×10^6	3.2×10^7	3.6×10^6	7.3×10^6		
	IHX 入口ノズル						
	F _X	-8.6×10^1	-3.4×10^4	2.6×10^3	5.8×10^3	"	"
	F _Y	-4.8×10^3	3.5×10^4	4.5×10^3	7.5×10^3		
	F _Z	2.1	-1.2×10^3	3.4×10^3	1.8×10^3		
	M _X	-1.1×10^4	1.4×10^6	4.3×10^6	2.1×10^6		
	M _Y	-8.1×10^3	6.3×10^6	4.6×10^6	3.7×10^6		
	M _Z	-9.6×10^6	6.2×10^7	7.1×10^6	1.3×10^7		
	IHX 出口ノズル						
	F _X	6.6×10^3	6.0×10^3	1.1×10^4	4.6×10^3	"	"
	F _Y	8.6×10^1	3.1×10^4	1.6×10^4	2.6×10^4		
	F _Z	-4.7×10^2	1.4×10^4	2.5×10^4	9.2×10^3		
	M _X	-8.7×10^4	1.1×10^8	2.7×10^7	2.0×10^7		
	M _Y	2.9×10^5	-1.3×10^7	6.5×10^7	3.0×10^7		
	M _Z	-1.2×10^4	6.0×10^7	5.8×10^7	9.6×10^7		
	PUMP 入口ノズル						
	F _X	-8.8×10^3	-6.0×10^3	1.2×10^4	5.3×10^3	"	"
	F _Y	-8.6×10^1	-3.1×10^4	1.2×10^4	2.4×10^4		
	F _Z	-4.7×10^2	1.4×10^4	1.7×10^4	6.9×10^3		
	M _X	8.0×10^4	-9.5×10^7	1.9×10^7	1.2×10^7		
	M _Y	-8.4×10^5	6.9×10^7	5.5×10^7	2.8×10^7		
	M _Z	7.8×10^4	1.0×10^8	5.4×10^7	1.2×10^8		
	PUMP 出口ノズル						
	F _X	-8.2×10^2	-6.6×10^3	1.2×10^3	1.9×10^3	"	"
	F _Y	-6.7×10^3	-4.1×10^3	2.7×10^3	3.8×10^3		
	F _Z	8.7×10^1	-2.4×10^2	1.3×10^3	7.5×10^2		
	M _X	3.6×10^5	-8.4×10^5	2.6×10^6	7.7×10^5		
	M _Y	4.7×10^4	2.1×10^5	6.6×10^5	5.9×10^5		
	M _Z	-5.0×10^6	6.5×10^6	2.1×10^6	3.3×10^6		
	RV 入口ノズル						
	F _X	3.9×10^2	9.2×10^2	5.3×10^3	5.6×10^3	"	"
	F _Y	-9.3×10^3	4.1×10^3	4.3×10^3	5.2×10^3		
	F _Z	-1.3×10^2	2.0×10^2	3.1×10^3	3.4×10^3		
	M _X	-9.7×10^5	1.4×10^6	1.3×10^6	1.1×10^6		
	M _Y	5.7×10^4	-4.5×10^4	2.7×10^6	2.9×10^6		
	M _Z	9.6×10^6	-1.4×10^7	4.1×10^6	4.9×10^6		

表 4.3.2 各荷重に対する発生応力強さ (H/L)

R/V OUTLET NOZZLE

(kg/mm²)

	評価断面 -11				評価断面 -12			
	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外
熱 過 渡 I	8.73	7.23	0.88	0.65	0.43	10.05	4.08	3.05
熱 膨 張	0.86	0.21	—	—	2.30	4.26	—	—
地 震 (S ₁)	0.24	0.07	—	—	0.57	2.62	—	—

IHX INLET NOZZLE

(kg/mm²)

	評価断面 -11				評価断面 -12			
	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外
熱 過 渡 I	9.24	8.11	0.87	0.78	2.88	12.87	4.29	3.48
熱 膨 張	1.30	0.27	—	—	2.22	3.45	—	—
地 震 (S ₁)	1.00	0.32	—	—	1.61	2.55	—	—

表 4.3.3 各荷重に対する発生応力強さ (X/L)

IHX OUTLET NOZZLE

(kg/mm²)

	評価断面 - 11				評価断面 - 12			
	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外
熱 過 渡 I	0.38	15.69	3.00	2.29	0.94	13.44	5.60	4.32
熱 膨 張	4.92	7.28	—	—	3.41	5.67	—	—
地 震 (S ₁)	16.72	24.90	—	—	11.39	19.54	—	—

PUMP INLET NOZZLE

(kg/mm²)

	評価断面 - 11				評価断面 - 12			
	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外
熱 過 渡 I	0.38	15.69	3.00	2.29	0.94	13.44	5.60	4.32
熱 膨 張	5.17	7.69	—	—	3.44	5.99	—	—
地 震 (S ₁)	19.81	29.49	—	—	13.44	23.07	—	—

表 4.3.4 各荷重に対する発生応力強さ (C/L)

PUMP OUTLET NOZZLE

(kg/mm²)

	評価断面 -11				評価断面 -12			
	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外
熱 過 渡 I	1.56	16.09	1.50	0.96	0.18	12.46	4.73	3.80
熱 膨 張	0.36	0.51	—	—	0.19	0.29	—	—
地 震 (S ₁)	1.27	1.56	—	—	0.85	1.06	—	—

R/V INLET NOZZLE

(kg/mm²)

	評価断面 -11				評価断面 -12			
	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外	膜	曲 げ	ピーク内	ピーク外
熱 過 渡 I	1.03	16.93	1.49	0.94	2.03	15.49	7.46	6.57
熱 膨 張	1.82	3.70	—	—	0.78	1.29	—	—
地 震 (S ₁)	2.60	5.56	—	—	0.71	2.21	—	—

表 4.3.5 総合評価表(原子炉容器出口ノズル)

単位(応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限								クリープ疲労損傷の制限			
			一次＋二次応力の制限				Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Ⅳに関する制限				
			S_n^* ($3S_{mH}$)	S_n ($3\overline{S_m}$)	S_n ($\beta_s 3\overline{S_m}$)	$S_{n'}$ ($3\overline{S_m}$)	$P'+Q'$ (Sa)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$ (0.02)	S_n^* ($\beta_s 3S_{mH}$)	領域 (E, P, S_1, S_2)	Df	Dc	Df+Dc (D)
11-内面	合格	B	0.5 (30.0)	17.7 (26.2)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0001 (0.010)	0.0001 (0.020)	0.7 (75.0)	E	0.00	0.31	0.31 (0.60)
11-外面	合格	B	0.7 (30.0)	6.8 (22.1)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0001 (0.010)	0.0001 (0.020)	1.0 (75.0)	E	0.00	0.31	0.31 (0.60)
12-内面	合格	B	6.0 (30.0)	21.9 (26.2)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0001 (0.010)	0.0001 (0.020)	8.9 (75.0)	E	0.00	0.31	0.31 (0.60)
12-外面	合格	B	5.3 (30.0)	22.5 (26.2)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0001 (0.010)	0.0001 (0.020)	14.3 (75.0)	S_1	0.00	0.31	0.31 (0.60)

注記(1) ()内の値は、許容値又は判定値を示す。

(2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。

A: 一般規定の場合

B: 長期一次応力が低い場合

C: クリープ効果が顕著でない場合

(3) $P'+Q' = \langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$

表 4.3.6 総合評価表(中間熱交換器入口ノズル)

単位(応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限								クリープ疲労損傷の制限			
			一次＋二次応力の制限				Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Ⅳに関する制限				
			S^*n ($3S_{mH}$)	$S n$ ($3\overline{S m}$)	$S n$ ($\beta_s 3\overline{S m}$)	$S n'$ ($3\overline{S m}$)	$P'+Q'$ ($S a$)	$\epsilon_{EC}+\epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC}+\epsilon_{mEF}+\epsilon_{bEF}$ (0.02)	S^+n ($\beta_s 3S_{mH}$)	領域 (E, P, S_1, S_2)	Df	Dc	Df+Dc (D)
11-内面	合格	B	1.3 (30.0)	18.5 (22.6)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0001 (0.010)	0.0001 (0.020)	2.1 (75.0)	E	0.00	0.31	0.31 (0.60)
11-外面	合格	B	2.1 (30.0)	20.7 (22.2)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0001 (0.010)	0.0001 (0.020)	3.1 (75.0)	E	0.00	0.31	0.31 (0.60)
12-内面	合格	B	6.2 (30.0)	22.1 (26.2)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0002 (0.010)	0.0002 (0.020)	9.3 (75.0)	E	0.00	0.31	0.31 (0.60)
12-外面	合格	B	7.6 (30.0)	23.5 (26.2)	— (—)	— (—)	— (—)	0.0002 (0.010)	0.0002 (0.020)	19.8 (75.0)	S_2	0.00	0.31	0.31 (0.60)

注記(1) ()内の値は、許容値又は判定値を示す。

(2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。

A: 一般規定の場合

B: 長期一次応力が低い場合

C: クリープ効果が顕著でない場合

(3) $P' + Q' = \langle P + P^*_L + (P_b + P^*_b) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$

表 4.3.7 総合評価表 (中間熱交換器出口ノズル)

単位 (応力: kg/mm^2)

評 価 点	一次応力の制限	評価法の区分	ひ ず む の 制 限									ク リ ー プ 疲 労 損 傷 の 制 限		
			一次 + 二次 応 力 の 制 限				S a 制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Ⅳに関する制限				
			S [*] n (3 S _{mH})	S n (3 S _m)	S n (β _s 3 S _m)	S n' (3 S _m)	P'+Q' (S _a)	ε _{EC} +ε _{mEF} (0.01)	ε _{EC} +ε _{mEF} +ε _{bEF} (0.02)	S [*] n (β _s 3 S _{mH})	領 域 (E, P, S ₁ , S ₂)	D f	D c	D f + D c (D)
11-内面	合格	C	28.1 (33.6)	— (—)	73.4 (83.0)	16.8 (33.2)	— (—)	— (—)	— (—)	42.2 (84.1)	P ₁	0.04	0.10	0.15 (0.86)
11-外面	合格	C	27.3 (33.6)	— (—)	65.8 (84.5)	12.5 (33.9)	— (—)	— (—)	— (—)	41.0 (84.1)	P	0.02	0.10	0.13 (0.86)
12-内面	合格	C	22.0 (33.6)	— (—)	58.5 (83.0)	14.0 (33.2)	— (—)	— (—)	— (—)	33.0 (84.1)	S ₂	0.01	0.10	0.12 (0.86)
12-外面	合格	C	16.5 (33.6)	— (—)	49.1 (85.5)	8.3 (33.7)	— (—)	— (—)	— (—)	24.8 (84.1)	S ₂	0.00	0.10	0.11 (0.86)

注記(1) ()内の値は、許容値又は判定値を示す。

(2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。

A : 一般規定の場合

B : 長期一次応力が低い場合

C : クリープ効果が顕著でない場合

(3) $P' + Q' = \langle P_L + P^*_{\text{L}} + (P_b + P^*_{\text{b}}) / K t \rangle \max + \langle Q + Q^* \rangle_{\text{R}}$

表 4.3.8 総合評価表 (ポンプ入口ノズル)

単位 (応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限								クリープ疲労損傷の制限			
			一次＋二次応力の制限				Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Ⅳに関する制限				
			S_n^* ($3S_{mH}$)	S_n ($3\overline{S_m}$)	S_n ($\beta_s 3\overline{S_m}$)	S_n' ($3\overline{S_m}$)	$P'+Q'$ (S_a)	$\epsilon_{EC}+\epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC}+\epsilon_{mEF}+\epsilon_{bEF}$ (0.02)	S_n^* ($\beta_s 3S_{mH}$)	領域 (E, P) (S_1, S_2)	Df	Dc	Df+Dc (D)
11-内面	合格	C	33.3 (33.6)	— (—)	76.1 (83.0)	19.3 (33.2)	— (—)	— (—)	— (—)	50.0 (84.1)	P	0.04	0.10	0.15 (0.86)
11-外面	合格	C	32.4 (33.6)	— (—)	68.1 (84.5)	18.0 (33.8)	— (—)	— (—)	— (—)	48.5 (84.1)	P	0.02	0.10	0.13 (0.86)
12-内面	合格	C	26.2 (33.6)	— (—)	60.3 (83.0)	15.9 (33.2)	— (—)	— (—)	— (—)	39.2 (84.1)	P	0.01	0.10	0.12 (0.86)
12-外面	合格	C	19.5 (33.6)	— (—)	49.1 (85.5)	8.0 (33.7)	— (—)	— (—)	— (—)	29.3 (84.1)	S ₂	0.00	0.10	0.11 (0.86)

注記(1) ()内の値は、許容値又は判定値を示す。

(2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。

A: 一般規定の場合

B: 長期一次応力が低い場合

C: クリープ効果が顕著でない場合

(3) $P' + Q' = \langle P_L + P^*_{L} + (P_b + P^*_{b}) / K_t \rangle \max + \langle Q + Q^* \rangle_R$

表 4.3.9 総合評価表 (ポンプ出口ノズル)

単位: (応力 kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限								クリープ疲労損傷の制限			
			一次＋二次応力の制限				Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Ⅳに関する制限				
			S^*n ($3S_{FIH}$)	S_n ($3\overline{S_m}$)	S_n ($\beta_s 3\overline{S_m}$)	S_n' ($3\overline{S_m}$)	$P'+Q'$ (S_a)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$ (0.02)	S^*n ($\beta_s 3S_{mH}$)	領域 (E, P, S_1, S_2)	Df	Dc	Df+Dc (D)
11-内面	合格	C	4.3 (33.6)	— (—)	44.8 (83.5)	5.3 (33.4)	— (—)	— (—)	— (—)	6.3 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)
11-外面	合格	C	3.8 (33.6)	— (—)	44.1 (83.6)	5.3 (33.4)	— (—)	— (—)	— (—)	5.7 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)
12-内面	合格	C	2.3 (33.6)	33.1 (33.5)	— (—)	— (—)	— (—)	— (—)	— (—)	3.4 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)
12-外面	合格	C	3.0 (33.6)	— (—)	34.1 (84.7)	2.0 (33.9)	— (—)	— (—)	— (—)	4.5 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)

注記(1) ()内の値は、許容値又は判定値を示す。

(2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。

A: 一般規定の場合

B: 長期一次応力が低い場合

C: クリープ効果が顕著でない場合

(3) $P' + Q' = \langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$

表 4.3.1 0 総合評価表 (原子炉容器入口ノズル)

単位 (応力: kg/mm^2)

評価点	一次応力の制限	評価法の区分	ひずみの制限								クリープ疲労損傷の制限			
			一次＋二次応力の制限				Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態Ⅳに関する制限				
			S^*n ($3S_{mH}$)	S_n ($3\overline{S_m}$)	S_n ($\beta_s 3\overline{S_m}$)	S_n' ($3\overline{S_m}$)	$P'+Q'$ (Sa)	$\epsilon_{EC}+\epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC}+\epsilon_{mEF}+\epsilon_{bEF}$ (0.02)	S^*n ($\beta_s 3S_{mH}$)	領域 (E, P, S_1, S_2)	Df	Dc	Df+Dc (D)
11-内面	合格	C	2.4 (33.6)	— (—)	44.1 (83.5)	6.8 (32.6)	— (—)	— (—)	— (—)	3.6 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)
11-外面	合格	C	1.9 (33.6)	— (—)	43.8 (83.6)	6.8 (33.1)	— (—)	— (—)	— (—)	2.9 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)
12-内面	合格	C	1.6 (33.6)	— (—)	44.1 (84.0)	4.5 (33.6)	— (—)	— (—)	— (—)	2.4 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)
12-外面	合格	C	2.0 (33.6)	— (—)	35.3 (85.6)	4.5 (34.2)	— (—)	— (—)	— (—)	3.0 (84.1)	E	0.00	0.10	0.11 (0.86)

注記(1) () 内の値は、許容値又は判定値を示す。

(2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。

A: 一般規定の場合

B: 長期一次応力が低い場合

C: クリープ効果が顕著でない場合

(3) $P' + Q' = \langle P_L + P^*_L + (P_b + P^*_b) / K_t \rangle_{\max} + \langle Q + Q^* \rangle_R$

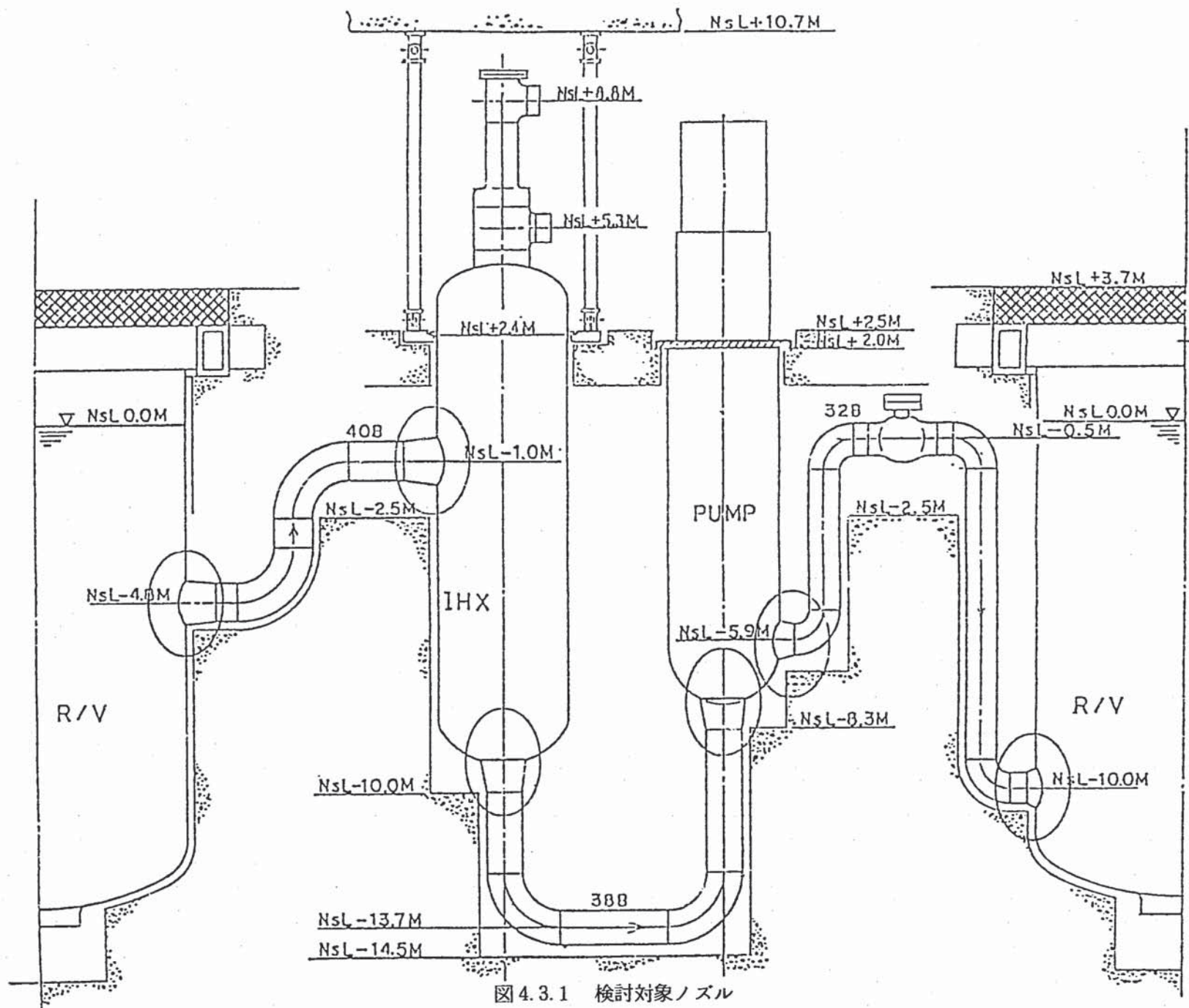


図 4.3.1 検討対象ノズル

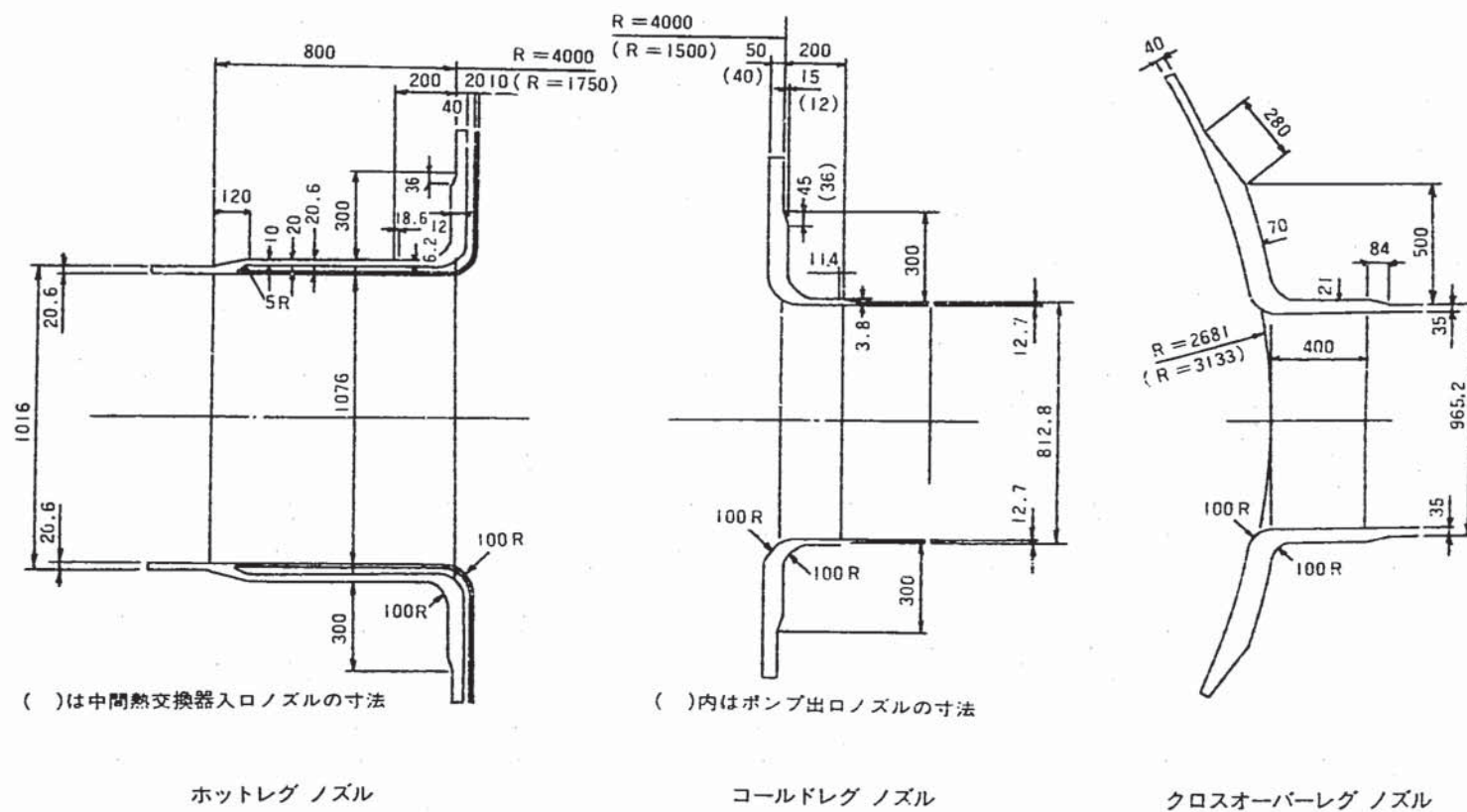


図 4.3.2 ノズル形状

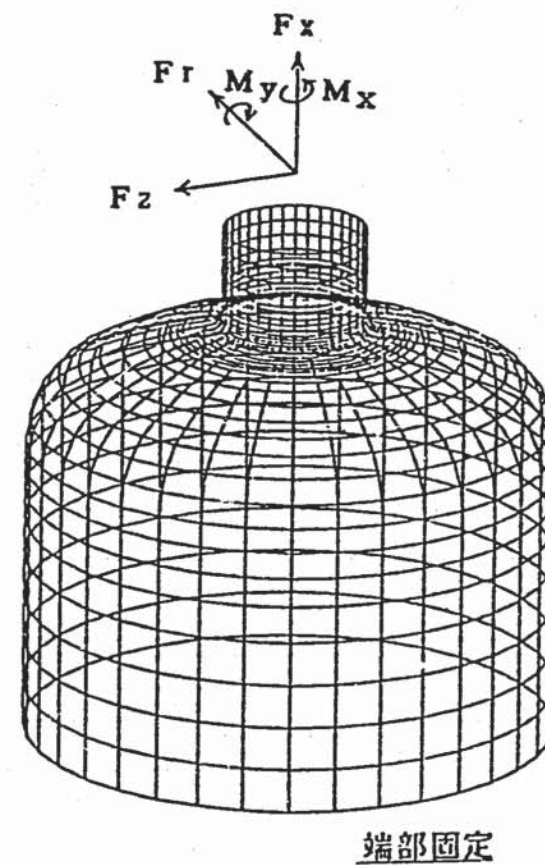
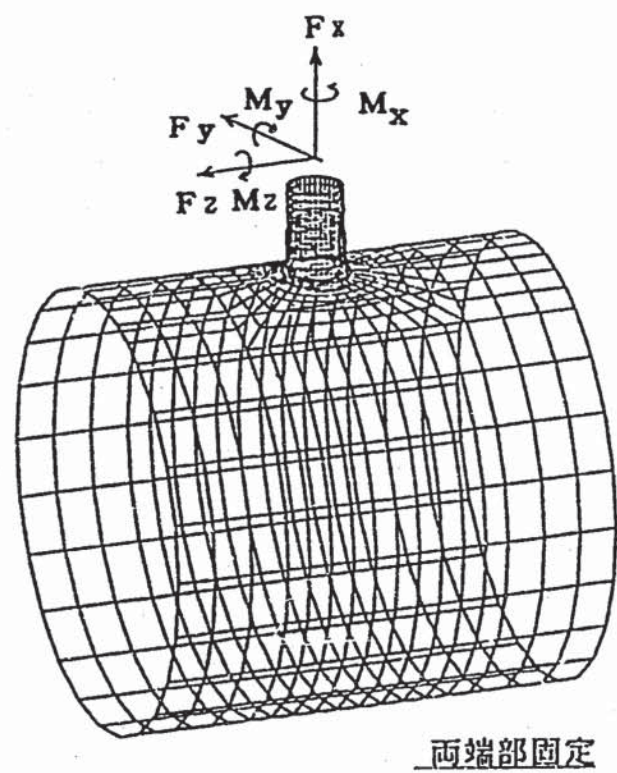


図 4.3.3 シェル解析モデル

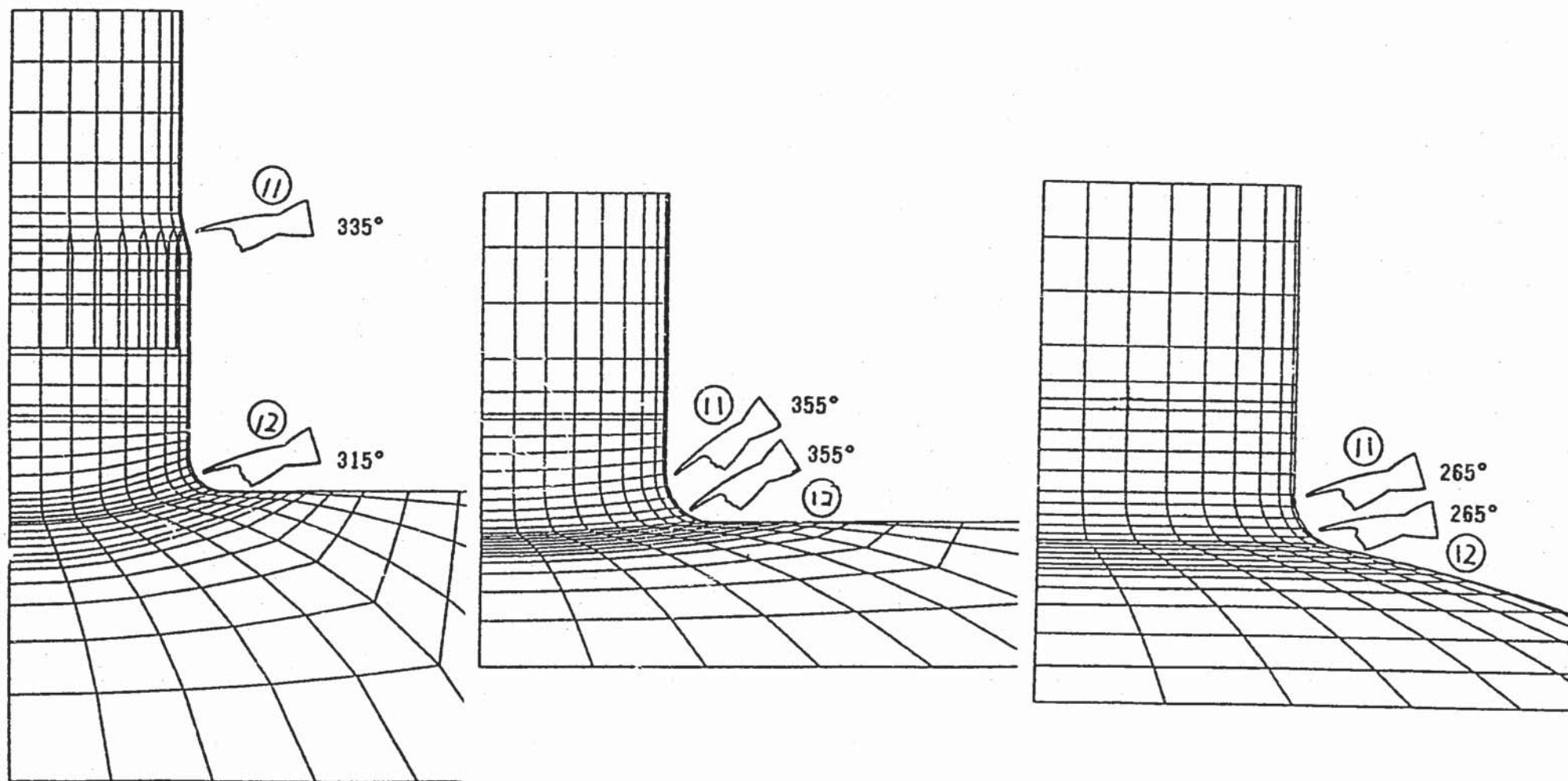


図 4.3.4 ノズルの応力評価点

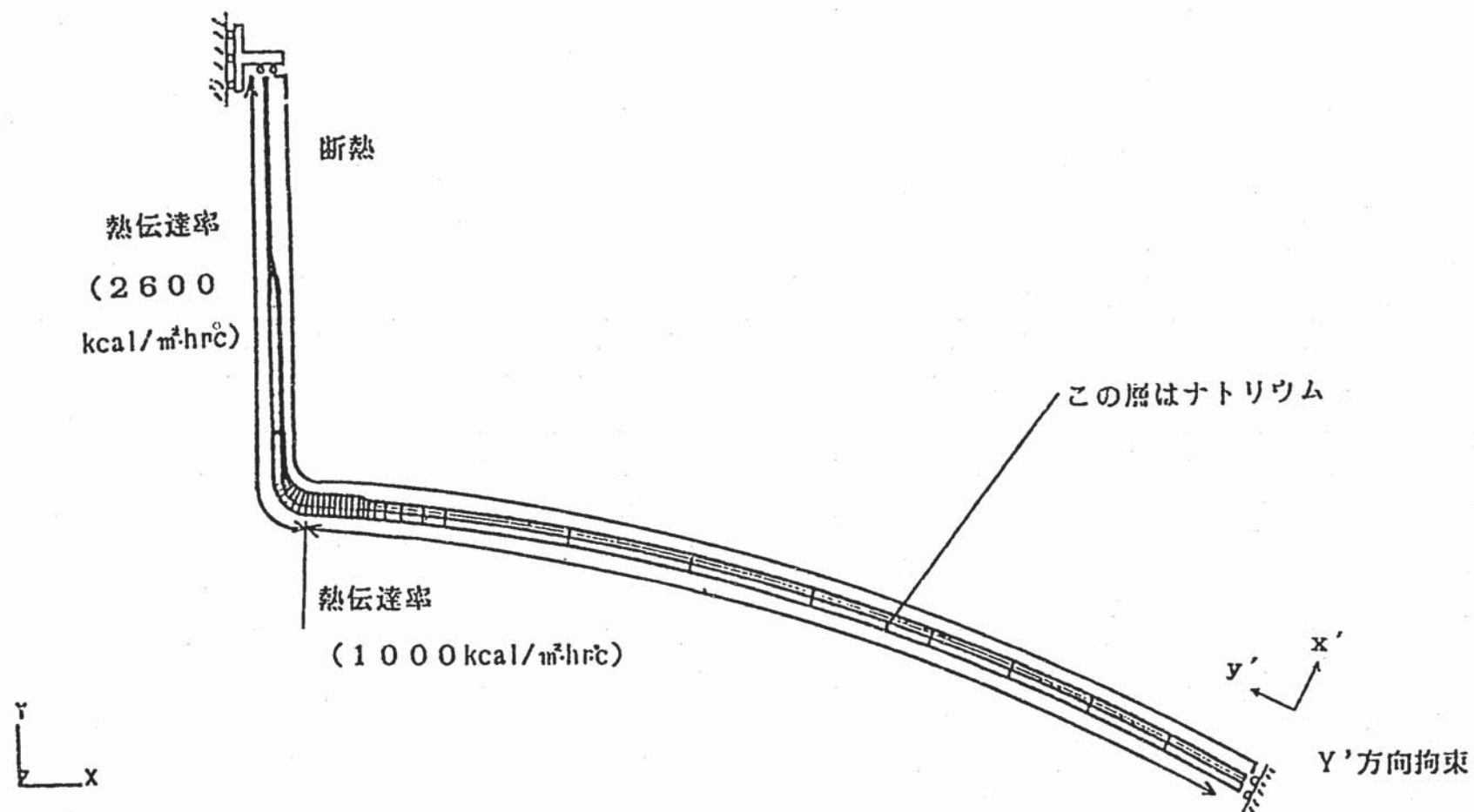


図 4.3.5 原子炉容器出口ノズルの解析モデル及び境界条件

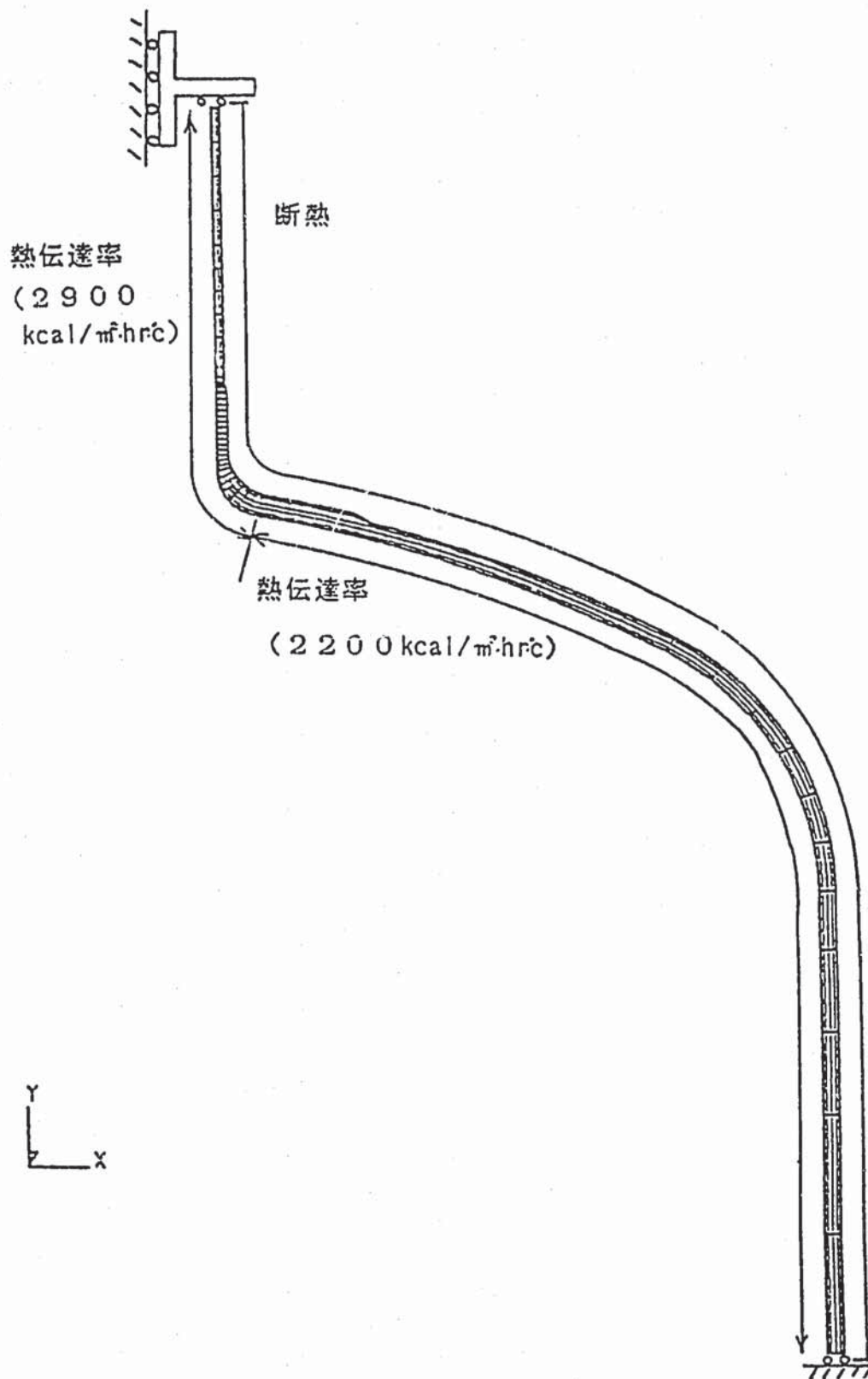


図 4.3.6 中間熱交換器出口ノズルの解析モデル及び境界条件

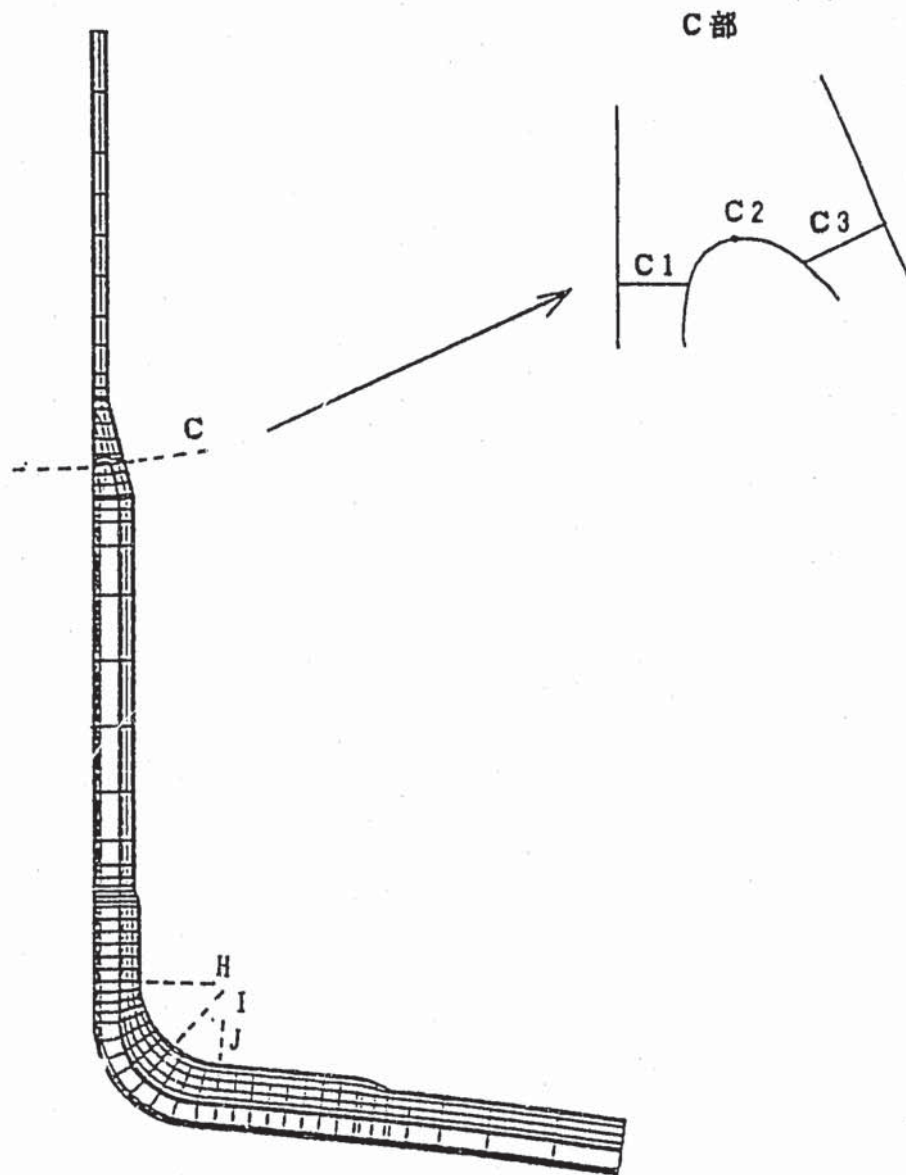


図 4.3.7 原子炉容器出口ノズルの熱伝導解析及び熱応力解析評価箇所

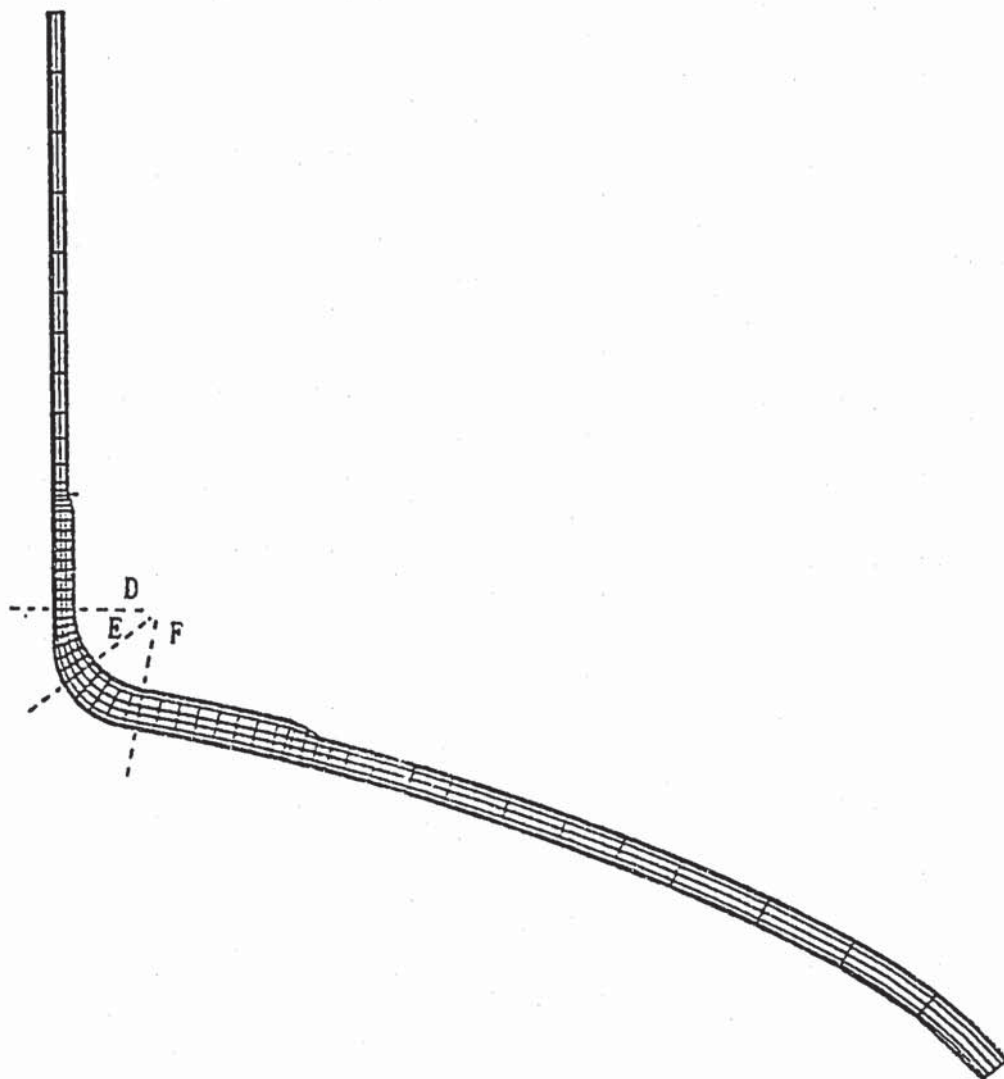


図 4.3.8 中間熱交換器出口ノズル，ポンプ入口ノズルの熱伝導解析及び熱応力解析評価箇所

CONTOUR VALUES

1	1.400000
2	3.900000
3	6.400000
4	8.900000
5	11.40000
6	13.90000
7	16.40000
8	18.90000
9	21.40000
10	23.90000

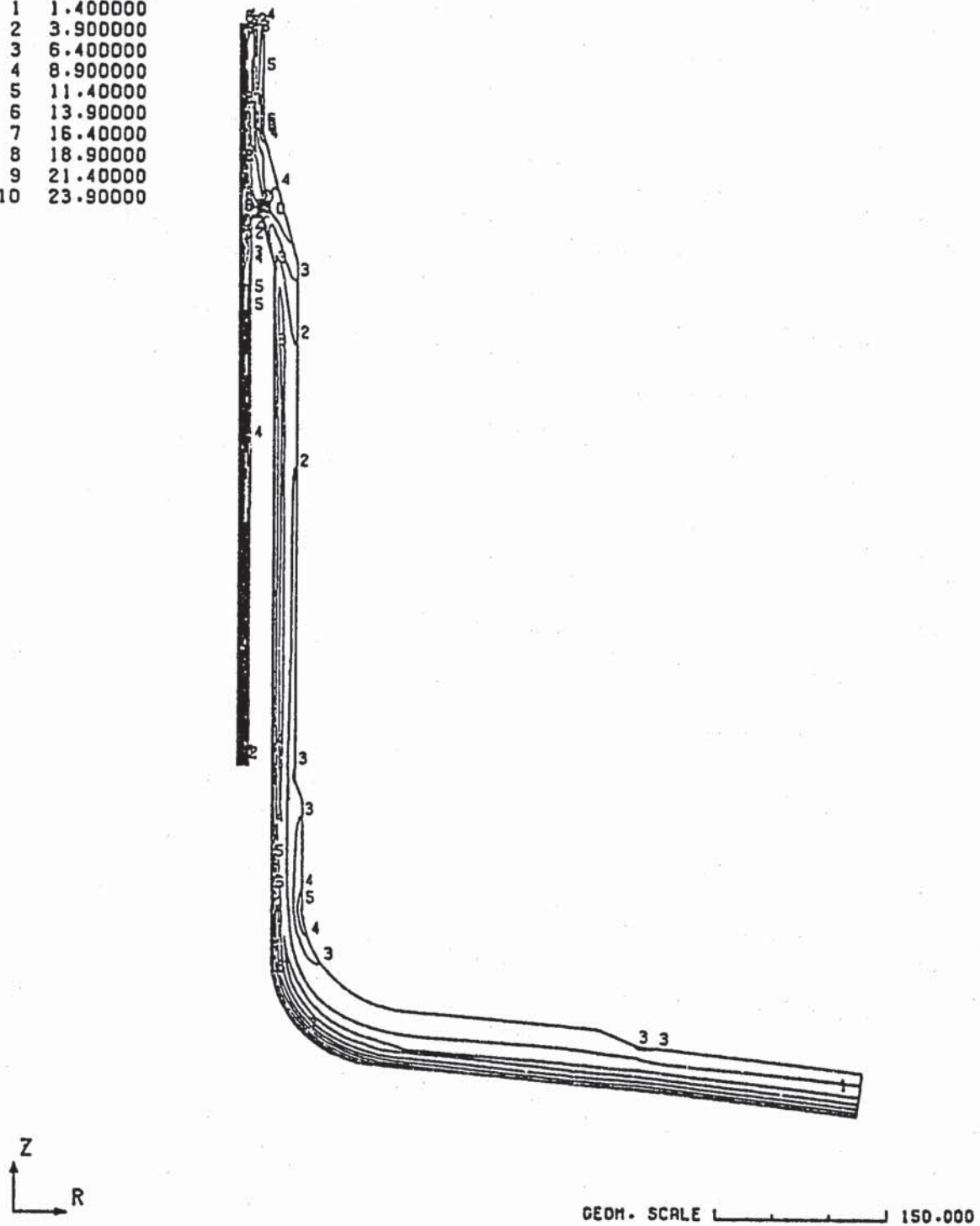
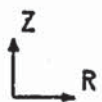
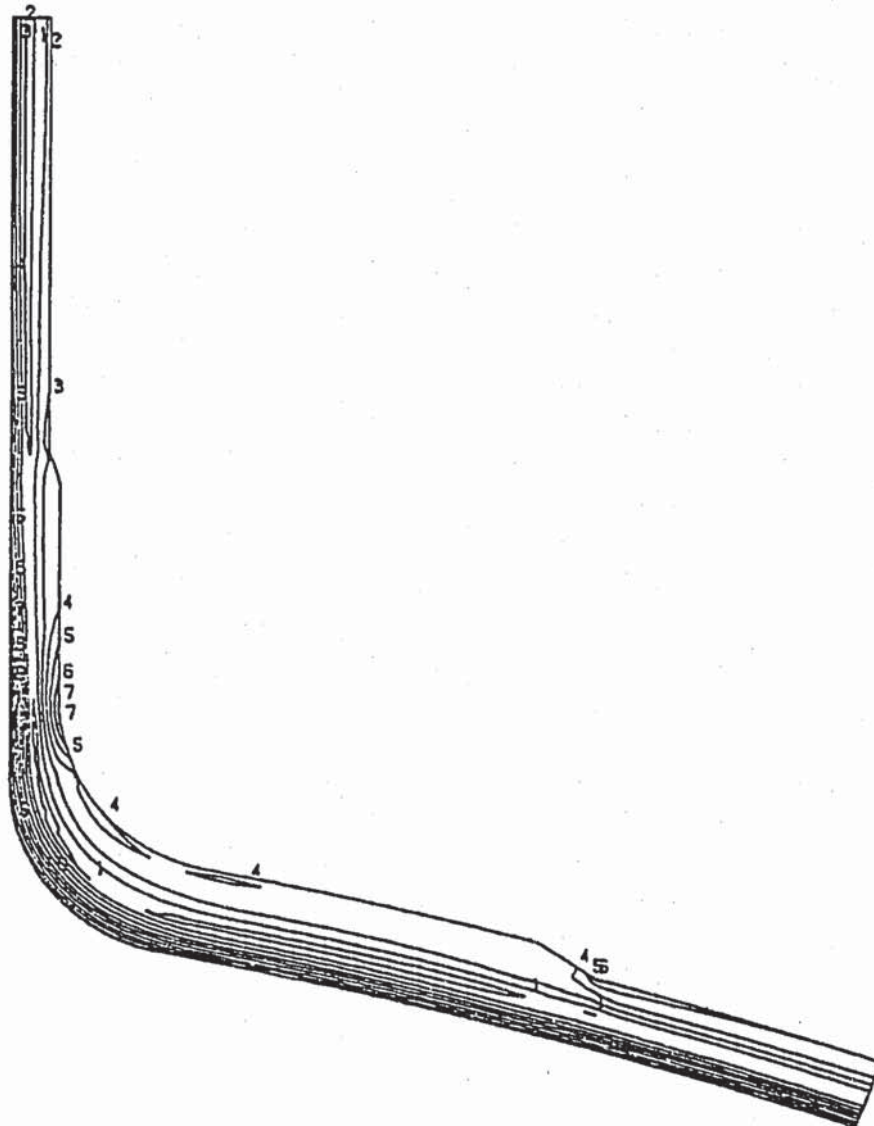


図 4.3.9 原子炉容器出口ノズルの熱過渡(II)による応力コンタ(トレスカ) $t=90\text{sec}$

CONTOUR VALUES

1	2.300000
2	5.800000
3	9.300000
4	12.80000
5	16.30000
6	19.80000
7	23.30000
8	26.80000
9	30.30000
10	33.80000



GEOM. SCALE 100.000

図 4.3.1 0 中間熱交換器出口ノズルの熱過渡(II)による応力コンタ(トレスカ) $t=800\text{sec}$

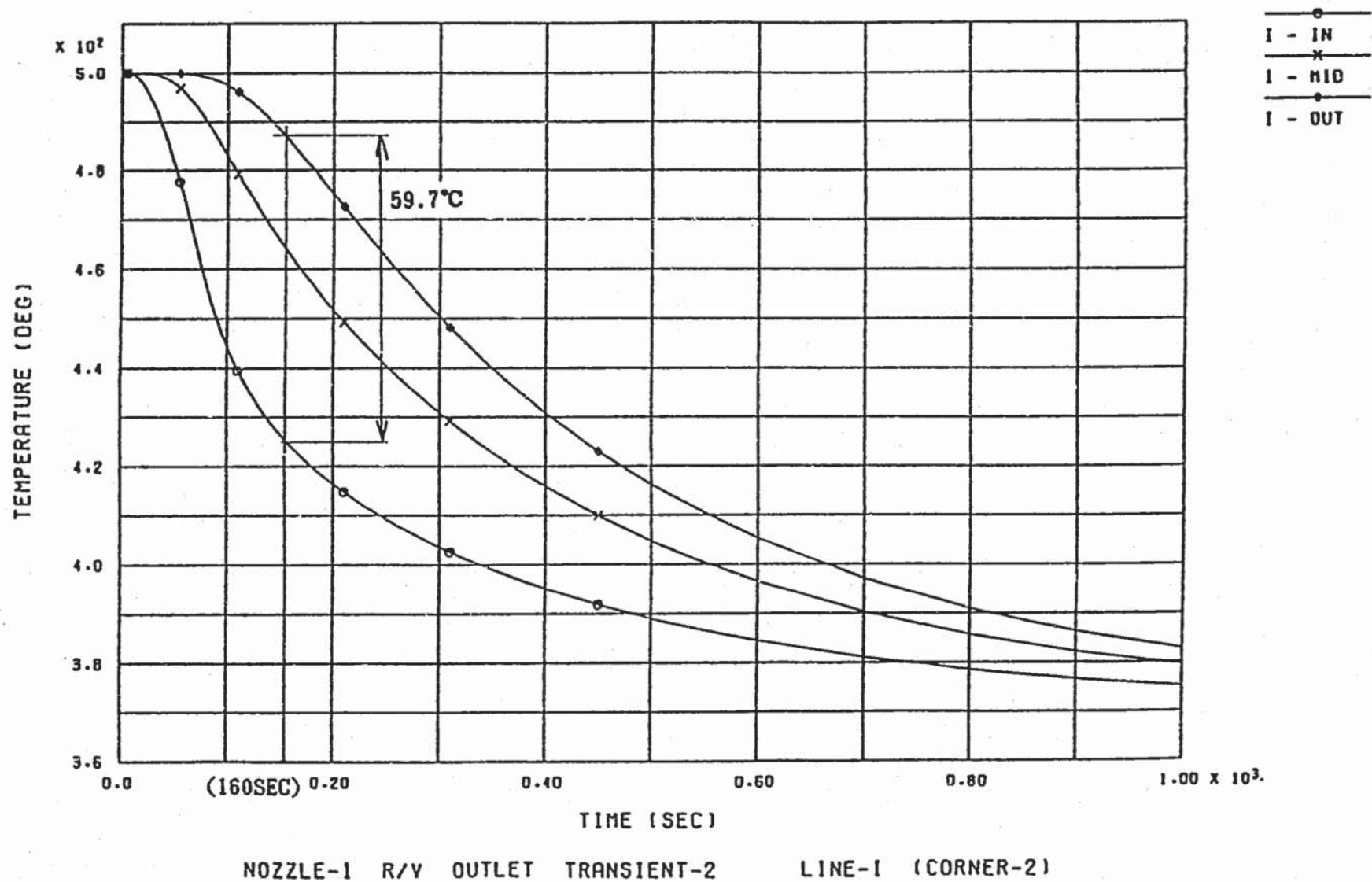


図 4.3.1 1 原子炉容器出口ノズルの評価ライン I での温度履歴 (熱過渡(Ⅲ))

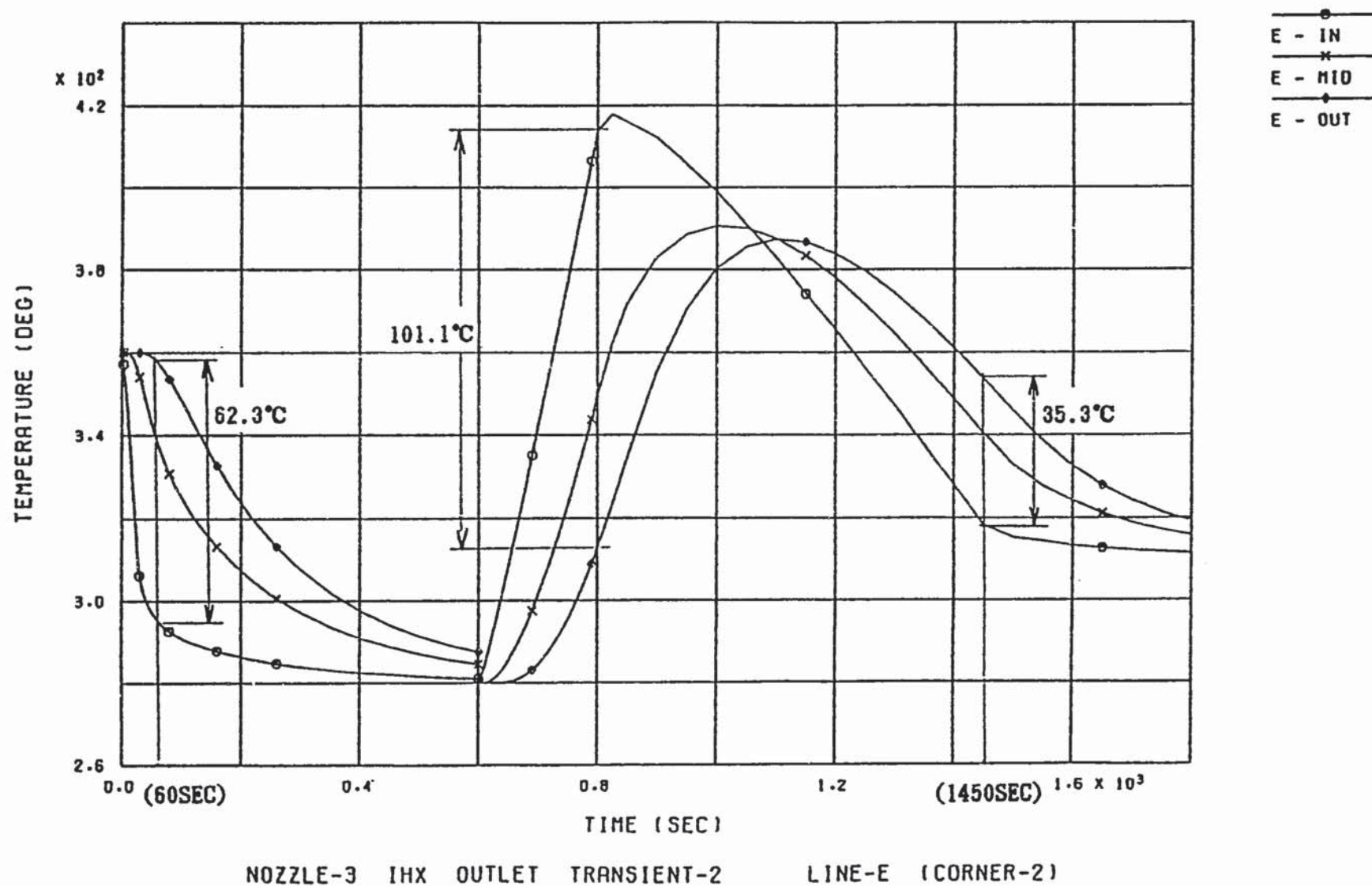


図 4.3.1 2 中間熱交換器出口ノズルの評価ラインEでの温度履歴(熱過渡(Ⅱ))

5. 支持構造物の検討

1次主冷却系配管の耐震解析モデルに用いた各支持点の剛性と、解析結果より得られた支持点反力に基づき、所要剛性と強度を有する具体的構造形態を代表的支持点（IHX中間胴部支持構造物及びC/L配管ポンプ側レストレイント）について検討した。

5.1 IHX中間胴部支持構造物

IHXの中間部において、浮動支持直交方向の耐震支持構造である。図5.1にある通り2分割のバンドをボルトで締結し、バンドを介して荷重を伝達する。バンドには2個のバンパとシアラグを設け、フロート直交方向の荷重を2点で分担する。1カ所のサポートには100トンの荷重が作用し、合計200tonの地震力を支持する。

直交方向のバンパのうち、ポンプと反対側のバンパはバックバンパを床に固定し荷重を受けるが、ポンプ側のバンパは設置スペースの関係上、サポートビームを渡しサポートビームを両端の床に固定して荷重を受けるものとしている。

シアラグとシアブロック間はIHXの移動量分のギャップを設け、IHXの移動を妨げない様にしたうえ、シアラグの側面で横荷重をシアブロックに伝達する。シアラグは床に固定する。

バンドの自重はIHXに小片のブラケットを全周8カ所設け、バンドを支持して落下を防止する。

荷重は1カ所100ton程度であり、バンドの剛性を十分高めることによって受けることにし、IHX容器壁に過大な局部応力が生じない構造となっている。

5.2 C/L配管ポンプ側レストレイント

図5.2に本レストレイントの全体図を示した。コールドレグに対し、互いに45°方向に2本のロッドを配管クランプを介して配置し総体的に水平方向の変位を拘束する。

クランプ部の詳細は図5.3に示す通りである。2分割クランプを締結ボルトで配管に固定し、クランプにロッドと結合するブラケットを2カ所溶接している。クランプと配管の間には薄いステンレスメッシュを挟み、熱過渡時の配管の膨張によるタガ締め応力を緩和する構造となっている。

想定した支持反力は45ton（S₂地震＋熱膨張）、剛性は30ton/mmである。

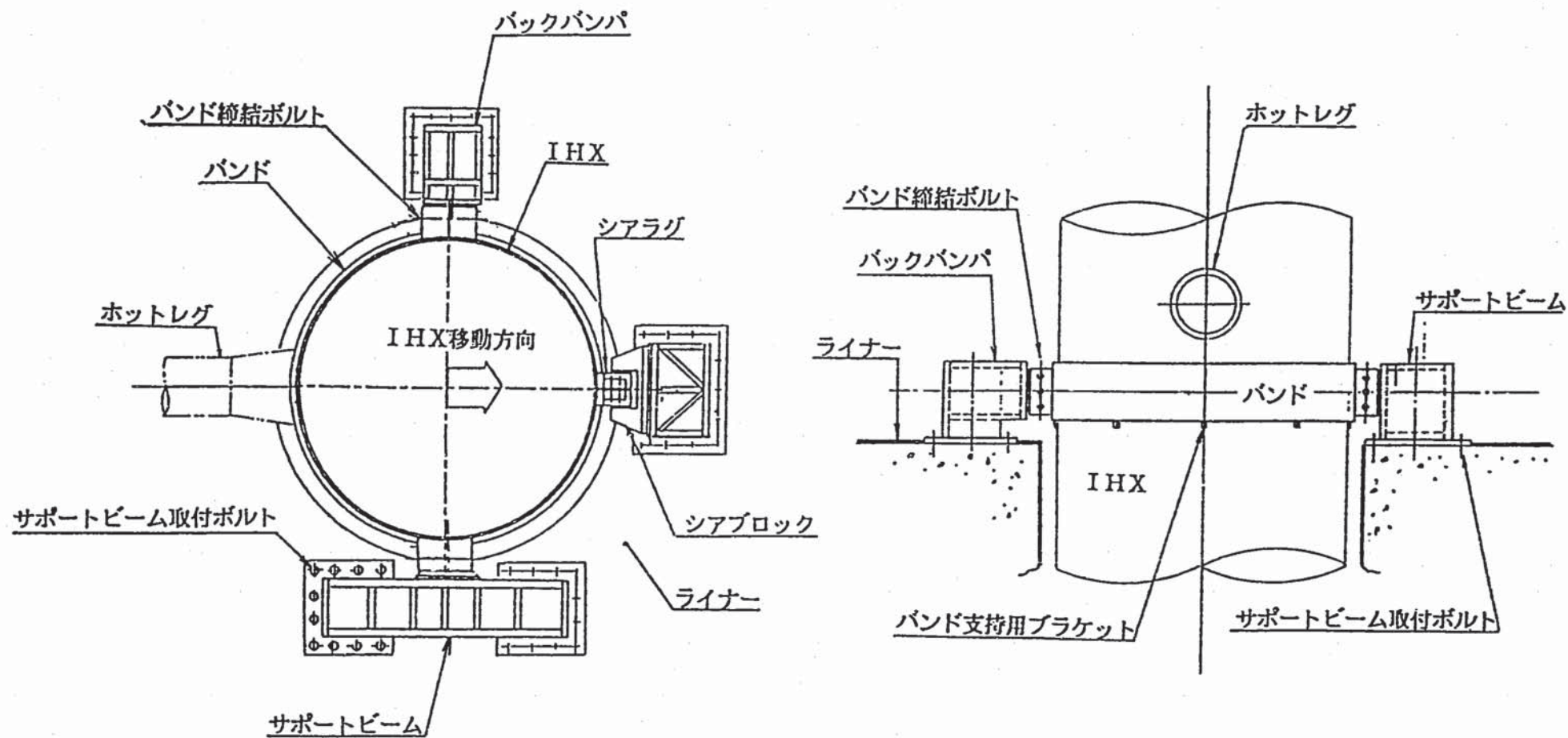


図5.1 IHX中間サポート概念

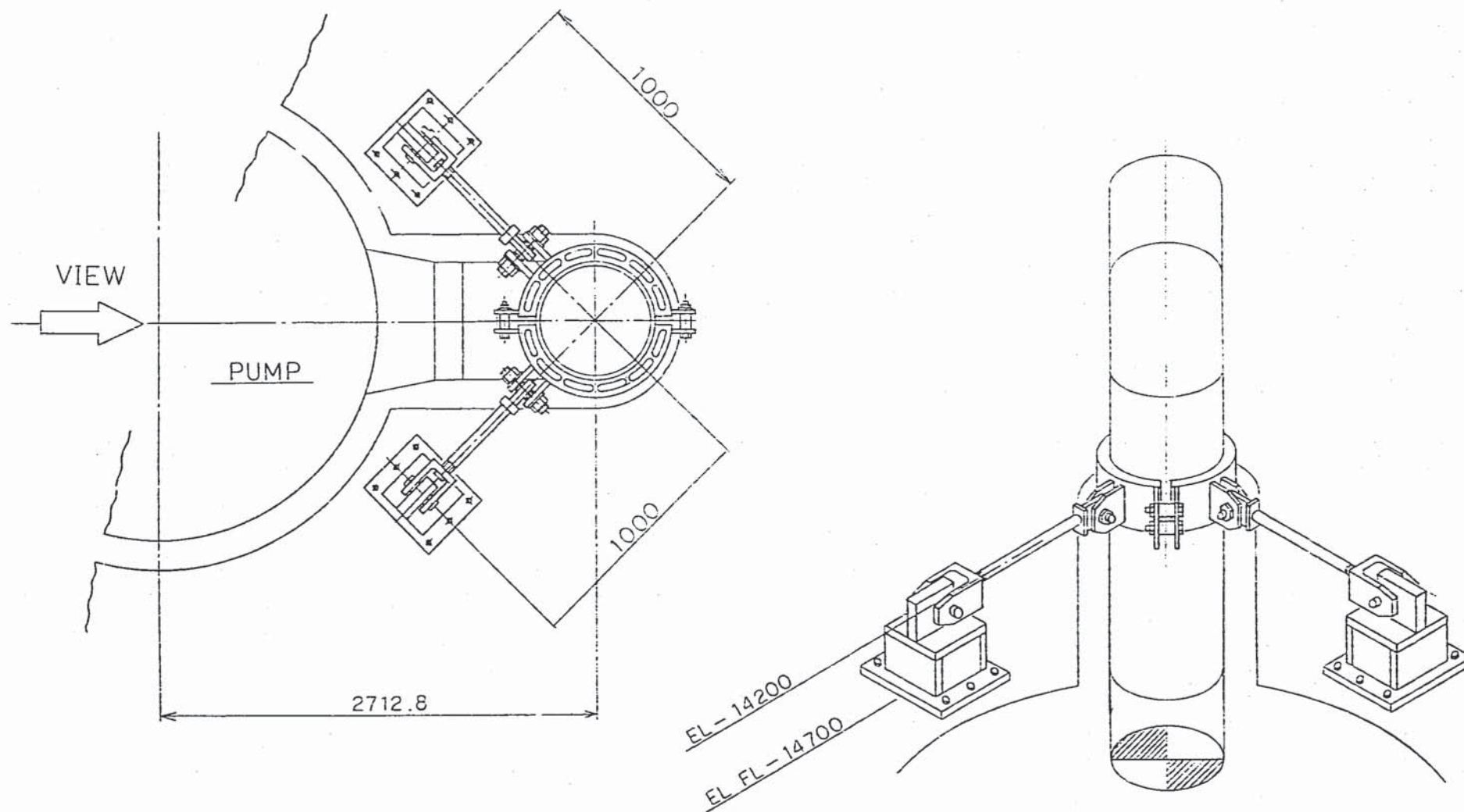
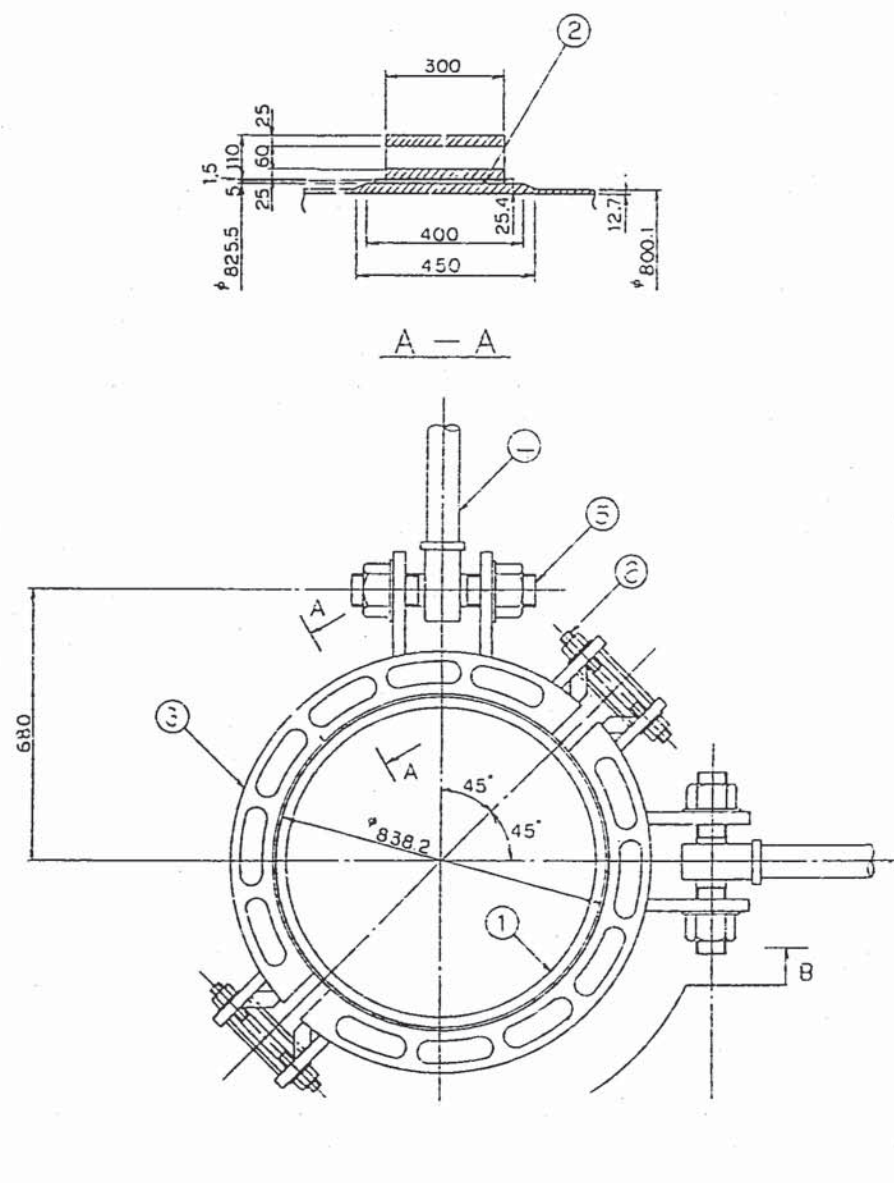


図 5.2 コールドレグレストレイント概念図



- ① 主冷却系入口配管
- ② ステンレスメッシュ
- ③ クランプ
- ④ ロッド
- ⑤ ロッド連結ピン
- ⑥ クランプ締結ボルト

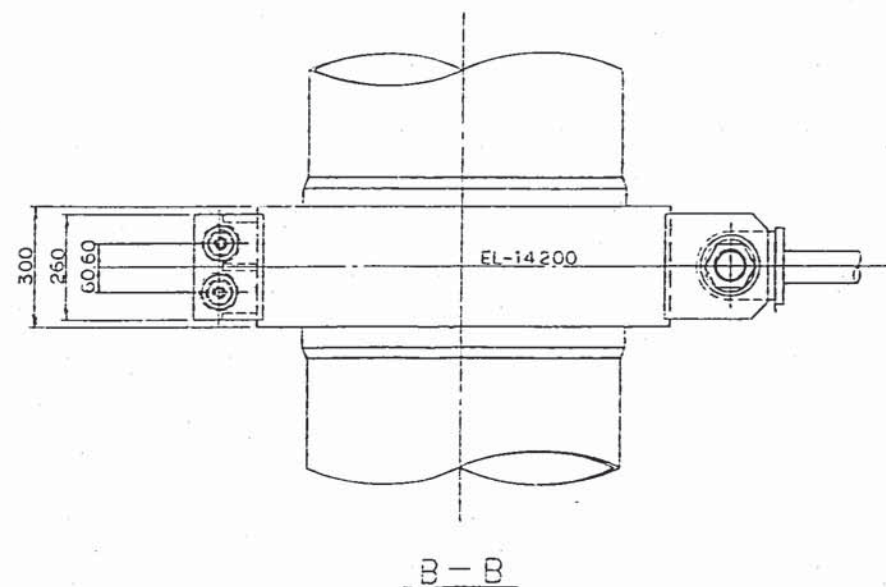


図 5.3 配管／クランプ取合部構造

6. ま と め

中間熱交換器の浮動支持による一次主冷却配管短縮化についての検討結果は次のようにまとめることができる。

- (1) 1次系高温セル内でのメカニカルスナッパ設置については、これを全廃しても耐震設計上の成立性があることを確認した。
- (2) メカニカルスナッパのかわりにレストレイントを使用する設計でも、その設置位置を検討した結果、熱膨張応力上問題のないケースを見出すことができた。
- (3) ホットレグ配管の弾性追従については、3次元シェルモデルを取り入れた非弾性解析結果に基づく評価を行い、顕著な弾性追従が生じないことを確認した。
- (4) 配管及びノズルの健全性評価をBDSに準拠して実施し、それぞれ評価上の制限を満足し成立性について問題ないことを確認した。
- (5) 1次主冷却系配管の耐震解析モデルに用いた各支持具の剛性と解析結果より得られた支持点反力に基づき、所要の剛性と強度を有する具体的な支持構造物の構造形態を案出した。

7. 結 言

配管短縮のために中間熱交換器を浮動支持した一次主冷却系について、高速増殖炉の特徴を考慮した設計手法を取り入れてその成立性を評価した。配管については自重、定格運転時及び熱過渡時の熱膨張並びに地震に対して、ノズルについては内圧、自重、地震反力、熱膨張反力及び熱過渡に対して評価した結果、すべて許容値内におさまリ、又配管支持装置も実現性の高いものであることが明らかになり、その成立性が十分あることが確認できた。

8. 謝 辞

本検討に当っては、機器構造開発部構造工学室の森下正樹副主任研究員，渡士克己副主任研究員及び谷川雅之研究員には貴重でかつ有意義なコメントを多数頂いた。また三菱原子力工業㈱の格修，佐藤健一郎の両氏には多大の協力を頂いた。あわせて感謝の意を表する。

9. 参 考 文 献

- (1) PNC SJ2216 86-001(2) 要素技術設計研究(Ⅱ) 大型化に関する設計研究に伴う設備設計役務(1)-原子炉構造及び1次熱輸送系設備等(2/2) 昭和61年3月
- (2) PNC SN9410 87-094 IHXフローティングサポート方式の成立性に関する検討 第1報 ノズルの解析 1987年5月

10. 添 付 資 料

ポンプ出口配管の詳細応力解析

(1) 実施の目的

今回の成立性の検討ではポンプ出口部ノズルに直付けになっているエルボのフレキシビリティ・ファクターや応力指数を正確に評価する必要性が出て来た。このエルボの様に一端に直管より剛なノズルが接合されている場合には、曲げを受けたエルボの断面変形が制約され、フレキシビリティ・ファクタがASMEの算出式より小さい可能性がある。また、応力指数も当然告示のもととは違ってくるであろうから、このエルボの健全性を評価するためには解析によってそのフレキシビリティ・ファクタと応力指数を求めることが必要である。

(2) 解析モデル

右図の形状に対し、モデルを作成

する。

(i) コード

NASTRAN

(ii) 要素

QUAD4(3次元シェル)

なおノズルの形状を図1に示

す。

(iii) 寸 法

(a) ポンプ

外径(半径)1500mm, 板厚40mm, $L_1 = 2000\text{mm}$, $L_2 = 1000\text{mm}$

(b) ノズル

図-1

(c) エルボ

曲げ半径812.8mm, 板厚12.7mm, 外径812.8mm

(d) 直 管

外径812.8mm, 板厚12.7mm, $L_3 = 2000\text{mm}$

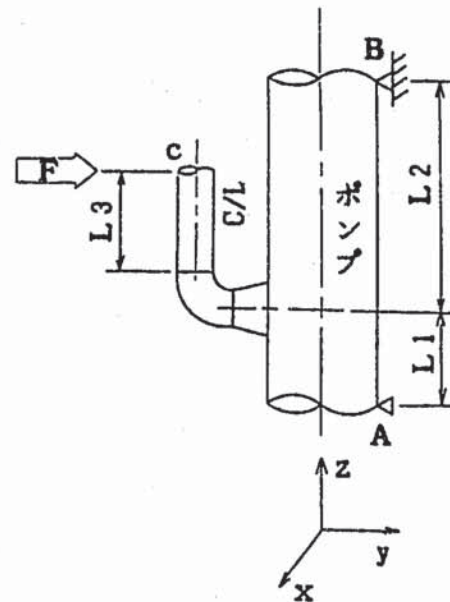
(iv) 境界条件

(a) A点 — y方向固定(全周)

(b) B点 — y, z "

(c) 対称性 — モデルは半割りとし, yz面で対称条件とする。

$$(\Delta x = 0, \theta_y = 0, \theta_z = 0)$$



(V) 荷 重

(a) c 点に水平方向荷重 F を負荷する (全周) 。

$$F_{\text{total}} = 1 \times 10^4 \text{ kg}$$

(vi) 要素分割に関する注意

本解析の目的はエルボ部の剛性算出にあるため、エルボ部／ノズル部及びその近傍は詳細メッシュとするが、それ以外の部分は荒いメッシュでモデル化する。

(vii) 物 性 値

$$\left. \begin{array}{l} \text{(a) } E = 17520 \text{ kg/mm}^2 \\ \text{(b) } \nu = 0.3 \end{array} \right\} (\text{SUS304, } 360^\circ\text{C})$$

(3) 計算結果

図 2 に変形図を示す。断面の偏平度は断面 A-A, B-B が C-C より顕著であることがわかる。ノズル～エルボ～直管にかけての応力分布を図 3～6 に示す。図 6 のミーゼスの相当応力分布を見るとエルボ端の応力はノズル側で $\max. 27 \text{ kg/mm}^2$, 反対側端部で約 40 kg/mm^2 となっていて、ノズル側では集中が少なくなっていることがわかる。エルボ中央の最大応力 (58 kg/mm^2) に対する比率はノズルと反対側のエルボ端で $40/58 = 0.69$, ノズル側端部で $27/58 = 0.47$ となっていて、いわゆるキャリー・オーバー・ファクターは $0.7 \sim 0.5$ 程度である。

次にエルボの軸方向に沿って応力をプロットしたものを図 7 に示す。エルボ中央側部に沿う面に最大応力が発生している。一方、図 7 の右軸には同領域をビームでモデル化し、同一荷重を負荷した時のモーメント分布から求まる公称の曲げ応力 $M/Z = 8.2 \text{ kg/mm}^2$ に対する比率を目盛っている。即ち、この図からエルボの応力係数は約 9.0 であることがわかる。最後に図 8 にシェルモデルとビームモデルの結果から荷重点の変位を比較して示している。ビームモデルについて、エルボのフレキシビリティ・ファクタをパラメータとした解析を行って、フレキシビリティ・ファクター V S 先端荷重点変位の関係をプロットした曲線 (—○—○—) とシェルモデルの結果 (……) との交点がこのエルボの正確なフレキシビリティ・ファクター (21.2) であることになる。

(4) ま と め

- (i) エルボのフレキシビリティ・ファクターは約 21.2 であった。これは SEC. III NB-3600 規定の値 (両側に直管あり) = 25.6 と NC-3600 の値 (片端にフランジあり) = 16.2 の中間値である。
- (ii) エルボの応力指数は約 9.0 であった。これは上述の NB-規定値の 12.1 と NC-規定値の 3.5 の中間値である。

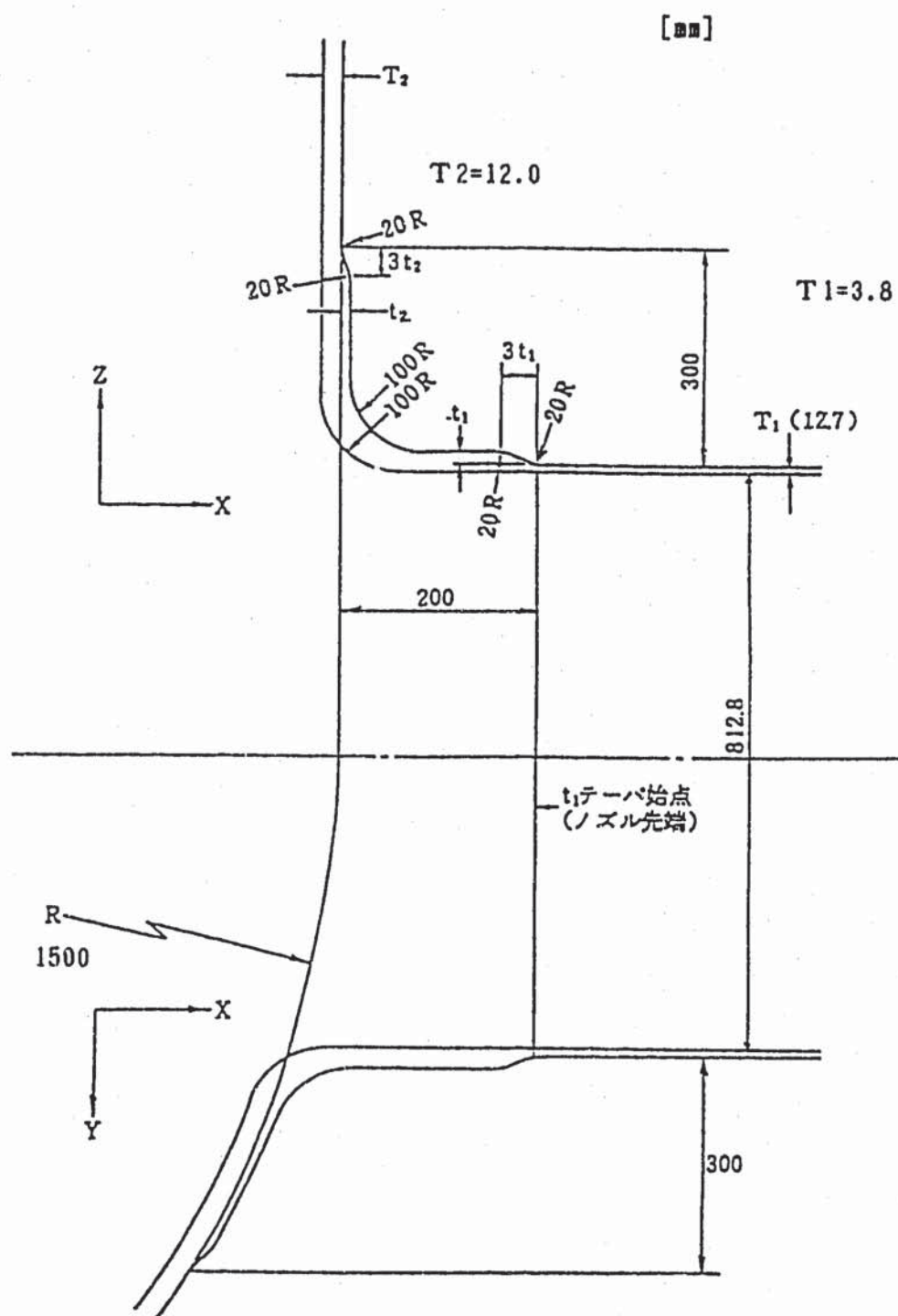


図1 ポンプ出口配管の詳細解析モデルに使用したノズル寸法

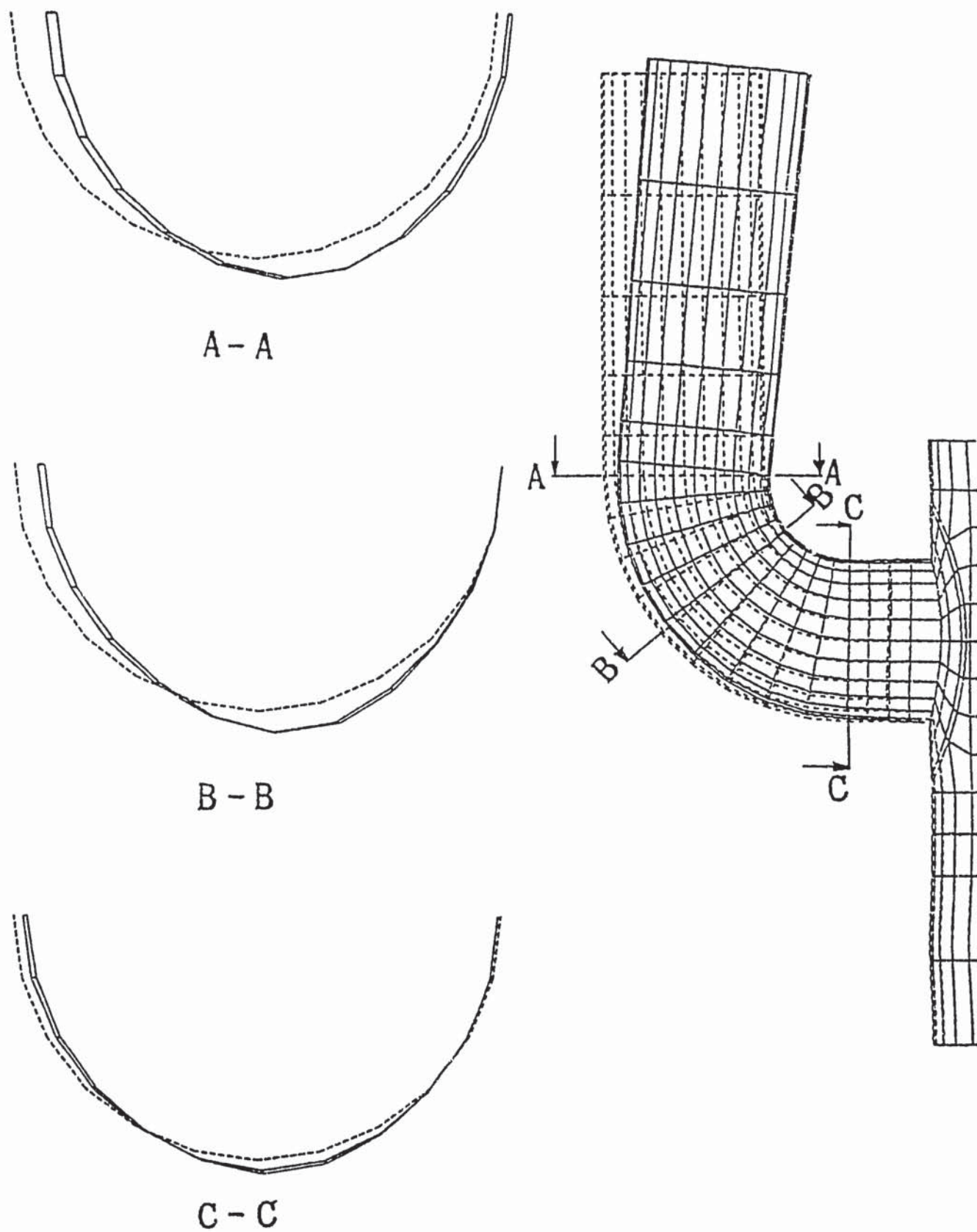


図2 ポンプ出口配管詳細解析結果(1)
変形図

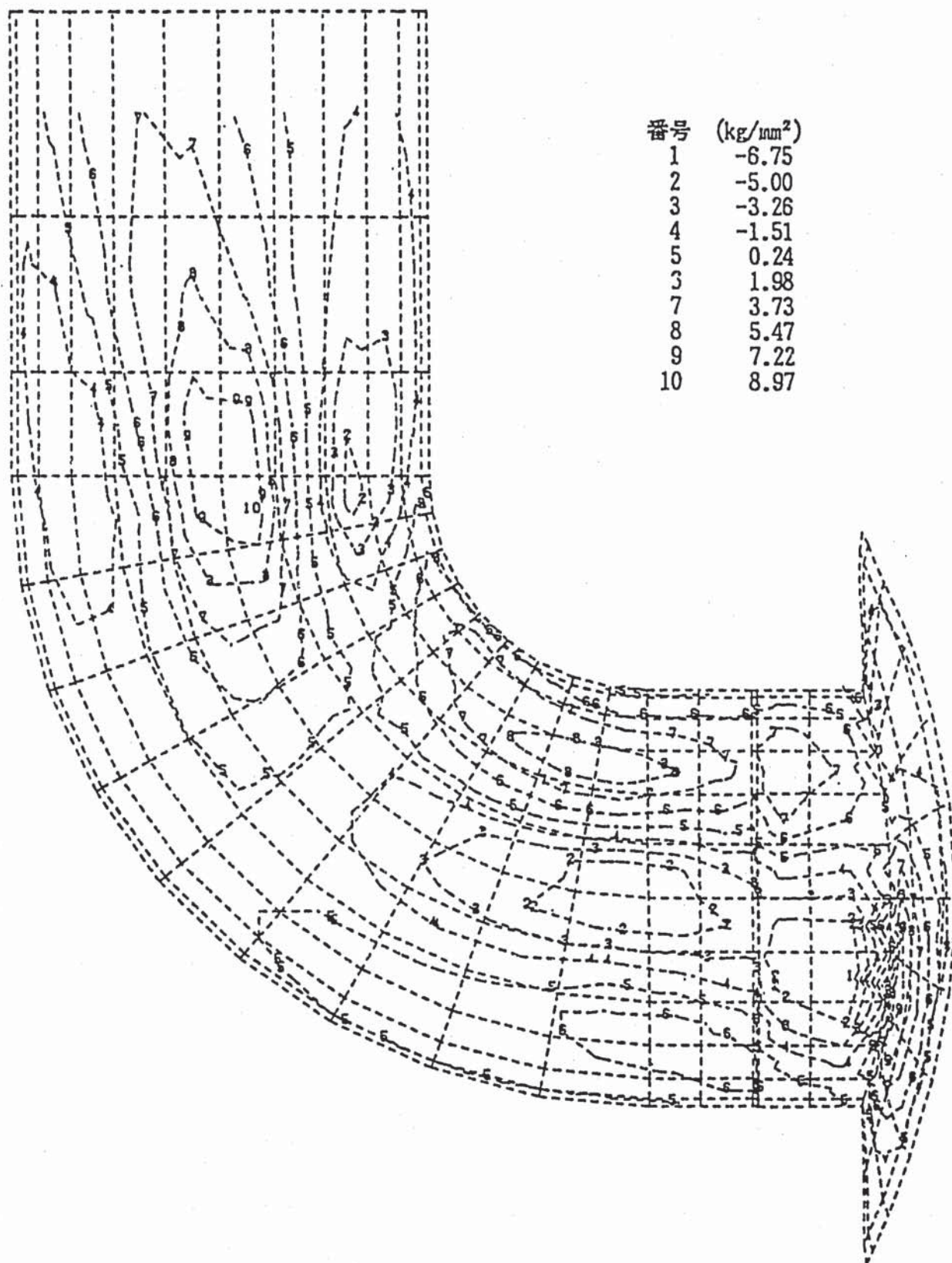


図3 ポンプ出口配管詳細解析結果(2)

応力コンター(1/4)

せん断応力

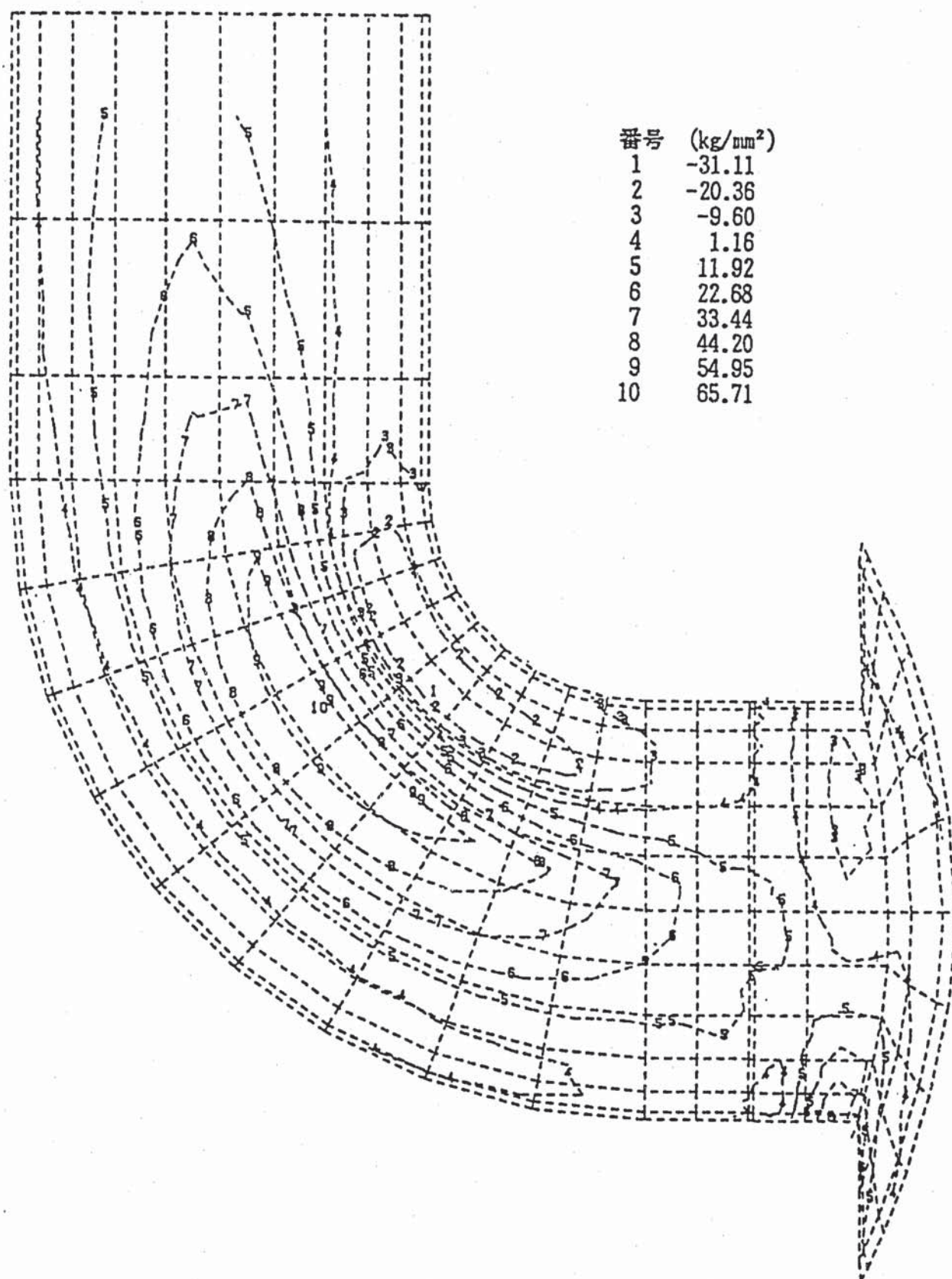


図4 ポンプ出口配管詳細解析結果(3)

応力コンター(2 / 4)

最大主応力

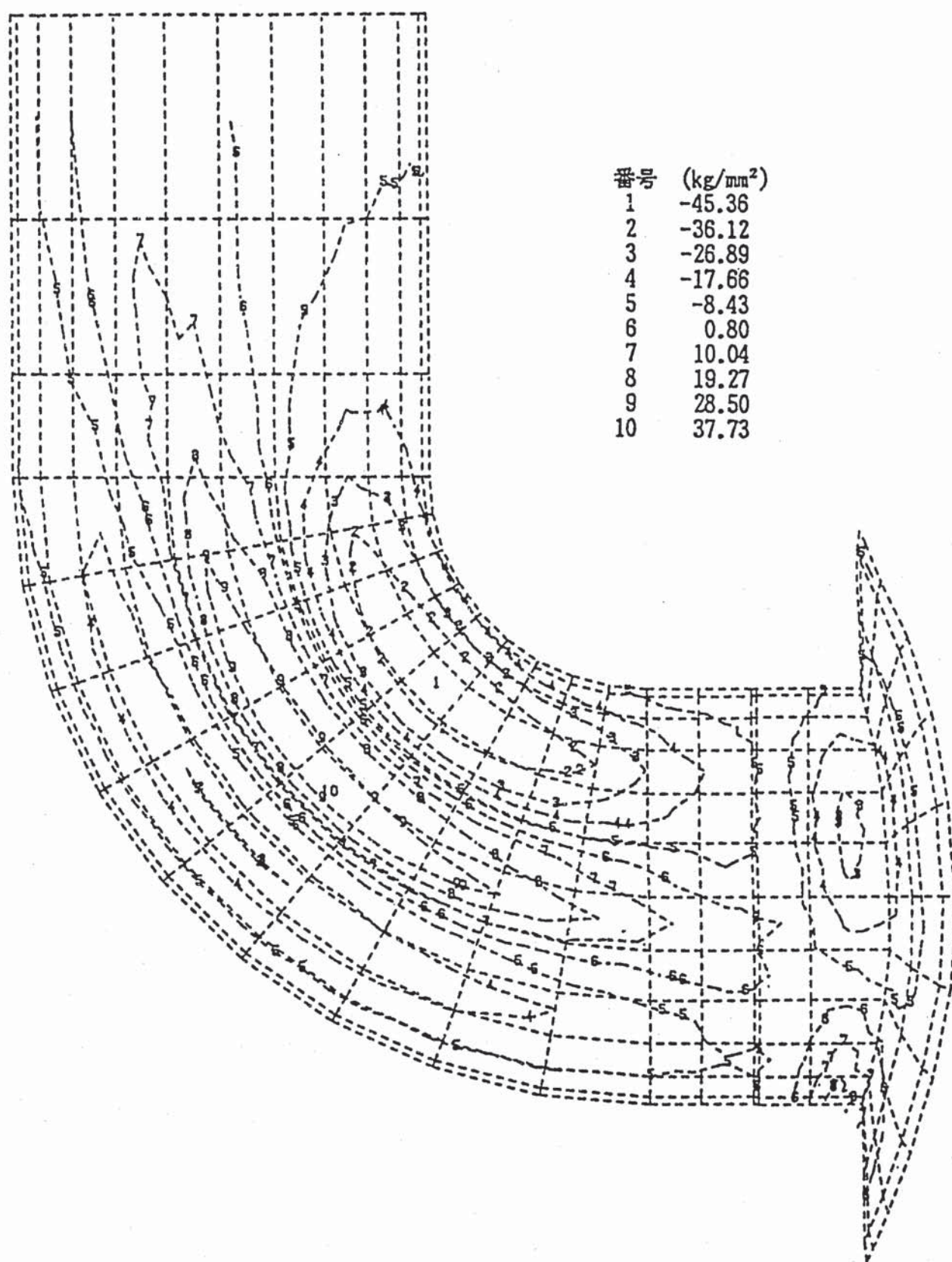


図5 ポンプ出口配管詳細解析結果(4)

応力コンター(3 / 4)

最小主応力

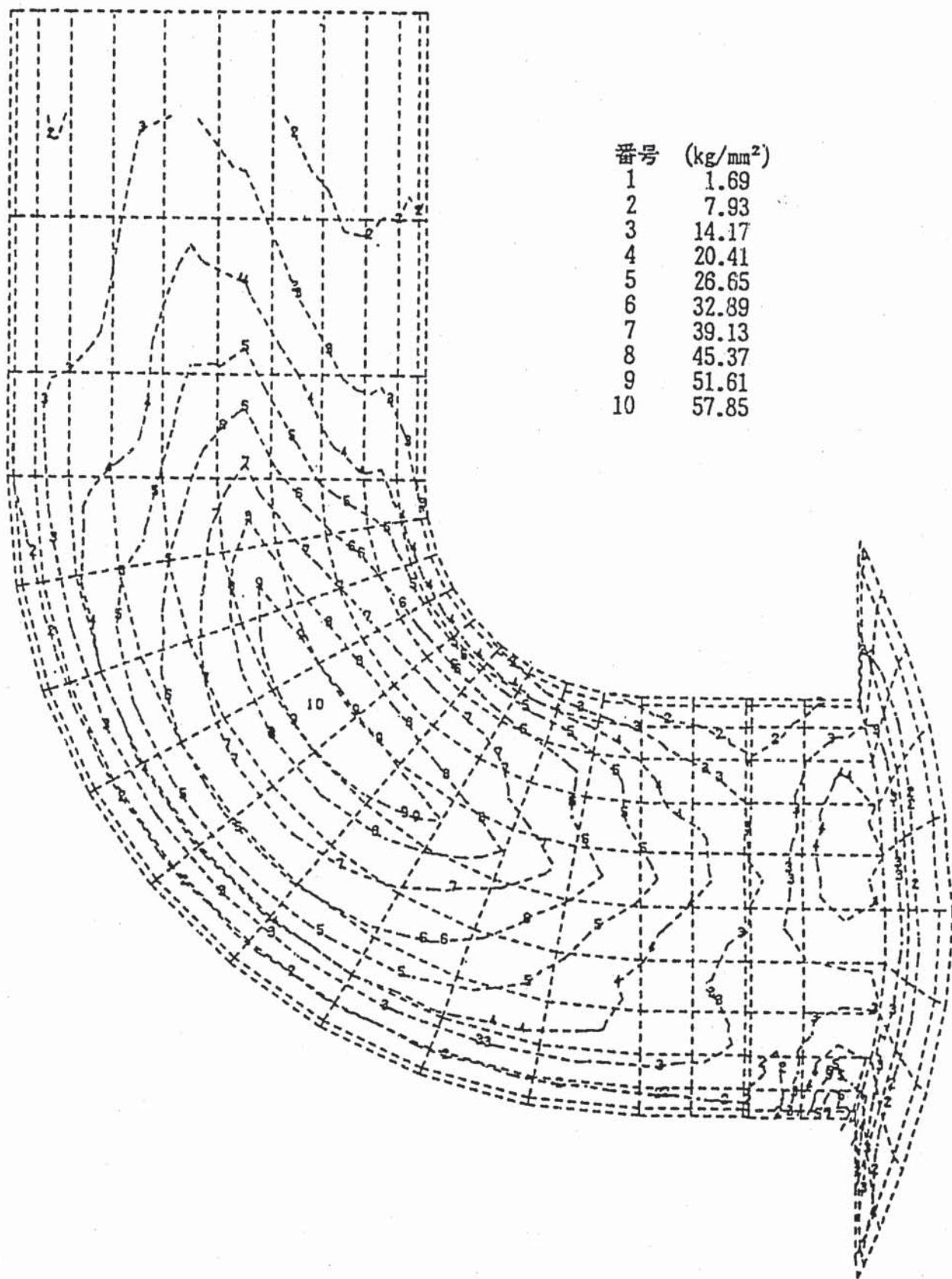


図6 ポンプ出口配管詳細解析結果(5)

応力コンター(4 / 4)

ミーゼスの相当応力

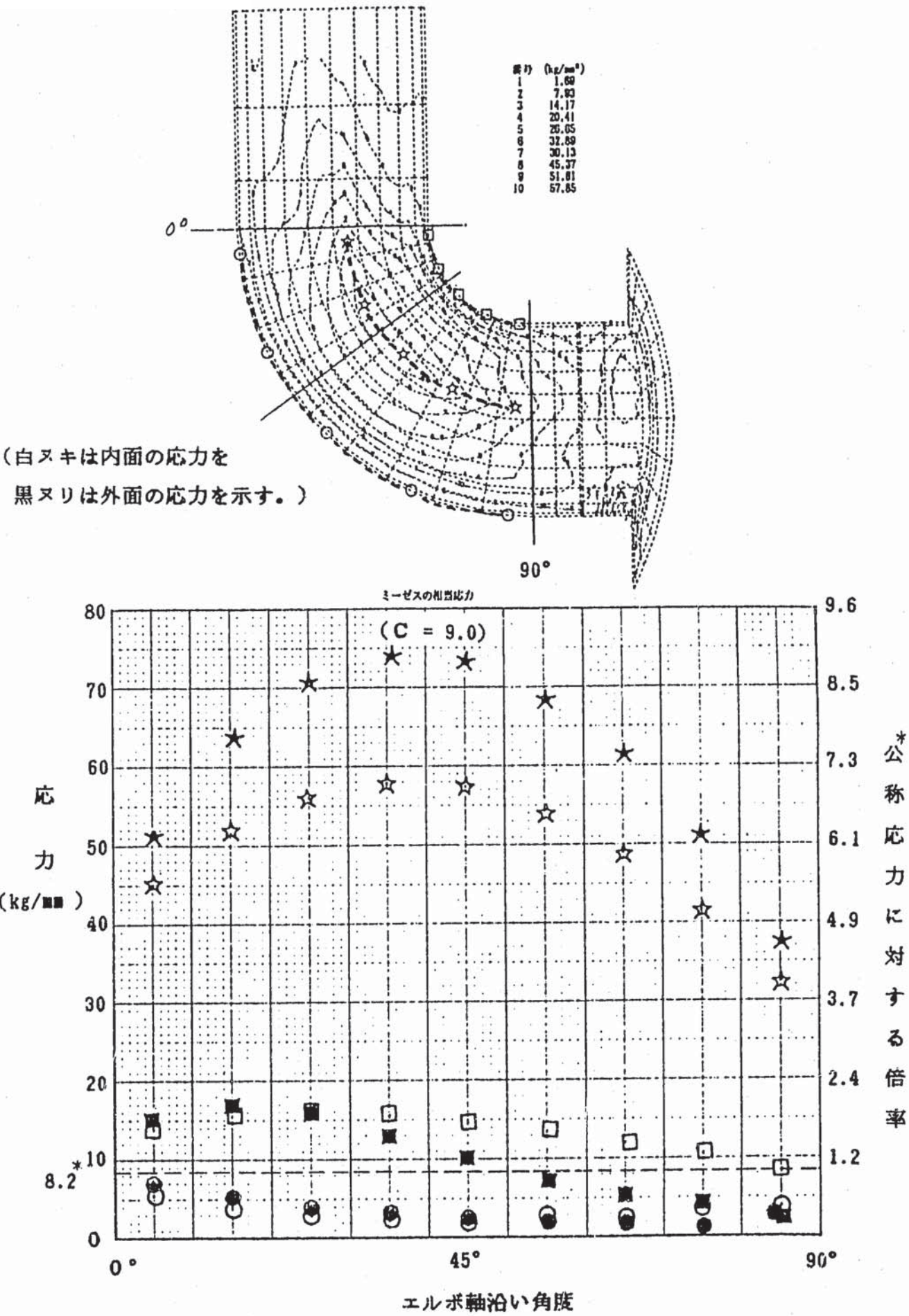


図7 ポンプ出口配管詳細解析結果(6)

エルボの軸方向応力分布

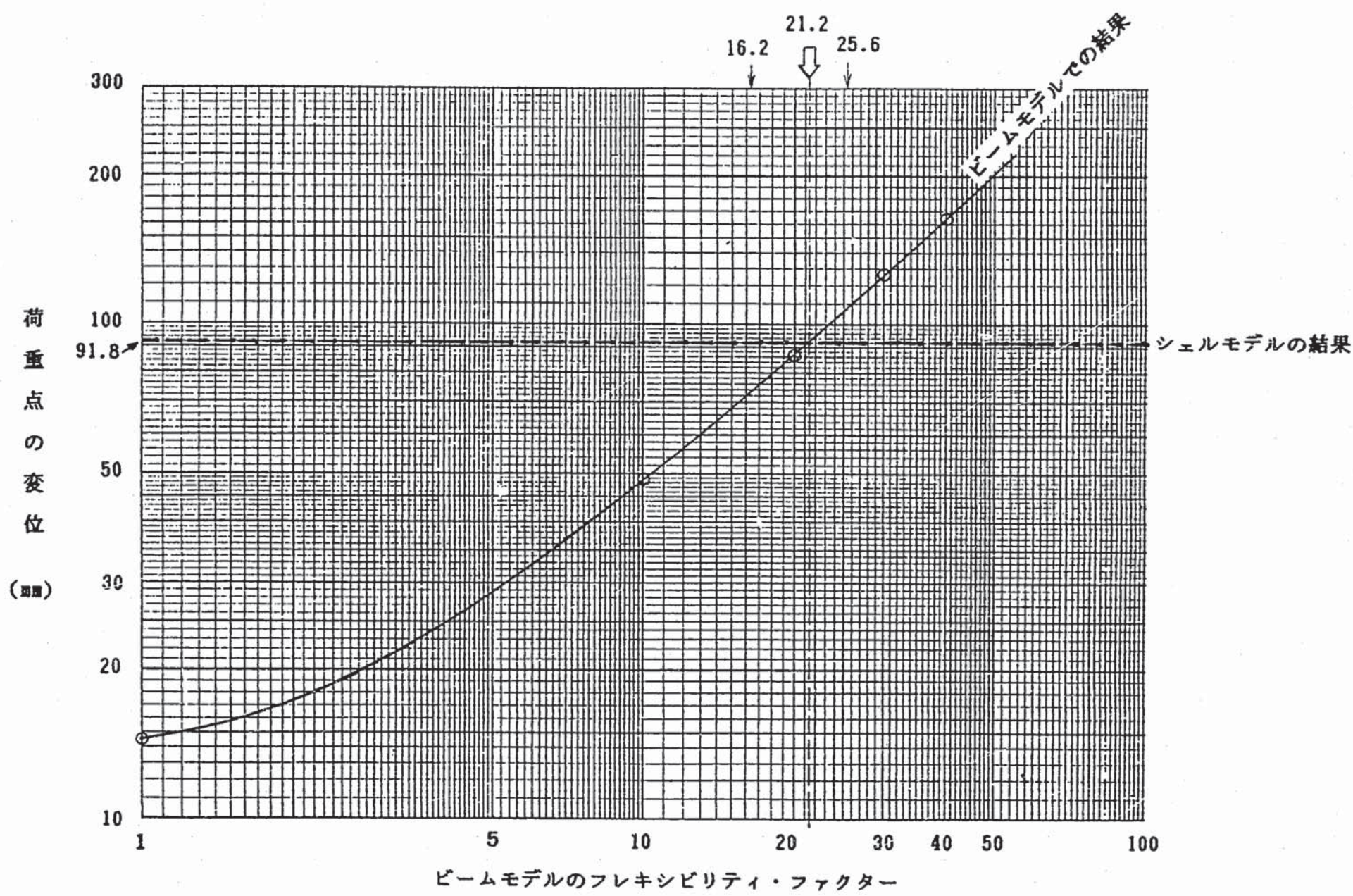


図8 ポンプ出口配管詳細解析結果(7)

ビームモデルのフレキシビリティ・ファクターの計算