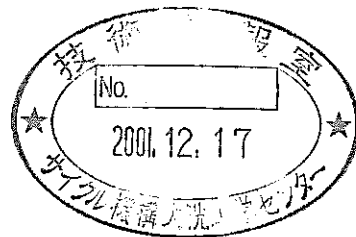


ナトリウム炉配管の構造解析(1)

—大型炉ホットレグ配管の熱膨張応力に対するパラメータ感度評価—
(研究報告書)



2001年7月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

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 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

ナトリウム炉配管の構造解析 (1)

—大形炉ホットレグ配管の熱膨張応力に対するパラメータ感度評価—

古橋一郎*、 笠原直人**

要旨

実用化戦略調査研究 Phase I で検討されたアドバンスループ炉のホットレグ配管を対象に、熱膨張応力を解析評価し、そのメカニズムおよび各種設計パラメータ感度を明らかにした。

熱膨張応力のメカニズムは以下の通りである。

- ① エルボは十分に柔でありヒンジに近い挙動となる。
- ② IHX の支持高さ位置を最適化することで、鉛直方向強制変位と配管系自身の鉛直方向熱膨張を相殺させることができる。
- ③ 水平方向熱膨張を鉛直配管部の曲げ変形で吸収する単純梁構造の挙動に近くなる。

熱膨張応力の設計パラメータに対する感度の評価結果は以下の通りである。

- (1) エルボ撓性係数(敏感);現状計画の範囲では鈍感である。
- (2) Yピース剛性(中位):Yピース部応力には敏感だが他部への影響は小さい。Yピースを剛体とした設計が成立する。
- (3) IHX ノズル剛性(鈍感):IHX ノズルを剛体とした設計が成立する。
- (4) 鉛直相対変位量(敏感):現状計画の IHX 支持位置はほぼ最適であり、±10mm は設計成立範囲にある。
- (5) エルボ曲げ半径(鈍感):現状計画のショートエルボで設計が成立する。

12Cr鋼の採用により、現状計画の配管設計が十分に成立する。得られた感度線図を用いて、これらの設計パラメータを変更した場合の熱膨張応力を簡単に予測できる。本報告で得られたこれらの知見は、Phase II 詳細設計で有効に活用されよう。

* ㈱CRC総合研究所

** 核燃料サイクル開発機構、大洗工学センター、構造信頼性研究Gr

Structural Analyses on Piping Systems of Sodium Reactors (1)
-Sensitivity Analyses of Thermal Expansion Stresses
at Hot-leg Piping of Large-Scale Sodium Reactors-

Ichiro FURUHASHI* and Naoto KASAHARA**

Abstract

The present analytical investigations of thermal expansion stresses at hot-leg piping of advanced sodium-cooled loop-type reactors clarified their mechanisms and sensitivities to design parameters.

The major mechanisms of thermal stresses identified in this study are summarized as:

- ① The elbow has a large flexibility and acts like the hinge in the pipelines.
- ② Vertical displacement of the IHX with the optimized support position can compensate thermal expansion displacement of the piping system in the vertical direction.
- ③ This piping system absorbs thermal expansion loads in the horizontal direction by bending transformation of the inner and outer vertical pipes.

The major design parameters and their sensitivities are evaluated as follows:

- (1) Flexibility of the elbow (high): The current design conditions are in an insensitive range.
- (2) Stiffness of the Y-piece (Intermediate): Stress of the Y-piece is sensitive and other portions are insensitive. A design with the rigid Y-piece is feasible.
- (3) Stiffness of the IHX nozzle (Insensitive): A design with the rigid nozzle is feasible.
- (4) Relative displacement in the vertical direction (Sensitive): The current support position is optimized and deviation within $\pm 10\text{mm}$ is feasible.
- (5) Radius of the elbow (Insensitive): The current design with the short elbow is feasible.

Adoption of 12Cr steel makes the current design of the hot leg piping system feasible. The sensitivity diagrams obtained from this study can predict thermal expansion stresses with other values of the design parameters as well.

* CRC Solutions Corp.

** Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC

目次

要旨

1. 緒言	1
2. 配管設計上の課題	2
3. 解析	5
3. 1 解析モデル	5
3. 2 エルボの撓性係数	5
3. 3 Yピース剛性	6
3. 4 IHX ノズル剛性	7
3. 5 鉛直相対変位量	7
3. 6 エルボ曲げ半径	7
4. 結言	8
参考文献	9

表リスト

表 2.1 ホットレグ配管系の設計の変遷

表 3.1-1 12Cr 系鋼の材料特性値

表 3.1-2 エルボの特性

図リスト

図 2.1 もんじゅおよび実証炉のホットレグ配管

図 2.2 アドバンストループ炉の一次系配管

図 3.1-1 ホットレグ配管の温度条件および境界条件

図 3.1-2 ホットレグ配管の梁解析モデル

図 3.2-1 エルボ撓性係数パラメータ感度 (モーメントの変化)

図 3.2-2 エルボ撓性係数パラメータ感度 (応力の変化)

図 3.2-3 エルボ撓性係数パラメータ感度 (エルボの角変位)

図 3.3-1 Yピース剛性パラメータ感度 (モーメントの変化)

図 3.3-2 Yピース剛性パラメータ感度 (応力の変化)

図 3.4-1 IHX ノズル剛性パラメータ感度 (モーメントの変化)

図 3.4-2 IHX ノズル剛性パラメータ感度 (応力の変化)

図 3.5-1 鉛直相対変位パラメータ感度 (モーメントの変化)

図 3.5-2 鉛直相対変位パラメータ感度 (応力の変化)

図 3.6-1 エルボ曲げ半径パラメータ感度 (モーメントの変化)

図 3.6-2 エルボ曲げ半径パラメータ感度 (応力の変化)

1. 緒言

実用化戦略調査研究 Phase I [1]において、ナトリウム炉の経済性向上を目的とする設計概念の成立性を左右する構造として、原子炉容器液面近傍、ホットレグ配管および IHX 管板が摘出された。これらの部位は、もんじゅおよび実証炉の構造設計においてもクリティカルであり、高速炉では原理的に高熱応力が発生する普遍的構造と考えられる。従って、実用化戦略調査研究 Phase II における設計の詳細化の段階でも、継続した検討が必要になると考えられる。

ループ型高速炉 1 次系ホットレグ配管の短縮化は、プラント配置のコンパクト化および建屋を含む物量削減に大きく寄与することから、その努力が続けられてきた。配管系に使用されるエルボ数は、もんじゅ 9、実証炉 2 であり、有望な実用化概念であるアドバンスループ炉では 1 が計画されている。またアドバンスループ炉では、圧力条件が配管口径を制限しないことに着目して、冷却ループの大容量化とループ数削減を計画しており、配管は大口径となっている。この結果、ホットレグ配管の熱膨張応力は増大する方向にある。これを克服するために 12Cr 系鋼の採用と高温構造設計の高度化が計画されている。

2. 配管設計上の課題

(1) 一般的課題

ループ型高速炉1次系ホットレグ配管の短縮化は、プラント配置のコンパクト化および建屋を含む物量削減に大きく寄与する。このため経済性を指向すると、常にその短縮化が課題となる。ホットレグ配管は定常運転時に生じる熱膨張ひずみが大きく、エルボによる引き回し等の変形吸収機構を施さないと、過大な熱応力が生じる。

配管熱膨張応力に対する制限は、その繰り返しによるエルボ部のクリープ疲労とLBBの成立性である。少数エルボ配管の場合は、さらに直管とノズル部の座屈および過大変形に留意する必要がある。変形に関しては機能上の制限は小さいと考えられるが局部変形がき裂発生に影響を与える場合は注意が必要となる。

さらに高温配管では、低応力部の弾性除荷により高応力部に非弾性ひずみが集中する弾性追従挙動[2]が上記に対する制限値を下げるため、これを考慮する必要がある。

(2) 実用化戦略調査研究 Phase I における課題

配管系に使用されたエルボ数は、もんじゅ9、実証炉2であったのに対し、抜本的な経済性向上を指向したアドバンストループ炉では1エルボが計画されている(表2.1、図2.1、図2.2)。またアドバンストループ炉では、圧力条件が配管口径を制限しないことに着目して、冷却ループの大容量化とループ数削減を計画しており、配管は大口径となっている。この結果、アドバンストループ炉のホットレグ配管の熱膨張応力は増大する方向にある。

実証炉の2エルボ配管系を念頭に、(1)で記した破損モードに対して開発されてきた配管評価法[3]を1エルボ配管系に適用した場合、設計が成立しない見通しであり、これを克服するために12Cr系鋼の採用と高温構造設計の高度化が期待されている。

(3) 実用化戦略調査研究 Phase I における課題解決方策

実用化戦略調査研究 Phase I では以下の熱膨張率低減と許容応力向上方策により設計成立を図っている。

(i) 熱膨張率低減

- ・熱膨張率が小さい 12Cr 系鋼の採用
- ・ IHX を配管に対する強制変位低減の観点から側部支持
- ・ One elbow と内外鉛直管の曲げで熱膨張吸収（内外鉛直管付け根 Y ピースと IHX ノズルはクリープ疲労強度低減を避けるため剛設計）

(ii) 許容応力向上

- ・降伏応力の高い 12Cr 系鋼の採用
- ・非弾性解析の適用
- ・内外鉛直管付け根部剛 Y ピースと剛ノズルによるエルボ拘束配管系

また大口径化 50B ($t=15.9$, $D=1270$, $R/t\sim 40$) に対しては、製作性の点でシームレスは無理であり溶接構造となる。なお、溶接線はエルボ部の最大応力発生位置とは重ならないようにすることが可能である。大口径化のもう一つの課題は水平配管の温度成層化による楕円変形であるが、高流速化により温度成層化そのものが起こり難く、予備的な熱流動解析の結果では鉛直配管を成層界面が上昇しなかったことから問題は少ないとしている。

LBB に関しては、12Cr 系鋼の採用はステンレス鋼に比べると延性が劣るため大口径であることと共に不利であるが、軽水炉の炭素鋼管用の手法から成立性はあると推定している。

構造成立性見通しを判断するために試解析を行っており、1 次系ホットレグ配管については、現状以下の結果を得ている。

① DDS に規定する「管の設計手法」[2]は、エルボ配管の疲労損傷評価用のひずみ範囲算出に際して、配管系の総体的な弾性追従とエルボ配管断面の局所的な弾性追従を重畳して評価するため、保守的な値を与える。

② 合理的な設計を志向した本概念のホットレグ配管に「管の設計手法」の適用を試みたところ、寿命末期の非弾性ひずみ累積値よりもひずみ範囲の方が大きくなるという（設計思想に照らして）不合理な結果となった。

③ 配管モデルとしてシェル要素を用いた非弾性解析（構成則：二直線近似＋移動硬化 α レット）による評価結果では、合理的な非弾性ひずみ累積値となった。

(4) 実用化戦略調査研究 Phase II に向けた課題

以上の結果、構造健全性が確保される見通しが得られたが、これには、以下

の課題がある。

- ① 配管系と支持部の寸法と剛性バランスの最適化により低熱応力が達成されたが、そのメカニズムを明らかにし、熱的境界条件等の変化に対して鈍感で安定な構造であることを示す必要がある。
- ② 薄肉大口径で短尺であることから、配管というよりシェルや容器の破損様式が現れないかを確認する必要がある。
- ③ 降伏応力が高くクリープ特性が316FRより劣る12Cr系鋼配管は弾クリープ変形を生じると推定されるが、非弾性解析により許容応力が向上するか不明確である。弾クリープ変形を考慮した非弾性設計法が必要とされる可能性がある。
- ④ LBBに関しては材料および形状が従来手法の適用外であるため、確認が必要である。

本報告は上記①に対応するものである。熱膨張により発生する配管モーメント分布およびクリティカル部位の応力と各種パラメータとの関係を解析評価し、有力な技術情報（配管熱膨張応力のパラメータ感度線図）を取得することにある。これによりPhase II設計詳細化を支援するものである。具体的なパラメータとしては以下のものを選定した。

- パラメータ 1 エルボの撓性係数
- パラメータ 2 Yピース剛性
- パラメータ 3 IHXノズル剛性
- パラメータ 4 鉛直相対変位量（IHX支持部高さ）
- パラメータ 5 エルボ曲げ半径

3. 解析

3. 1 解析モデル

配管の材質および形状は Phase I [1] で検討された以下のものを対象とした。

材質 12Cr 系鋼、解析に使用した材料特性を表 3.1-1 に示す。
 主配管 (内管) 50B 外径 $D = 1270\text{mm}$ 、板厚 $t = 15.9\text{mm}$
 エルボ曲げ半径 $R = 1270\text{mm}$
 支持管 (外管) 60B 外径 $D_s = 1524\text{mm}$ 、板厚 $t = 15.9\text{mm}$

配管系の温度条件および境界条件を図 3.1-1 に示す[1]。梁要素による解析モデルを図 3.1-2 に示す。Y ピース部は回転バネと剛梁でモデル化した。

回転バネ剛性 (標準ケース) $K_{s1} = 4.8 \times 10^{12} \text{Nmm/radian}$

剛梁 外径と材質は共通で板厚のみ 10 倍した円筒梁でモデル化

支持管上端の水平 X 方向変位 1.08mm はルーフデッキの半径方向熱膨張である。IHX ノズル端の水平 X 方向変位 -22.8mm は IHX 胴の半径方向熱膨張である。IHX ノズル端の鉛直 Y 方向変位 21.1mm は IHX の支持スカートとノズル高さまでの胴部の熱膨張であり、図 3.1-1 の支持高さ位置に依存する。

エルボに関しては、同長の直管に同じモーメントを加えた場合の撓み角変位に対する倍率を示す撓性係数 k_f を使用して、その変形挙動を模擬する。内圧が小さいエルボの撓性係数 k_f は ASME Sec. III [4] で与えられており、その式と予測される値を表 3.1-2 に示す。

3. 2 エルボの撓性係数

(1) 逆 L 字配管の熱膨張応力の特性

- ・両端支持部間の相対強制変位は以下のようなになる。

$$\text{水平方向 } \delta x = -22.8 - 1.08 = -23.88\text{mm}$$

$$\text{鉛直方向 } \delta y = 21.1\text{mm}$$

- ・自由熱膨張変位は、初期温度を 0°C として、以下のように計算される。

$$\text{水平方向 } \delta x, th = \text{内筒水平熱膨張} = 4370 * 11.3\text{E-}6 * 550 = 27.16\text{mm}$$

$$\text{鉛直方向 } \delta y, th = \text{内筒鉛直熱膨張} - \text{外筒鉛直熱膨張}$$

$$= 8000 * 11.3\text{E-}6 * 550 - (700 * 10.0\text{E-}6 * 50 + 1700 * 10.7\text{E-}6 * 300 + 3900 * 11.3\text{E-}6 * 550) = 19.67\text{mm}$$

- ・ 熱膨張反力に比例する弾性変位は以下ようになる。

$$\text{水平方向 } \delta x, e = \delta x - \delta x, th = -51.04\text{mm}$$

$$\text{鉛直方向 } \delta y, e = \delta y - \delta y, th = 1.43\text{mm}$$

これから本配管系の現状計画寸法では、IHX 支持高さ位置に依存した鉛直方向強制変位が鉛直方向自由熱膨張とほぼ相殺していることが分かる。従って、水平方向熱膨張をエルボおよび内外鉛直管の曲げ（水平方向撓み変位）により吸収する構造に近い。

(2) エルボの撓性係数

図 3.2-1 はエルボの撓性係数 k_f を現状計画の 32.128 を中心に 1～96.384 まで変化させた場合の、エルボ、IHX ノズル、内外鉛直管および内外鉛直管付け根 Y ピースのモーメントの変化である。図 3.2-2 は簡易計算により求めた発生応力の近似値の変化である。モーメント変化に着目すると、撓性係数 $k_f = 1 \sim 32.128$ までは大きく変化するが、 $k_f = 32.128$ 以上ではあまり変化しないことが分かる。これは $k_f = 32.128$ が十分に柔であり、エルボはヒンジに近い挙動を示していることを意味する。図 3.2-3 はエルボの撓性係数と角変位の関係である。この結果から、現状計画構造の撓性係数 $k_f = 32.128$ の付近では、エルボはヒンジに近い挙動を示すこと、水平方向弾性変位は実質的に内外鉛直管の水平方向撓みで与えられること、発生熱応力は外筒+Y ピース+内筒鉛直部の曲げ剛性および鉛直配管高さに強く支配されること、熱応力への影響は鈍感でありエルボの撓性係数が多少変化しても安定して設計成立することが分かる。

3. 3 Y ピース剛性

図 3.3-1 は内外鉛直管付け根 Y ピースの剛性を現状計画の $K_{s1} = 4.8 \times 10^{12}$ Nmm/radian を中心に $K_{s1} = 4.8 \times 10^{11} \sim \infty$ まで変化させた場合の、エルボ、IHX ノズル、内外鉛直管のモーメントの変化である。図 3.3-2 は簡易計算により求めた発生応力の近似値の変化である。エルボ、IHX ノズル部のモーメントと応力は Y ピースの剛性の影響を受けるが、現状計画値 $K_{s1} = 4.8 \times 10^{12}$ Nmm/radian は剛体に十分近くそれより剛性が上がっても変化が小さい。逆に Y ピースの剛性が下がる場合、他の部位のモーメントも下がるが、Y ピース自身の応力増加およびひずみ集中に留意する必要がある。ただし、現状計画値付近では十分な余裕がある。

3. 4 IHX ノズル剛性

図 3.4-1 は IHX ノズルの剛性を $K_{s_2} = 9.8 \times 10^{11} \sim \infty$ Nmm/radian まで変化させた場合の、エルボ、内外鉛直管および内外鉛直管付け根 Y ピースのモーメントの変化である。図 3.4-2 は簡易計算により求めた発生応力の近似値の変化である。IHX ノズルの剛性は他の部位への影響が小さいことが分かる。これは現状計画値が鉛直方向強制変位と配管の鉛直方向熱膨張がほぼバランスした最適状態に近く、IHX ノズルに大きな曲げモーメントが生じない構造になっているためである。他に支障がない限り、IHX ノズルを剛な構造とする現状計画が安定して成立する。

3. 5 鉛直相対変位量

鉛直方向相対強制変位量は IHX のスカート支持高さ位置に依存する。スカート自身の鉛直方向熱膨張を一定とすると、支持高さ位置を 1000mm 下げると強制変位量は以下の量だけ増加する。

$$1000 * 11.3E-6 * 550 = 6.215 \text{mm}$$

図 3.5-1 は鉛直方向相対強制変位量を現状計画の $\delta y = 21.1 \text{mm}$ を中心に 11.1~31.1mm まで変化させた場合の、エルボ、内外鉛直管および内外鉛直管付け根 Y ピースのモーメントの変化である。図 3.5-2 は簡易計算により求めた発生応力の近似値の変化である。鉛直方向相対強制変位量は IHX ノズル端の反力およびエルボの曲げモーメントへの影響が大きいたことが分かる。現状計画値は配管系自身の熱膨張とバランスした最適値に近いことがわかる。強制変位量が $\pm 10 \text{mm}$ の検討範囲内では各部位の応力が制限値以下となることが分かる。強制変位量が $\pm 10 \text{mm}$ 以上変化するような場合は、支持高さ位置の変更を含めた検討対策が必要であろう。

何らかの過渡事象により内筒温度のみ 100°C 低下 ($550 \rightarrow 450^\circ\text{C}$) した場合、鉛直自由熱膨張は以下の量だけ変化する。

$$8000 * (11.1E-6 * 450 - 11.3E-6 * 550) = -9.76 \text{mm}$$

これは強制変位量が 9.76mm 増加するのと同じ影響を与えるが、各部位の応力は制限値以下におさまることが分かる。

3. 6 エルボ曲げ半径

3.2 節にてエルボの撓性係数の感度を評価したが、ここでは特に外径、板厚を現状計画値に固定し、曲げ半径のみを変化させた場合について評価した。

図 3.6-1 はエルボ曲げ半径を $R = 1270 \sim 1778 \text{mm}$ まで変化させた場合の、エルボ、内外鉛直管および内外鉛直管付け根 Y ピースのモーメントの変化である。図 3.6-2 は簡易計算により求めた発生応力の近似値の変化である。エルボ曲げ半径の他の部位への影響が小さいことが分かる。これは対象としたような薄肉大口径配管エルボは直管部に比べて十分に柔らかく、ヒンジに近い挙動となり、エルボ曲げ半径を多少変えても変化が小さいためである。

4. 結言

実用化戦略調査研究 Phase I において検討されたアドバンスグループ炉の逆 L 字型ホットレグ配管を対象に、各種パラメータが熱膨張反力および応力に与える感度を解析評価し、以下のような結果を得た。

現状計画の逆 L 字型配管の熱膨張反力の特徴に関して、以下のことが分かった。

- ① エルボは十分に柔でありヒンジに近い挙動となる。
- ② IHX の支持高さ位置を最適化することで、鉛直方向強制変位と配管系自身の鉛直方向熱膨張をバランスさせることができる。
- ③ これらの結果、水平方向熱膨張を鉛直配管部の水平方向撓みで吸収する単純梁構造の挙動に近くなる。

また、各パラメータの熱膨張反力へ与える感度に関して、以下のことがわかった。

- | パラメータ | 感度 | 評価結果 |
|------------|----|---|
| ①エルボ撓性係数 | 敏感 | 現状計画の範囲では鈍感。余裕を持って設計成立する。 |
| ② Yピース剛性 | 中位 | Yピース部応力には敏感だが十分な余裕がある。他部への影響は小さい。耐震上有利な Yピースを剛体とした設計が成立する。 |
| ③IHX ノズル剛性 | 鈍感 | IHX ノズルを剛体とした設計が成立する。 |
| ④鉛直相対変位量 | 敏感 | 現状計画の IHX 支持位置はほぼ最適である。
現状計画値 $\pm 10 \text{mm}$ は設計成立範囲にある。 |
| ⑤エルボ曲げ半径 | 鈍感 | 現状計画のショートエルボで余裕を持って設計成立する。 |

また降伏応力が高く熱膨張係数が小さい 12Cr 系鋼の採用により、現状計画の配管形状が十分に成立する見通しが得られた。得られた感度線図を用いて、これらのパラメータを変更した場合の熱膨張応力を簡単に予測できる。本報告で得られたこれらの知見は、Phase II 詳細設計での有効な活用が期待できる。

参考文献

[1] 三原隆嗣、他' FBR システム技術検討書—平成 11 年度報告—', JNC, TY9400 2000-024, (2000)

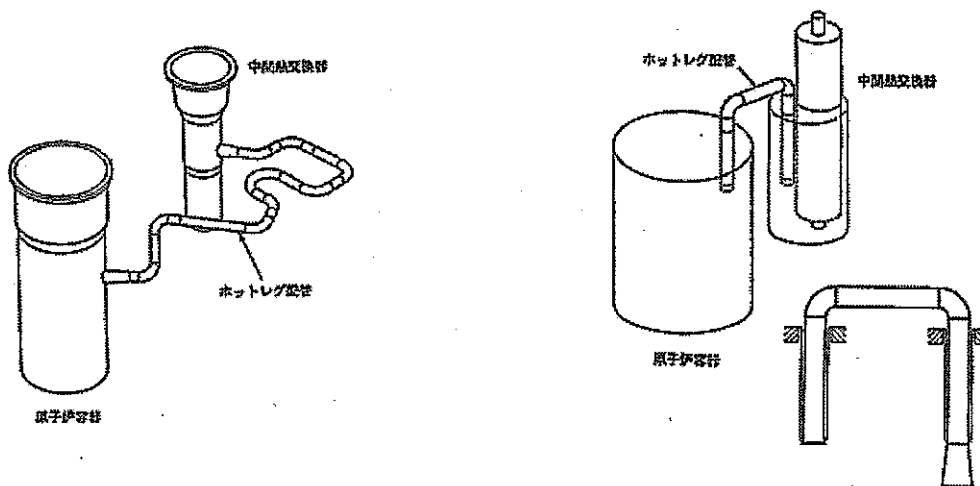
[2] Boyle, J.T. et al. (1987), 'The assessment of Elastic Follow-up in High Temperature Piping Systems—Overall Survey and Theoretical Aspects', Int. J. of Pres. Ves. & Pipng, 29, pp167/194

[3] Kaguchi, T., et. al., 'Design Procedure of Piping under Thermal Expansion at Elevated Temperature', ASME/JSME PVP, San Diego, (1998)

[4] ASME (1995), 'ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Nuclear Components', New York

表 2.1 ホットレグ配管系の設計の変遷

プラント	もんじゅ	実証炉	アドバンスループ炉
温度/材料	529°C/SUS304	550°C/316FR	550°C/12Cr
外径/板厚	812.8mm/11.1mm	965.2mm/15.9mm	1270mm/15.9mm
支持管(実証炉, アドバンスループ炉)口径/板厚	—	1168.4mm/34.0mm(R/V側)、 1168.4mm/23.0mm(IHX側)	1524mm/15.9mm
配管経路	高所配管引き回し	逆U字配管	L字配管
エルボ数	9	2	1
配管長/ループ	39m	22m	12m
最大応力強さ範囲	Sn=244MPa	Sn=367MPa	Sn=306MPa



もんじゅ : 多数エルボ配管
 ・エルボの変形により熱膨張変位を吸収

実証炉 : 少数エルボ配管
 ・エルボ及び鉛直管の変形により熱膨張変位を吸収

図 2.1 もんじゅおよび実証炉のホットレグ配管

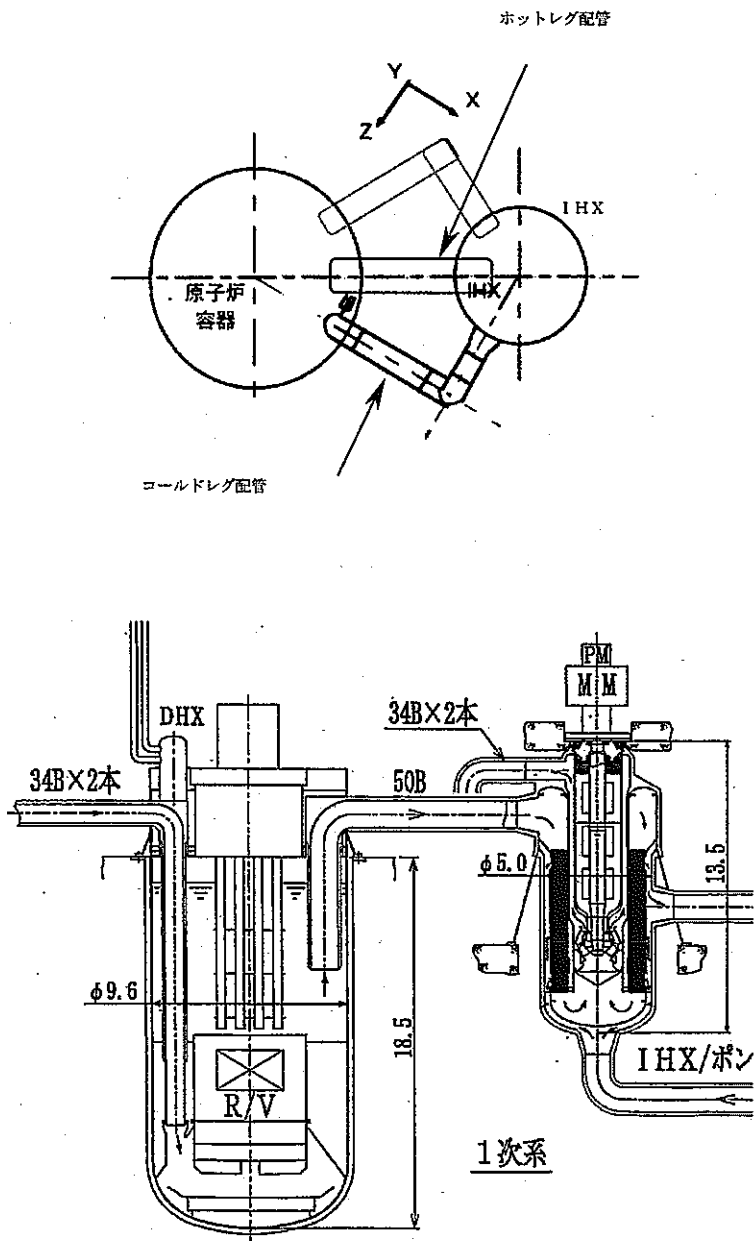


図 2.2 アドバンストープ炉の一次系配管

表 3.1-1 12Cr 系鋼の材料特性値

T(°C)	E (MPa)	ν	α (mm/mm°C)
0	211680.0	0.266	9.9E-06
100	206780.0	0.272	10.1E-06
150	203840.0	0.275	10.3E-06
200	199920.0	0.279	10.4E-06
250	196000.0	0.283	10.6E-06
300	192080.0	0.287	10.7E-06
350	187180.0	0.291	10.8E-06
400	181300.0	0.295	11.0E-06
450	176400.0	0.298	11.1E-06
500	170520.0	0.302	11.2E-06
550	162680.0	0.306	11.3E-06
600	154840.0	0.310	11.5E-06

(注) α は室温 (0~20°C) から該当温度までの平均線膨張係数

表 3.1-2 エルボの特性

プラント	もんじゅ	実証炉	アドバン スループ炉	同ロングエ ルボ
エルボの曲率半 径(mm)	1219.2	965.2	1270	1905
応力係数 C_2^*	10.15	11.69	14.11	10.77
撓性係数 k_f^{**}	19.59	24.22	32.13	21.42
エルボ曲げ剛性 (Nmm/radian)	9.21E+09	2.24E+10	2.96E+10	2.96E+10

$$*C_2 = 1.95 / (tR/r^2)^{-2/3}$$

** $k_f = 1.65 / (tR/r^2)$ t: 管の板厚, R: エルボの中心線の局率半径, r: 管の板厚
中心半径 内圧が小さいエルボに対して ASME Sec. III [4] で与えられる式

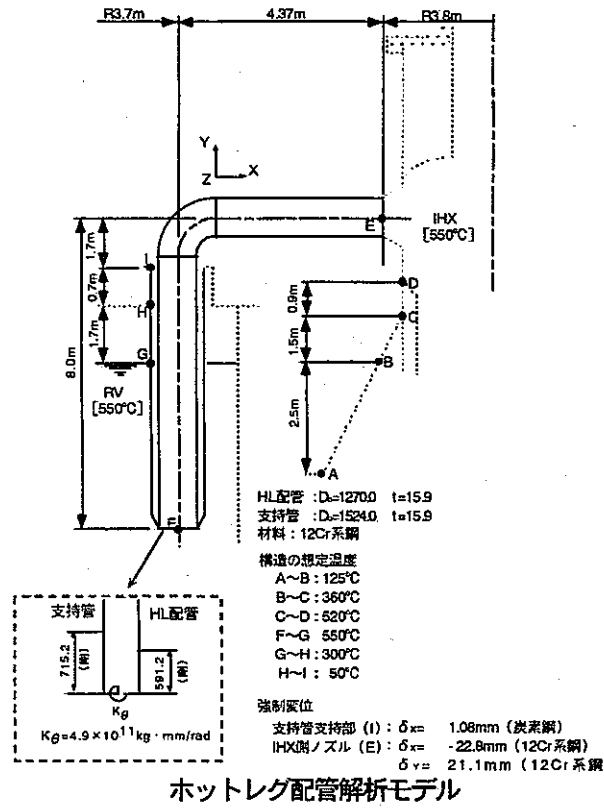


図 3.1-1 ホットレグ配管の温度条件および境界条件

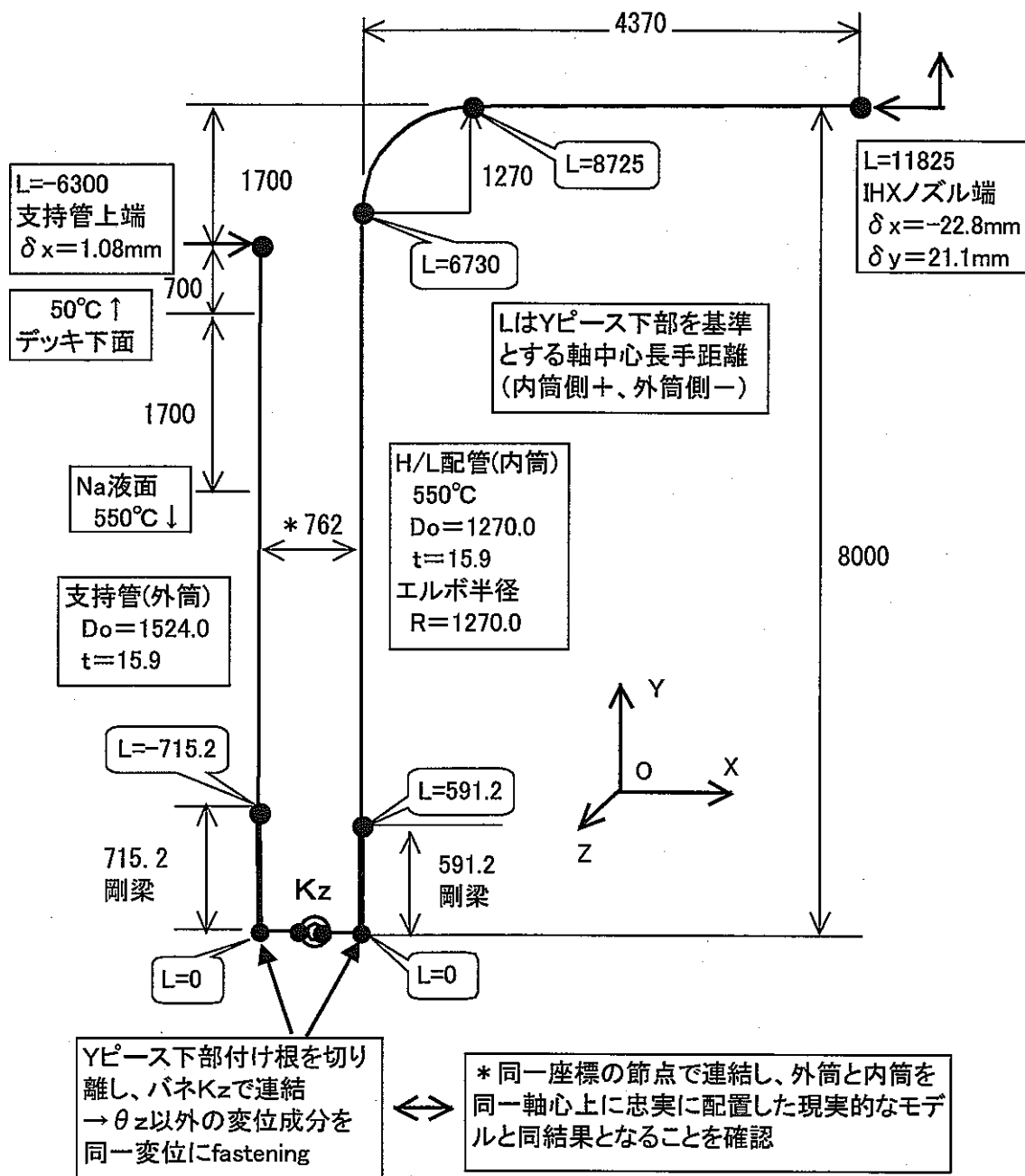


図 3.1-2 ホットレグ配管の梁解析モデル

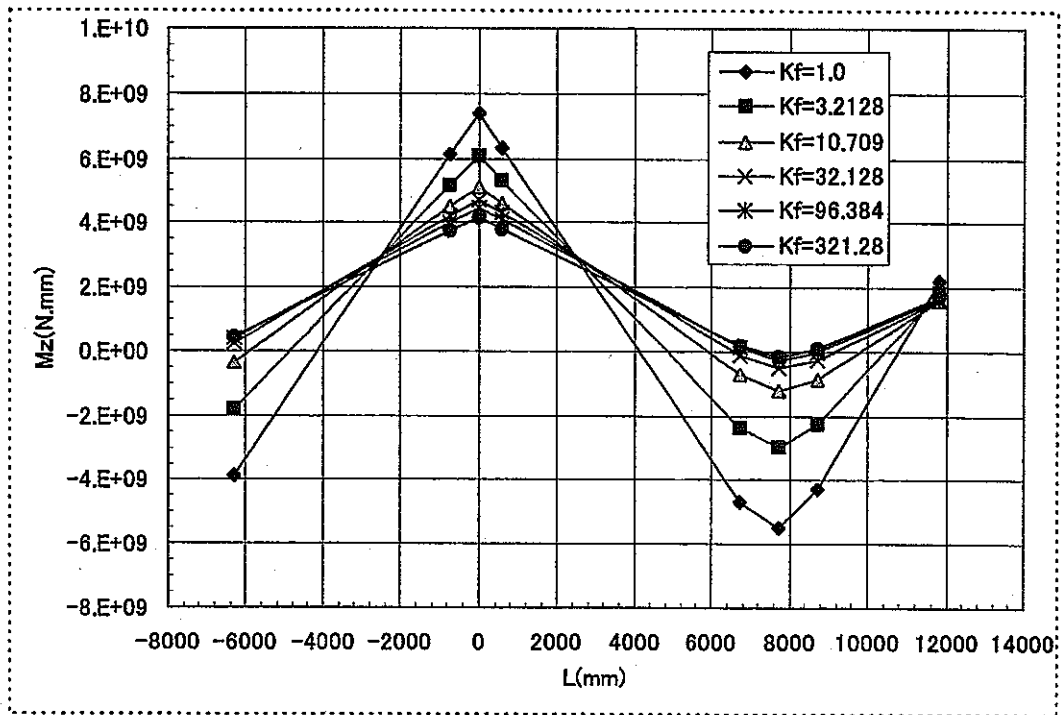


図 3.2-1 エルボ撓性係数パラメータ感度 (モーメントの変化)

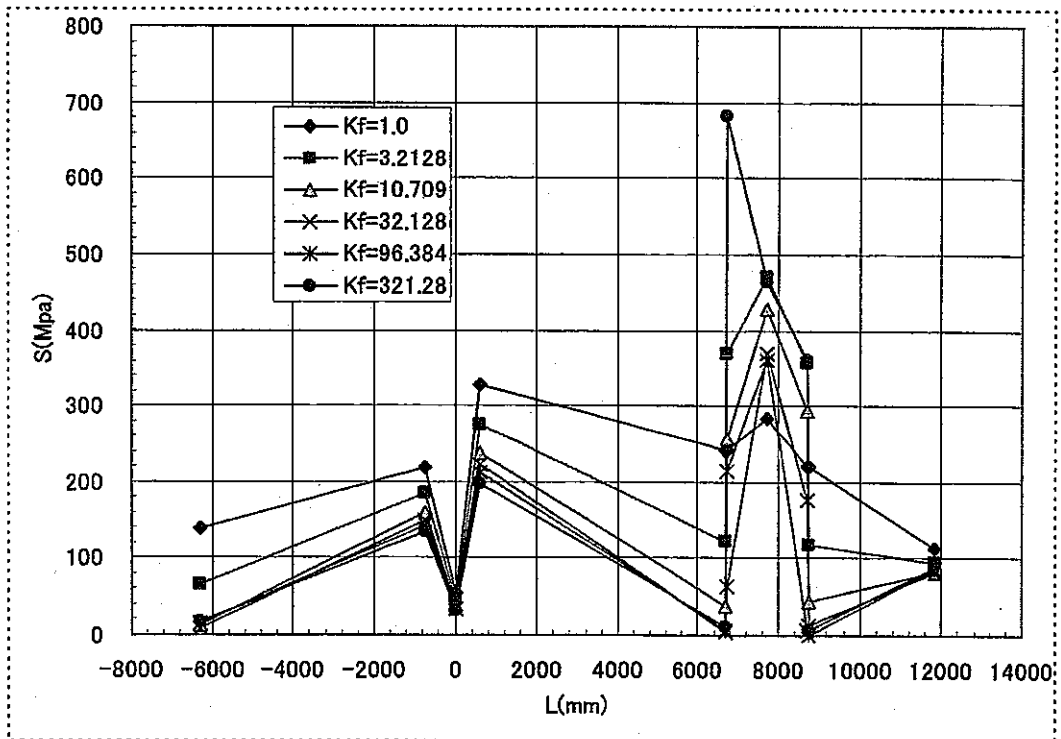


図 3.2-2 エルボ撓性係数パラメータ感度 (応力の変化)

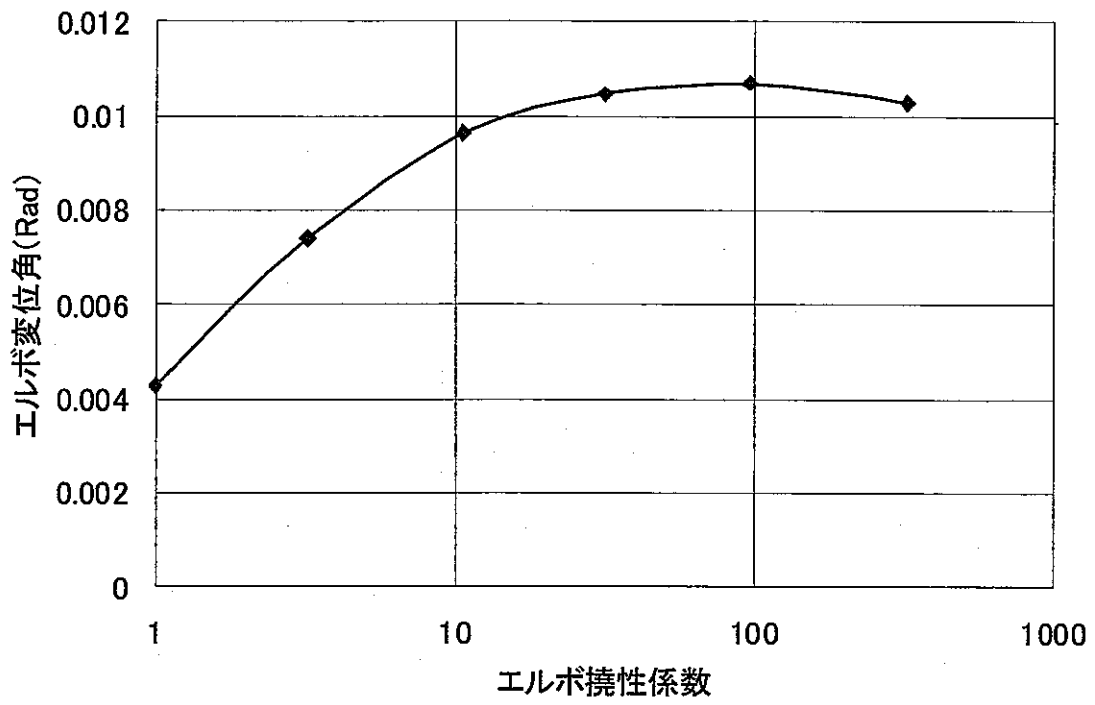


図 3.2-3 エルボ撓性係数パラメータ感度 (エルボの角変位)

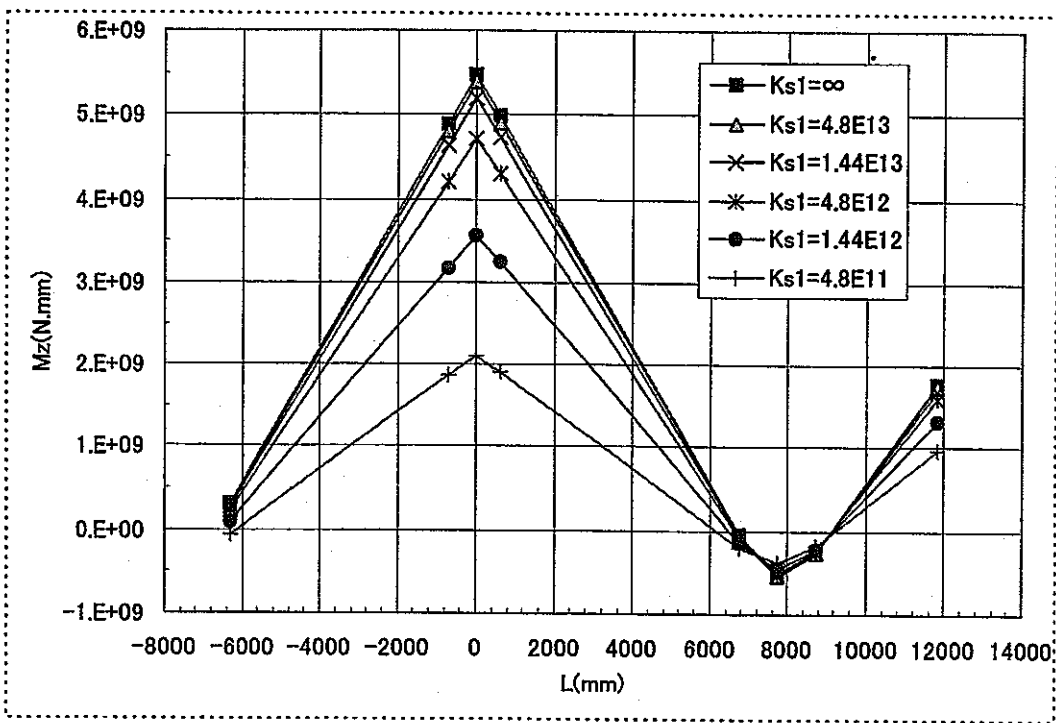


図 3.3-1 Y ピース剛性パラメータ感度 (モーメントの変化)

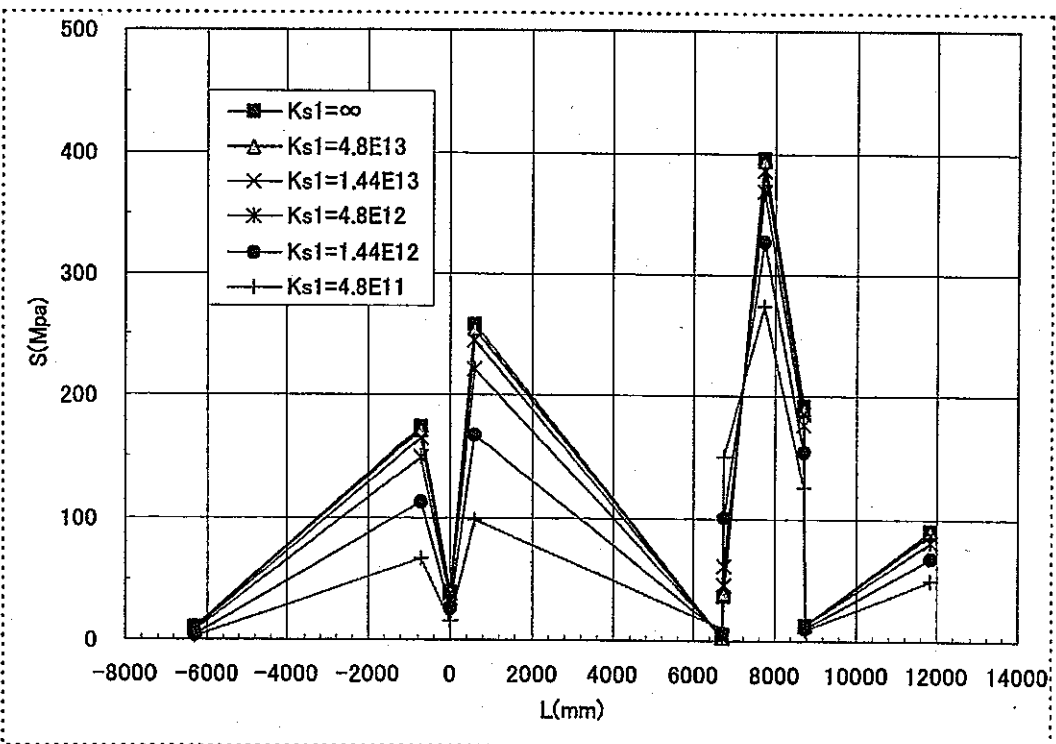


図 3.3-2 Y ピース剛性パラメータ感度 (応力の変化)

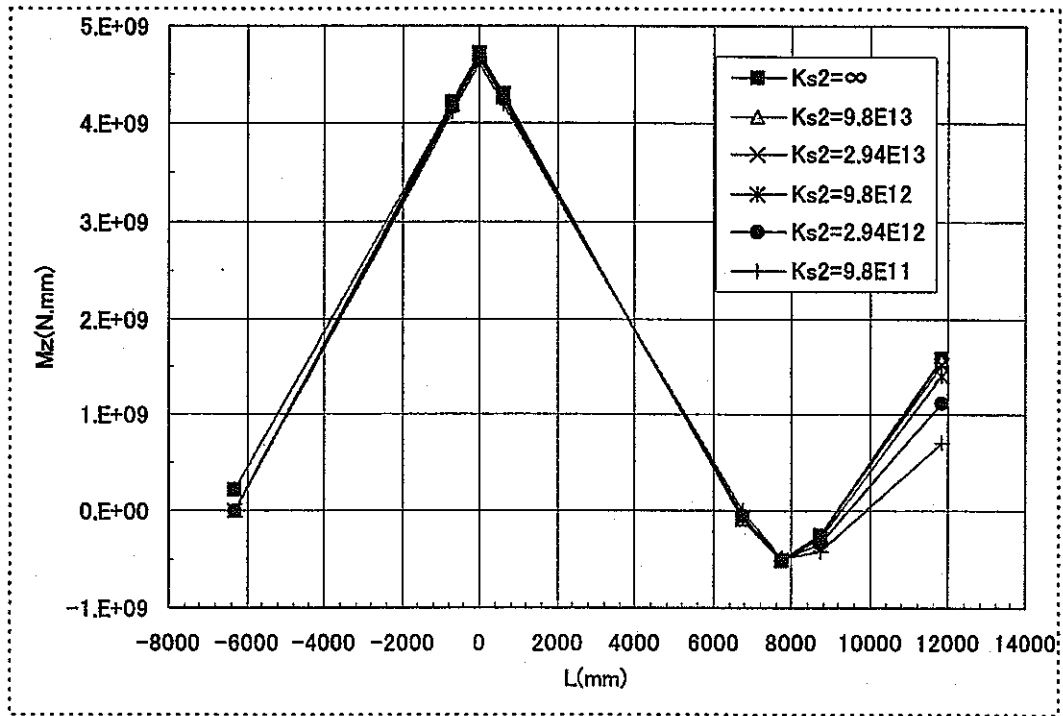


図 3.4-1 IHX ノズル剛性パラメータ感度 (モーメントの変化)

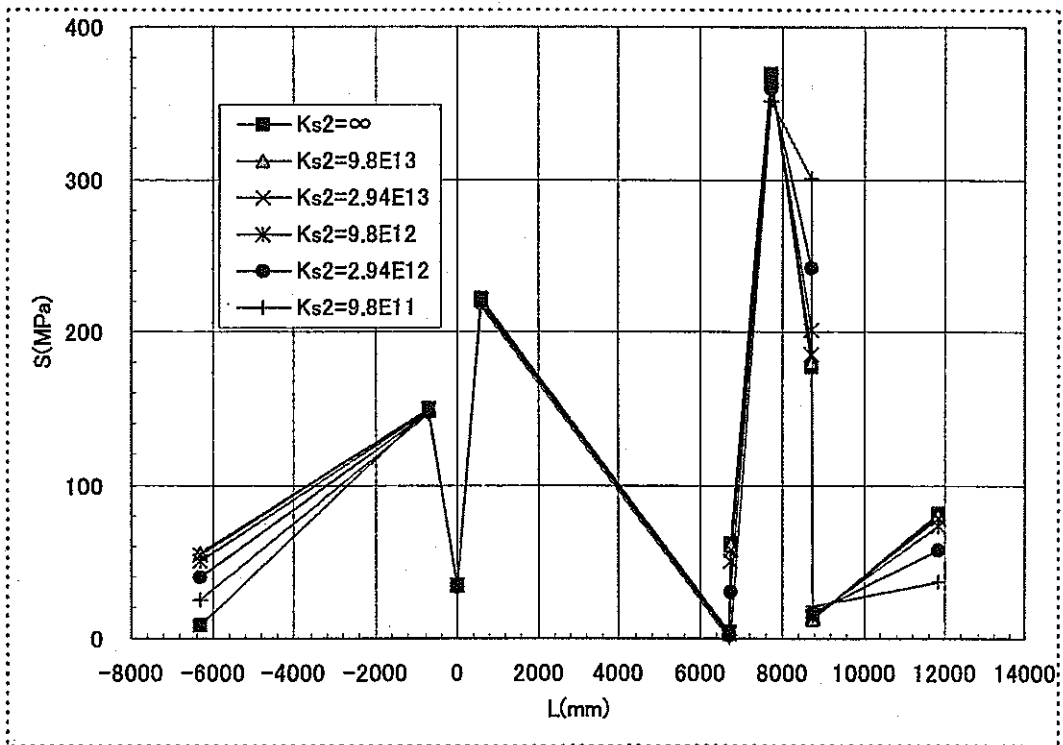


図 3.4-2 IHX ノズル剛性パラメータ感度 (応力の変化)

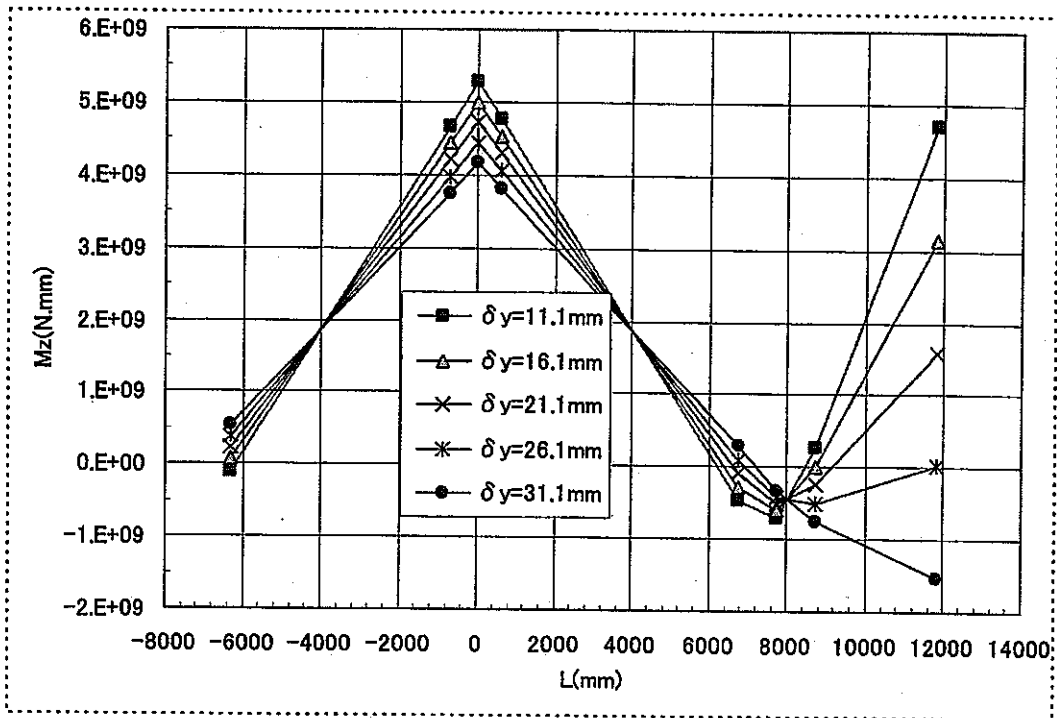


図 3.5-1 鉛直相対変位パラメータ感度 (モーメントの変化)

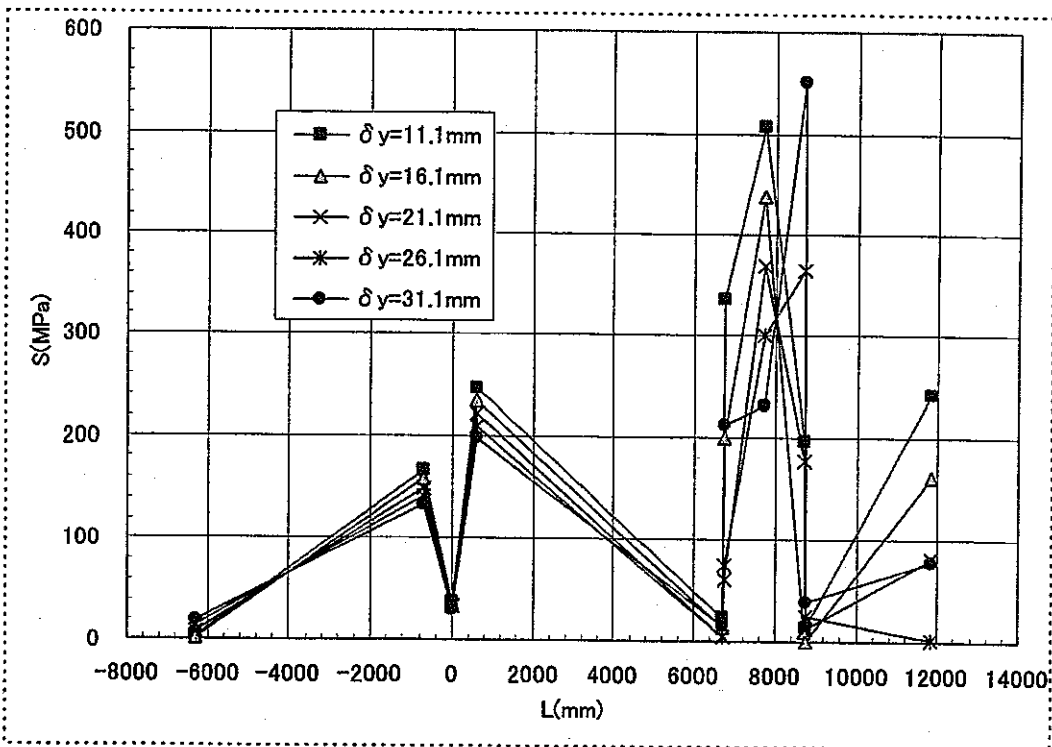


図 3.5-2 鉛直相対変位パラメータ感度 (応力の変化)

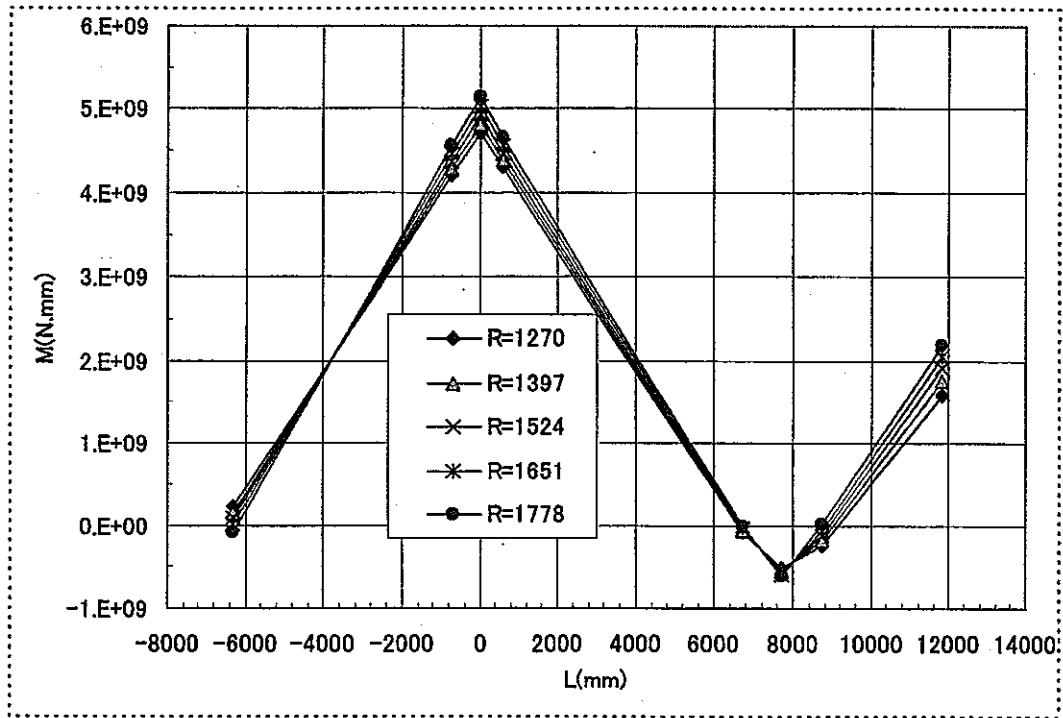


図 3.6-1 エルボ曲げ半径パラメータ感度 (モーメントの変化)

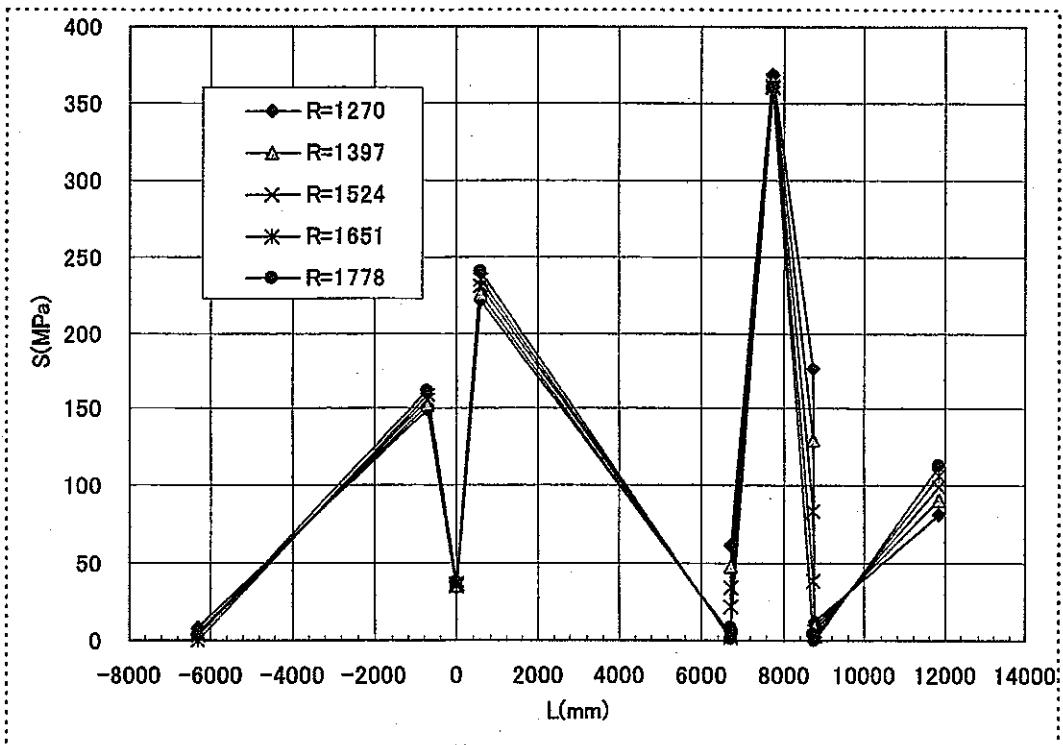


図 3.6-2 エルボ曲げ半径パラメータ感度 (応力の変化)