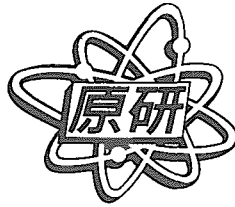


JAERI-Tech
2003-064



JP0350553



JMTR計測用配管のき裂発生原因の調査報告書
(配管部の振動解析と応力解析の結果)

2003年7月

埴 悟史・橘 幸男・伊与久 達夫・石原 正博・伊藤 治彦

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

JMTR 計測用配管のき裂発生原因の調査報告書
(配管部の振動解析と応力解析の結果)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部
塙 悟史・橘 幸男⁺・伊与久 達夫⁺・石原 正博⁺⁺・伊藤 治彦

(2003年5月19日受理)

材料試験炉 (JMTR : Japan Materials Testing Reactor) は、第 147 サイクルの共同利用運転を平成 14 年 11 月 17 日から 12 月 17 日までの予定で行っていた。12 月 6 日午前 9 時 25 分に漏水検知器の警報が発報し、12 月 10 日に一次冷却系統の精製系統充填ポンプ No. 1 の出口配管に取り付けられた圧力計導管からの水漏れが、工業用テレビ (ITV) により確認されたため、同日午前 9 時 53 分に原子炉を手動停止した。

当該圧力計導管については、充填ポンプが加振源となり圧力計導管が振動し、その繰り返し荷重によりき裂が発生・進展した可能性がある。このため、当該部の振動解析と応力解析を実施した。振動解析の結果、充填ポンプ No. 1 圧力計導管の固有振動数は 53~58Hz 程度と推定され、共振周波数である 50Hz (充填ポンプ回転数) に近い状態にあった。

応力解析の結果、振動により当該圧力計導管に発生する応力は固有振動数 53Hz で 63MPa、58Hz で 25MPa と求められた。振動による応力と、自重と内圧による応力の合計値を計算すると、固有振動数 53Hz で 112.2MPa、58Hz で 74.2MPa になる。これらの発生応力は使用材料の疲れ限度に近い値を示し、充填ポンプ No. 1 の圧力計導管に生じたき裂は、充填ポンプの振動に起因する疲労によるものと推測された。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

+ 高温工学試験研究炉開発部

++ 核熱利用研究部

Report on Investigation of Cause of Crack at Instrumentation Pipe in JMTR
(Results of Vibration and Stress Analysis)

Satoshi HANAWA, Yukio TACHIBANA⁺, Tatsuo IYOKU⁺
Masahiro ISHIHARA⁺⁺ and Haruhiko ITO

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 19, 2003)

In the 147cycle operation, the water leakage was found at the pressure instrumentation pipe which is attached to the exit pipe of No.1 charge pump of the purification system of primary cooling system at JMTR in the Oarai establishment, JAERI. Then JMTR was shut down manually on December 10th, 2002.

It was predicted that the crack on the pressure instrumentation pipe was initiated and propagated by the cyclic load due to vibration of the charge pump operation. Therefore, vibration and stress analyses of pressure instrumentation pipe were performed. From the vibration analysis, the natural frequency of the pressure instrumentation pipe of No.1 charge pump is estimated in the range from 53 to 58Hz, which is close to the resonance frequency of 50Hz.

From the stress analysis results, total stress generated on the pressure instrumentation pipe is 112.2MPa at the natural frequency of 53Hz and 74.2Mpa at 58Hz. It was found that the stress of 112.2MPa is close to the fatigue limit of the component materials.

Keywords : JMTR, Primary Cooling System, Water Leakage, Pipe, Vibration,
Stress Analysis, Fatigue

+ Department of HTTR Project

++ Department of Advanced Nuclear Heat Technology

目 次

1. 緒言	1
2. 設備概要	1
3. 加振試験	2
3.1 試験方法	2
3.2 計測システム	2
3.3 試験結果	3
4. 振動解析	3
4.1 固有値解析	3
4.2 動的時刻歴解析による振動荷重の評価	5
5. 応力解析	5
5.1 振動荷重による応力	5
5.2 自重による応力	6
5.3 内圧による応力	6
6. 考察	6
6.1 「基準ケース」の応力による検討	6
6.2 振動特性からの検討	6
7. まとめ	7
謝 辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Primary Cooling System	1
3. Vibration Test	2
3.1 Experimental Procedure	2
3.2 Measurement System	2
3.3 Experimental Results	3
4. Vibration Analysis	3
4.1 Eigenvalue Analysis	3
4.2 Evaluation of The Load by Dynamic Analysis	5
5. Stress Analysis	5
5.1 Vibration	5
5.2 Gravity	6
5.3 Pressure	6
6. Discussion	6
6.1 Discussion with the Stress	6
6.2 Discussion with The Vibration Characteristics	6
7. Conclusion	7
Acknowledgements	8
References	8

1. 緒言

材料試験炉（JMTR：Japan Materials Testing Reactor）は、熱出力 50MW の軽水減速軽水冷却タンク型の汎用型材料試験炉で、昭和 43 年に初臨界を達成し、昭和 46 年から全出力運転を行っている。JMTR は、共同利用施設として、発電用原子炉、高温ガス炉や核融合炉用の燃料・材料研究開発のための照射施設や RI 製造等に、原研内外の研究者、技術者から幅広く利用されており、平成 14 年度からは、照射誘起応力腐食割れ（IASCC）照射試験も開始している。

JMTR は平成 14 年 11 月 17 日から 12 月 17 日までの予定で第 147 サイクルを運転中、精製系統である充填ポンプ No.1 の付近から水漏れが発生し、手動で原子炉を停止した。水漏れ付近を調査した結果、充填ポンプ出口側の圧力計導管（SUS304、外径 21.7mm、厚さ 2.5mm）の分岐箇所にき裂が発生し、そこから水が漏れていることを確認した。なお、水漏れの詳細については別途報告¹⁾されている。水漏れの原因として、充填ポンプが加振源となり、圧力計導管が振動し、その繰り返し荷重によりき裂が発生又は進展した可能性が考えられた。そのため、圧力計導管のき裂発生又は進展の原因を推定することを目的として、当該部の振動解析及び応力解析を実施した。

本報告は、圧力計導管に生じたき裂の発生原因調査の一環として実施した、充填ポンプ圧力計導管に係る振動解析と応力解析の結果をまとめたものである。

2. 設備概要

充填ポンプは一次冷却設備の精製系統の一部を構成する機器である。一次冷却設備の系統図を図 2.1 に示す。精製系統は、一次冷却水の脱気及び水質の維持を行うためのもので、脱気タンク及び付属機器、移送ポンプ、充填ポンプ、イオン交換塔、フィルタ、処理水タンク、配管、弁等から構成される。当該系統は、主循環系統の主循環ポンプ入口ヘッドから一次冷却水の一部を分流し、原子炉内で水の放射線分解によって発生した水素ガス、酸素ガス及び冷却水中の溶存ガスを脱気タンクで常圧脱気を行う。その後、イオン交換塔及び出入口フィルタによって不純物の除去並びに pH の調整を行った後、処理水タンクを経て分流した冷却水を主循環系統へ戻す。ここで、充填ポンプは精製系統で処理された一次冷却水を処理水タンクから主循環系統へ戻す性能を有し、設置される台数は 2 台（1 台は予備）で相互に自動起動が可能である。

充填ポンプ出口配管の鳥瞰図を図 2.2 に示す。充填ポンプの圧力計導管（15A、Sch20S）は、充填ポンプの出口側配管（65A、Sch20S）と溶接にて接合されている。

圧力計導管には、圧力計用の止弁が設けられている。止弁から先の圧力計廻り取付配管を図 2.3 に示す。異径アダプター以降のキャピラリーコイルから圧力計までは、圧力計導管の振動に影響を与えない構造としている。なお、圧力計導管の設計条件は、以下の通りである。

- ・圧力 ; 最高使用圧力 22kg/cm²、 運転時圧力 (通常時) 20kg/cm²
 - ・温度 ; 最高使用温度 70℃、 運転時温度 (通常時) 45℃ * 1
- *1 K塔入口温度履歴から推定。

3. 加振試験

3.1 試験方法

実機における固有振動数を確認するために、加振試験を実施した。配管系の振動特性を把握するための振動試験法²⁾は数種類存在するが、測定対象物の形状及び試験方法の簡便さから、今回の試験ではハンマリング法を採用した。試験に際しては、充填ポンプ No.1 側の圧力計導管部にき裂が生じていることから、健全かつ同一構造である充填ポンプ No.2 側の圧力計導管部を試験対象とした。なお、加振試験は配管内の水を抜いた状態で実施した。加振位置及び計測位置を図 3.1 に示す。加振位置は、仕切弁の弁箱、逆止弁の蓋及び充填ポンプのケーシングフランジの 3 カ所である。加振は一カ所について、水平 2 方向及び垂直 1 方向に対してそれぞれ 3 回行った。圧力計導管部の固有振動数は、止弁の弁箱部及びハンドル部について水平 2 方向及び垂直 1 方向を測定した。

3.2 計測システム

固有振動数の測定には、リオン社製携帯型振動計 VM-61 を使用した。振動計からの出力はデータレコーダ (SONY 製 PC200Ax) に取り込み FFT 処理を行った。計測システムの基本仕様を以下に示す。

(1) 振動センサー

形式・構造	:	PV-57 せん断型圧電式
感度	:	50mV/G±3%
振動数範囲	:	1~5000Hz (±10%)

(2) 振動計

周波数範囲	:	3~5000Hz	(振動加速度測定時)
		3~3000Hz	(振動速度測定時)
		10~500Hz	(振動変位 0.003~10mm 測定時)
		3~500Hz	(振動変位 0.03~10mm 測定時)

測定範囲	:	0.03～100m/s ² (振動加速度測定時)
		0.03～100cm/s (振動速度測定時)
		0.003～10mm (振動変位 10～500Hz 測定時)
		0.03～10mm (振動変位 3～500Hz 測定時)
測定項目	:	振動加速度 ([m/s ²]、[G])、振動速度 ([cm/s])、 振動変位 ([mm])

3.3 試験結果

加振試験の結果を表 3.1 に示す。充填ポンプ No.2 の圧力計導管部における 1 次の固有振動数は 60～65Hz であり、測定値は約 5Hz 程度のばらつきを有していた。

4. 振動解析

4.1 固有値解析

圧力計導管部を、集中荷重を有するはりとしてモデル化し、充填ポンプ No.1 圧力計導管の固有振動数を解析的に検討した。簡易公式による固有振動数の算出及び有限要素法 (FEM) による解析を行い、両者の結果を比較することで FEM コードでのモデル化の妥当性を確認した。その後、試験結果と解析結果を比較しモデルの改良を行った。圧力計導管付近の寸法測定位置を図 4.1 に、寸法測定記録を表 4.1 に示す。なお、止弁 (V-22-165) の重量は 6.4kg である。

4.1.1 簡易公式による固有振動数の算出

(1) 算出方法

圧力計導管と止弁を、集中荷重 (止弁) をもつ片持ちはり (長さ L) でモデル化し、固有振動数 ω を求めた。解析モデルを図 4.2 に、モデル諸元を表 4.2 に、材料物性値を表 4.3 に示す。固有振動数の算出には、レーリー・リッツの方法を用いた³⁾。計算式を以下に示す。

$$\omega^2 = 3 \frac{1 + \left(\frac{3}{4}\right)\alpha + \left(\frac{3}{20}\right)\alpha^2}{1 + \left(\frac{138}{140}\right)\alpha + \left(\frac{13}{40}\right)\alpha^2 + \left(\frac{9}{250}\right)\alpha^3} \cdot \frac{gEI}{Wl^3}$$

$$\alpha = \frac{\gamma A l}{W}$$

* ω : 固有角振動数 g : 重力加速度 E : 縦弾性係数 I : 断面二次モーメント
 W : 集中荷重 l : はり長さ γ : 単位体積当たり重量 A : 断面積

圧力計導管の長さは、充填ポンプ No.1 側と充填ポンプ No.2 側で若干異なり、その値はそれぞれ 112mm、105mm である。配管系の固有振動数はその長に影響されることから、固有振動数の算出は充填ポンプ No.1 側と No.2 側の両者について行った。

(2) 計算結果

計算の結果、圧力計導管の固有振動数 ω は、充填ポンプ No.1 側で 106Hz (はりの長さ $L=112\text{mm}$)、充填ポンプ No.2 側で 117Hz (はりの長さ $L=105\text{mm}$) であった。

4.1.2 FEM による解析

(1) 解析方法

FEM (有限要素法) により圧力計導管の固有振動数を算出するために、圧力計導管と止弁をはり要素と質点でモデル化した。解析には汎用構造解析有限要素コード ABAQUS⁴⁾を使用した。解析モデルは、4.1.1 項で行った簡易公式による算出に用いたものと同じであり、図 4.2 に示すように充填ポンプ出口側の配管 (65A) を剛と仮定し、この配管との接合部を固定した片持ちはり (長さ L) として、反対側に止弁の荷重を集中させたモデルとした。モデル諸元を表 4.2 に、解析に使用した物性値を表 4.3 に示す。

(2) 解析結果

解析の結果、1 次モードの固有振動数 ω は、充填ポンプ No.1 側で 105Hz (はりの長さ $L=112\text{mm}$)、充填ポンプ No.2 側で 115Hz (はりの長さ $L=105\text{mm}$) であった。なお、本解析は、4.1.1 項の簡易公式による算出と同じモデルを用いており、両者ともほぼ同じ値を示していることから、FEM によるモデル化は妥当であると言える。

4.1.3 試験結果に基づく解析モデルの改良

(1) 検討方法

加振試験による固有振動数は、充填ポンプ No.2 側で 61~66Hz であるのに対して、FEM による解析結果は 115Hz と高い値となっている。この原因は、モデル化に際し充填ポンプ出口側の配管 (65A) を剛と仮定しているためと考えられる。このため、試験結果に基づきこの配管の剛性を考慮した改良モデルを検討した。具体的には、図 4.3 に示すように、配管と圧力計導管を直列バネと捉え、配管の剛性分だけはりの長さを追加し、解析解が試験結果を再現できる充填ポンプ出口側の配管剛性、すなわち直列バネであるはりの長さを検討した。使用した FEM コードは ABAQUS である。なお、モデル諸元及び物性値は 4.1.2 項と同様である。

(2) 検討結果

解析の結果、試験結果に対応するための充填ポンプ出口側の配管剛性、すなわち

直列バネとなるはりの長さは 50mm となった。また、充填ポンプ No.1 側の圧力計導管の固有振動数は 59Hz 程度となり、圧力計導管内の水の効果や測定値のばらつきを考慮することにより、運転時の固有振動数は、53～58Hz 程度であると推定された。

4.2 動的時刻歴解析による振動荷重の評価

(1) 解析方法

充填ポンプ No.1 の出口側の圧力計導管部に作用する繰り返し荷重を求めるために、動解析を実施した。解析には ABAQUS コードを使用し、解析モデルは 4.1.3 項で検討を行った改良モデルを用い、はり付け根部に加振力として強制変位を与えた。圧力計導管に作用する加振力は、充填ポンプの回転により発生するものとして、同ポンプ回転数 (3000rpm) と図 4.4 に示すポンプ運転中の振動測定結果に基づいて設定した。解析では、加振源として強制変位 F ($F=A \cdot \sin(2\pi \Omega t)$, $A=6\mu\text{m}$, $\Omega=50\text{Hz}$) を入力波とした 2 秒間の時刻歴解析を実施した。解析モデルを図 4.5 に、モデル諸元を表 4.4 に示す。また、使用した物性値を表 4.5 に、入力条件を表 4.6 に示す。以下、この代表的な状態の解析を、「基準ケース」と呼ぶ。

(2) 解析結果

振動によりはりに作用する荷重は、曲げモーメントが支配的であり、「基準ケース」での曲げモーメントの最大値は、加振周波数 50Hz の場合で 3.3Nm であった。

5. 応力解析

通常運転時に圧力計導管に発生する応力を評価した。考慮する事象は、ポンプ振動、自重及び内圧である。

5.1 振動荷重による応力

5.1.1 簡易評価

片持ちはりに、3.3Nm の曲げモーメント (M) が作用しているとして、曲げ応力 σ_b を計算すると、以下のようになる。

$$\sigma_b = M/Z = 5.1 \text{ MPa} \quad (Z: \text{断面係数})$$

ここで、はりの付け根部では応力集中が発生するため、これを試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準⁵⁾ (以下、「構造等の技術基準」という。) の第 47 条で規定されている応力係数を用いて考慮すると、当該部の応力係数は 4.2 であり、最大応力は 21MPa となった。

5.1.2 FEM を用いた評価

充填ポンプ No.1 出口側の圧力計導管部の応力分布を知るために、FEM による応力解析を行った。解析には ABAQUS コードを用い、解析モデルは、図 5.1 に示すように、圧力計導管、充填ポンプの出口側配管及び溶接部を対象とした 3 次元モデルとした。モデルには、3 次元ソリッド要素を用い、節点数は 8569、要素数は 6745 である。荷重条件は、3.3Nm の曲げモーメントとなるよう、はりの頂部に荷重を負荷した。

き裂が発生した圧力計導管部の応力分布を図 5.2 に示す。応力解析の結果、発生応力の最大値は 6.4MPa で、最大応力の発生部位は圧力計導管溶接部近傍であった。

5.2 自重による応力

止弁の重量 W (6.4kg) 及び圧力計導管溶接部と止弁中心までの距離 L (0.112m) から求まる曲げモーメントは 7Nm である。この曲げモーメントにより発生する応力を、5.1 節と同様に簡易評価、FEM で算出すると以下のようなになる。

- ・簡易計算 : 44.9MPa
- ・FEM を用いた計算 : 13.6MPa

5.3 内圧による応力

過去の検討資料によれば、最高使用圧力(22kg/cm²)の条件で、内圧により圧力計導管に発生する応力は 4.7MPa である。このことから、圧力計導管に通常時圧力 20kg/cm² が作用していると仮定して、内圧による応力を求めると 4.3MPa となる。

6. 考察

6.1 「基準ケース」の応力による検討

「基準ケース」での応力解析の結果を表 6.1 に示す。振動、自重及び内圧による応力の合計値は、簡易評価で 70.2MPa、FEM を用いた評価で 24.3MPa となる。ここで、70.2MPa が圧力計導管に作用したとしても、図 6.1 に示すように、構造等の技術基準⁵⁾の疲労線図曲線 B での許容繰返し回数 10^{11} における繰返しピーク応力強さ 115MPa を下回り、振動によるき裂の発生は想定し難い。

6.2 振動特性からの検討

振動により圧力計導管に作用する荷重は、加振力の周波数に依存するとともに、圧力計導管の固有振動数の変化に依存する。固有振動数は、圧力計導管中の水の効果により約 1Hz 低下し、充填ポンプ No.2 側の加振試験によれば固有振動数は 5Hz

程度ばらつく。その他、腐食やき裂の発生等による圧力計導管の剛性低下等によっても固有振動数は低下する。

この影響を調べるために、充填ポンプ No.1 側に対する一般化した曲げモーメントの周波数特性を検討した。検討結果を図 6.2 に示す。横軸は、加振源の周波数 Ω を固有振動数 ω で除して無次元化した周波数 $h (= \Omega / \omega)$ をとり、縦軸に曲げモーメント M を $\Omega = 50\text{Hz}$ での曲げモーメント M_{50} で除して無次元化した曲げモーメントの倍率 $V (= M / M_{50})$ を示す。

図 6.2 において、「基準ケース」の固有振動数は約 59Hz である。圧力計導管内の水を考慮する (1Hz 低下) と、固有振動数は約 58Hz となり、更に、充填ポンプ No.2 側の加振試験による固有振動数測定のはらつき (約 5Hz) を保守的に考慮すると、充填ポンプ No.1 側の固有振動数は約 53Hz になると推定される。図 6.2 から、以下のことが分かる。

- ・固有振動数 58Hz の場合、無次元周波数 h は 0.86 で、曲げモーメントの倍率 V は 1.2 と大きくなる。この結果、振動により発生する応力は 25MPa と「基準ケース」に比べ 4MPa 増加する。また、自重と内圧による応力を加算すると、合計応力は 74.2MPa となる。
- ・固有振動数 53Hz の場合、無次元周波数 h は 0.94 で、曲げモーメントの倍率 V は 3 と大きくなる。この結果、振動により発生する応力は 63MPa と「基準ケース」に比べ 42MPa 増加する。また、自重と内圧による応力を加算すると、合計応力は 112.2MPa となり、構造等の技術基準⁵⁾の疲労線図曲線 B での許容繰返し回数 10^{11} における繰返しピーク応力強さ 115MPa に近づく。
- ・充填ポンプ No.1 側の圧力計導管は共振に近い状態にあり、固有振動数が何らかの原因により低下する等して無次元周波数 h が 1 に近づけば、振動により発生する応力も急激に増加する可能性がある。
- ・上記の各要素から、充填ポンプ No.1 の圧力計導管に生じたき裂は、充填ポンプの振動に起因する疲労によるものと推測される。
- ・充填ポンプ No.1 の圧力計導管は、充填ポンプ No.2 側に比べて固有振動数が共振周波数である 50Hz (充填ポンプの回転数) に近く、無次元周波数 h がより 1 に近くなることから、充填ポンプ No.1 の圧力計導管に優先的にき裂が発生・進展したものと推測される。

7. まとめ

圧力計導管部を対象とした振動解析と応力解析を行い以下の結果を得た。

- (1) 充填ポンプ No.2 の水を抜いた状態での加振試験の結果、圧力計導管の固有振動数は 60~65Hz の範囲にあり、測定値は 5Hz 程度ばらついた。

- (2) 充填ポンプ No.1 側の圧力計導管の「基準ケース」での固有振動数は 59Hz 程度となる。圧力計導管内の水の効果や測定値のばらつきを考慮することにより、運転時の固有振動数は、53~58Hz 程度と推定した。なお、充填ポンプ No.1 と No.2 では、圧力計導管の長さが違うことにより、圧力計導管部の剛性と固有振動数が両者で異なる。
- (3) 充填ポンプ No.1 の圧力計導管は、充填ポンプ No.2 側に比べて固有振動数が共振周波数である 50Hz (充填ポンプの回転数) により近いことから、優先的にき裂が発生・進展したものと推測される。
- (4) 充填ポンプを加振源とした動的時刻歴解析によれば、充填ポンプ No.1 側の圧力計導管に作用する曲げモーメントは「基準ケース」で 3.3Nm となるが、固有振動数が減少することにより、曲げモーメントは増加する。
- (5) 固有振動数 53Hz の場合、振動による応力は 63MPa で、自重と内圧による応力を加算した合計応力は 112.2MPa となり、構造等の技術基準の疲労線図曲線 B での許容繰返し回数 10^{11} における繰返しピーク応力強さ 115MPa に近づく。
- (6) 毎分 3000 回転 (50Hz) で運転されていた充填ポンプの出口に近接して取り付けられていた圧力計導管は、わずかな振動特性の変化により共振に近づく可能性がある。
- (7) 充填ポンプ No.1 の圧力計導管に生じたき裂は、充填ポンプの振動に起因する疲労によるものと推測された。

謝 辞

振動試験の実施にあたり、高温工学試験研究炉開発部の HTTR 試験室鎌田崇室長代理および試験実施担当の方々に多大なるご支援を頂いた。また、本報告書を纏めるに当たり、材料試験炉部の藤木和夫次長 (現 ワシントン事務所長)、小森芳廣照射第 1 課長 (現 材料試験炉部次長) に有益なコメントを頂いた。ここに謝意を表したい。

参考文献

- 1) JMTR 計測用配管水漏れ調査検討委員会、JMTR 計測用配管水漏れ調査報告書、JAERI-Review 2003-014、2003
- 2) たとえば 小林 博栄、配管系の振動試験、配管技術、No.H06、p.71(1986)
- 3) 谷口修、他、振動工学ハンドブック、養賢堂、175-177、1976。
- 4) Hibbit,karlsson & Sorensen,Inc., BAQUS Users manual Ver.5.4,1995.
- 5) 科学技術庁 原子力安全局、試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準、平成 2 年 6 月

表3.1 加振試験結果

測定箇所	加振箇所	加振方向	NO.2 充填ポンプ側 周波数 (Hz)												
			Z方向	60	65	115	225	255	266.3						
止弁 (15A) の弁箱部	仕切弁の弁箱 (A)	X	Z方向	60	65	115	225	255	266.3						
			X方向	65	187.5	265									
			Y方向	50	58.8	66.3	88.8	266.3	362.5						
		逆止弁の蓋 (B)		Z方向	60	65	115	135	145	222.5	266.3				
			X方向	60	65	266.3									
			Y方向	50	65	266.3									
止弁 (15A) のハンドル部	仕切弁の弁箱 (A)	Z	Z方向	60	65	113.8	136.3	229							
			X方向	185	266.3	363.8									
			Y方向	266.3	362.5										
		逆止弁の蓋 (B)		Z方向	63.8										
			X方向	50	63.8	183.8	263.8								
			Y方向	50	62.5	180	266.3								
止弁 (15A) の弁箱部	充填ポンプのケーシングフランジ (C)	X	Z方向	60	65	115	145	150	361						
			X方向	65	88.8	185	365								
			Y方向	50	265	362.5									
		逆止弁の蓋 (B)		Z方向	60	65	126.3	365							
			X方向	65	145	265	362.5								
			Y方向	65	115	226.3	361.3								
止弁 (15A) のハンドル部	充填ポンプのケーシングフランジ (C)	Z	Z方向	363.8											
			X方向	266.3	362.5										
			Y方向	63.8											
		逆止弁の蓋 (B)		X方向	50	65	363.8								
			Y方向	50	95	173.8	361.3								
			Z方向	63.8	123.8										
	逆止弁の蓋 (B)		X方向	365											
		Y方向	355												
		Z方向	62.5	118.8	193.8										
	逆止弁の蓋 (B)		X方向	362.5											
		Y方向	356.3												
		Z方向													

表 4.1 充填ポンプ圧力計導管まわり寸法測定結果

単位：mm

測定箇所	方位	充填ポンプ No.1	充填ポンプ No.2	
A (外径)	0° -180°	76.2	76.0	
	90° -270°	76.2	76.4	
A (肉厚) 導管側を0° とし下 から見て右回り	0°	3.6	3.6	
	90°	3.6	3.6	
	180°	3.4	3.5	
	270°	3.5	3.5	
B		39	40	
C		64	60	
D		66	60	
E		92	90	
F		163	163	
G (外径)	水平	21.8	21.7	
	垂直	21.7	21.8	
G (肉厚) 天を0° とし母管 に向かって右回り	0° (天)	2.6	2.6	
	90° (右)	2.6	2.6	
	180° (地)	2.5	2.5	
	270° (左)	2.5	2.5	
H (外径)	水平	21.9	21.7	
	垂直	21.9	21.7	
H (肉厚) 天を0° とし母管 に向かって右回り	0° (天)	2.5	2.6	
	90° (右)	2.5	2.5	
	180° (地)	2.5	2.6	
	270° (左)	2.6	2.6	
脚長 天を0° とし母管 に向かって右回り	0° (天)	a	4	4
		b	7	6
	90° (右)	a	母管曲率のため測定不能	母管曲率のため測定不能
		b		
	180° (地)	a	4	4
		b	7	7
	270° (左)	a	母管曲率のため測定不能	母管曲率のため測定不能
		b		

表 4.2 モデル諸元

	長さ	外径	内径	重量
充填ポンプ No.1側	112mm	21.7mm	16.7mm	-
充填ポンプ No.2側	105mm	21.7mm	16.7mm	-
止弁	-	-	-	6.6kg (弁+弁以降の導管重量)

表 4.3 解析に使用した物性値

	物性値	備考
密度	7800kg/m ³	
縦弾性係数	193000 N/mm ²	運転温度 50℃における値

表 4.4 モデル諸元

	モデル諸元	備考
はりの断面形状	外形 21.7mm、内径 16.7mm	中空断面形状
質点重量	6.6kg	弁重量+弁以降の導管重量
はりの長さ	162mm	充填ポンプ No.1

表 4.5 解析に使用した物性値

	物性値	備考
密度	7800kg/m ³	
縦弾性係数	193000 N/mm ²	運転温度 50℃における値

表 4.6 入力条件

入力の種類	強制変位
入力箇所	はり付け根部
入力波	$F=A \cdot \sin (2 \pi \Omega t)$, $A=6 \mu \text{m}$, $\Omega=50\text{Hz}$

表 6.1 圧力計導管部の「基準ケース」での応力解析結果

(単位 : MPa)

	荷重の種類			合計応力
	振動	自重	内圧	
簡易計算	21 (5.1) *1	44.9 (10.7) *1	4.3	70.2
FEM を用いた計算	6.4	13.6	4.3	24.3

* 1 : 材料力学の公式で求まる曲げ応力 (=曲げモーメント/断面係数) の値。この値に応力係数 4.2 を掛けて算出した値を上段に示す。

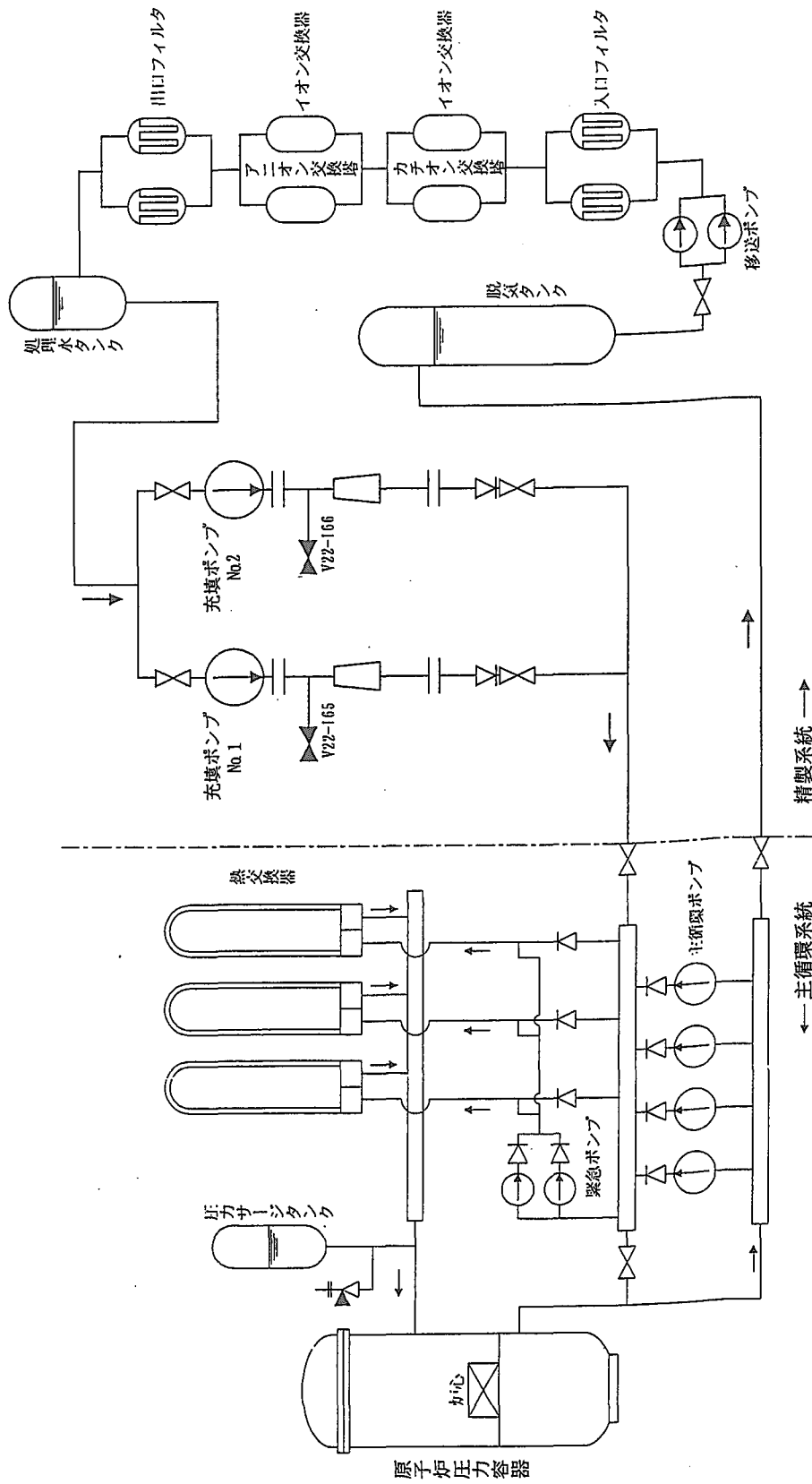


図 2.1 JMTR 一次冷却設備の系統図

凡例

記号	名称
	井
	逆止弁
	バタフライ弁
	レヂューク
	突合仕切扉
	さし込み仕切扉
	ネットワーク
	突合仕切扉付Tピース
	突合仕切扉付エルボ
	さし込み仕切扉付フランジ
	ソケット
	さし込み仕切扉付Tピース
	さし込み仕切扉付エルボ
	管サポート
	ハンガ-形管サポート

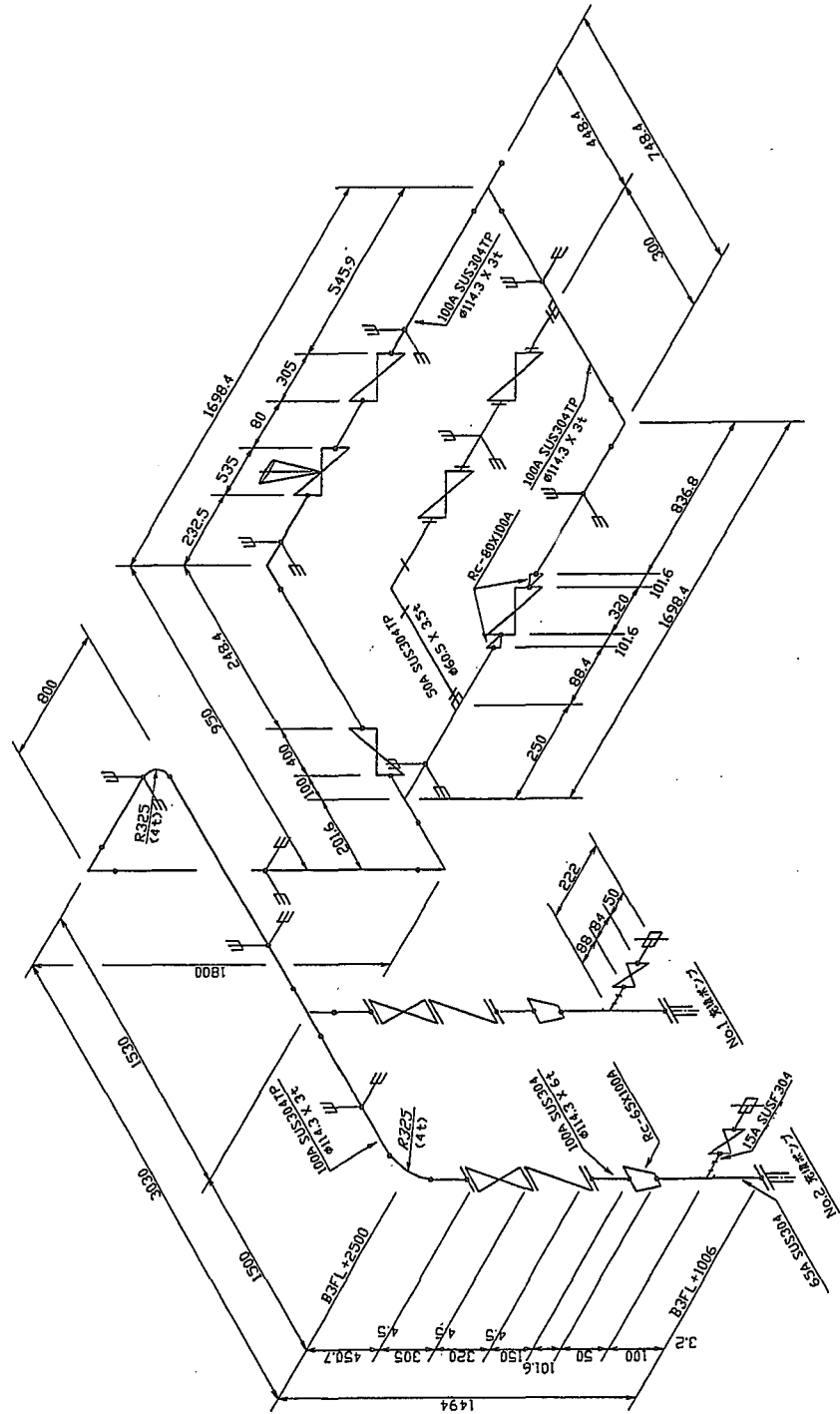


図 2.2 充填ポンプ出口配管の鳥瞰図

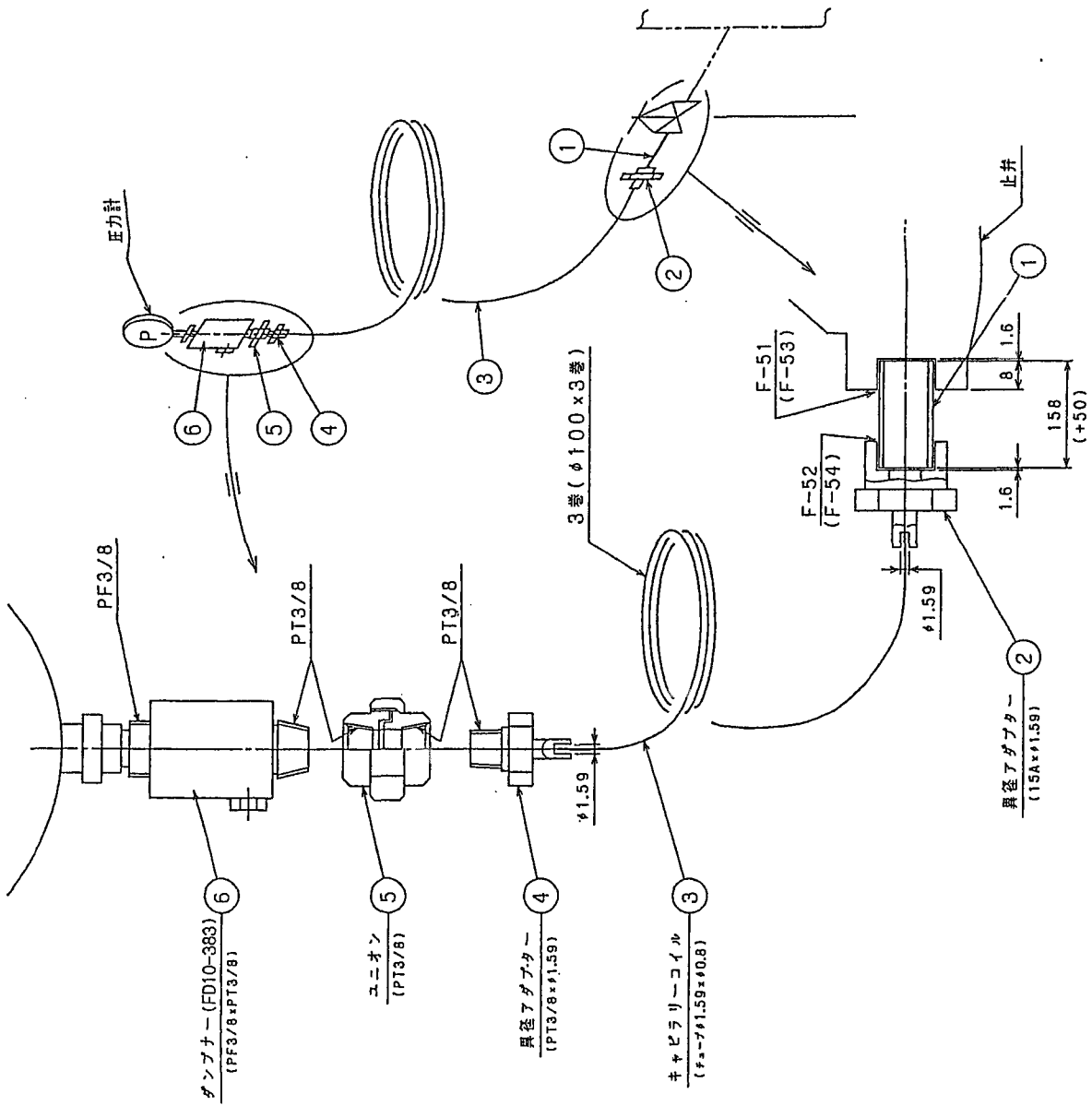


図 2.3 圧力計まわり取付配管の構造図

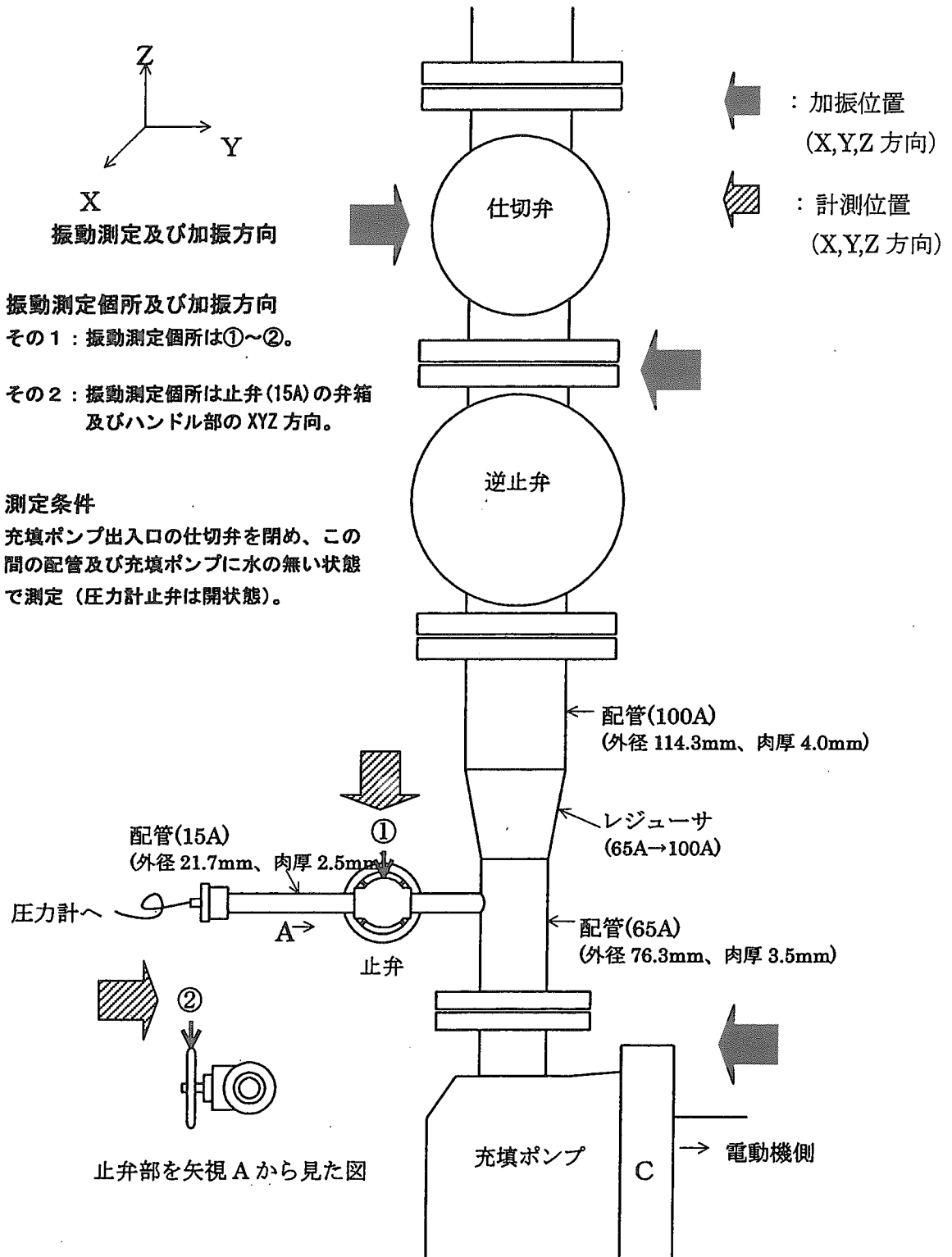


図 3.1 加振試験における加振および計測位置

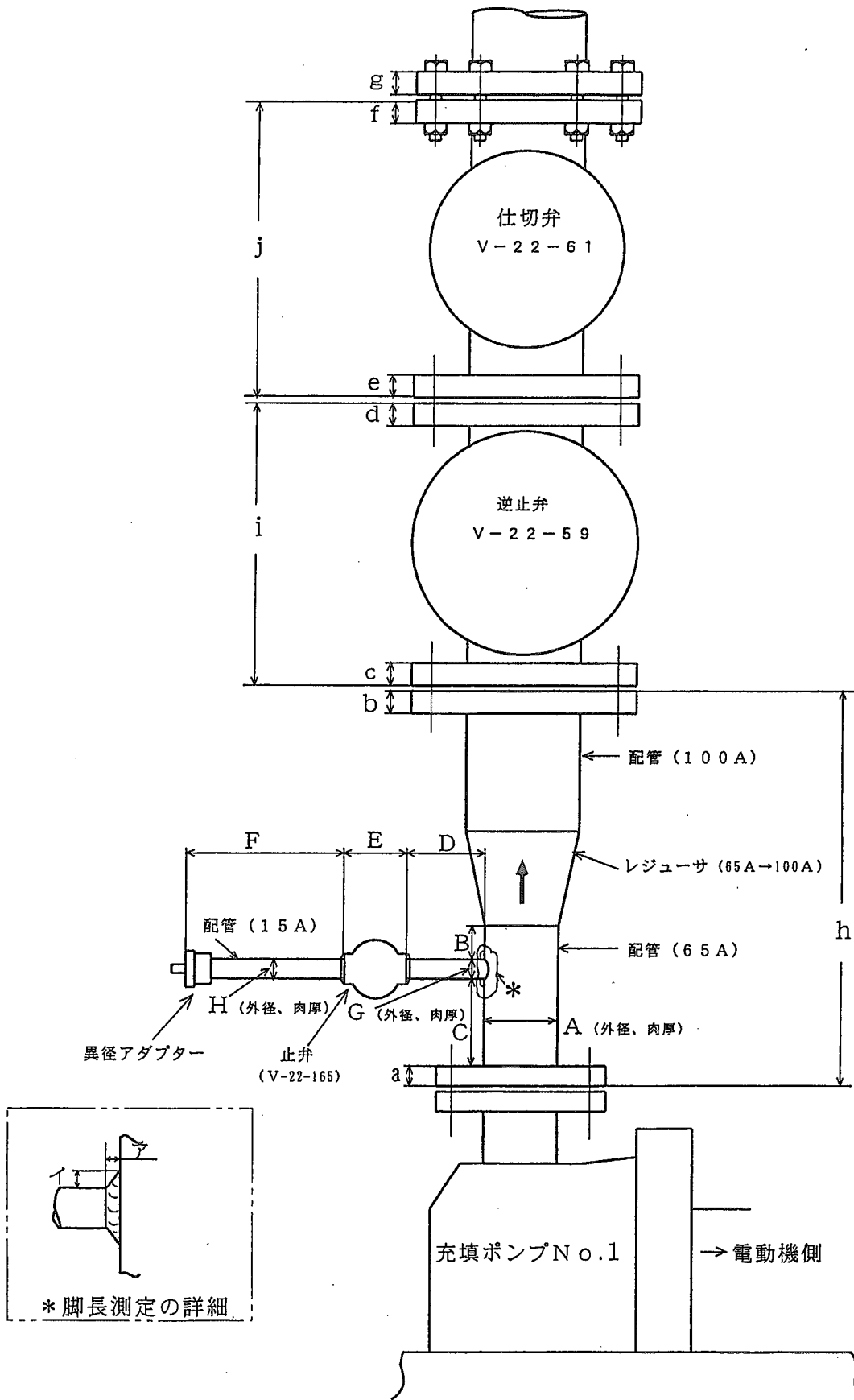


図 4.1 圧力計配管まわり寸法測定箇所

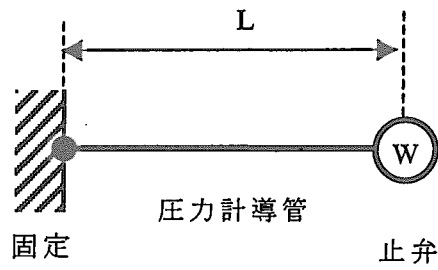
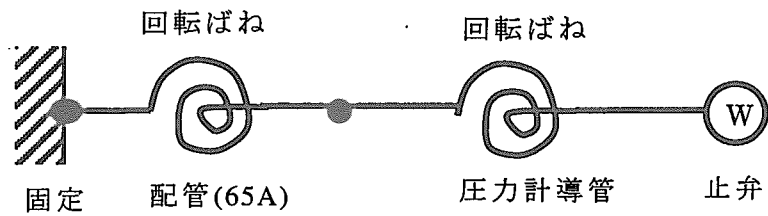
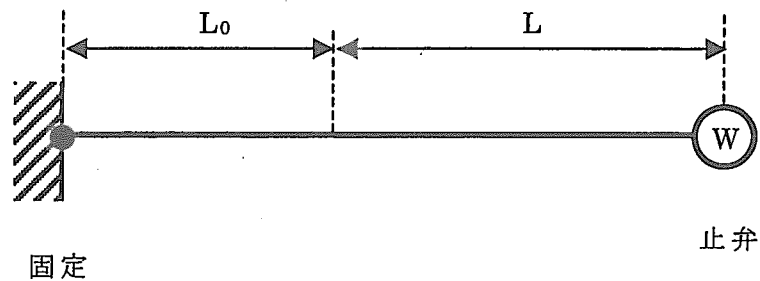


図 4.2 解析モデル



(概念図)



L_0 : 充填ポンプ出口側配管の剛性を模擬したはり (=50mm)
 (充填ポンプ No.2 圧力計導管の加振試験結果の固有振動数に一致する
 よう定めた寸法)

図 4.3 改良モデル

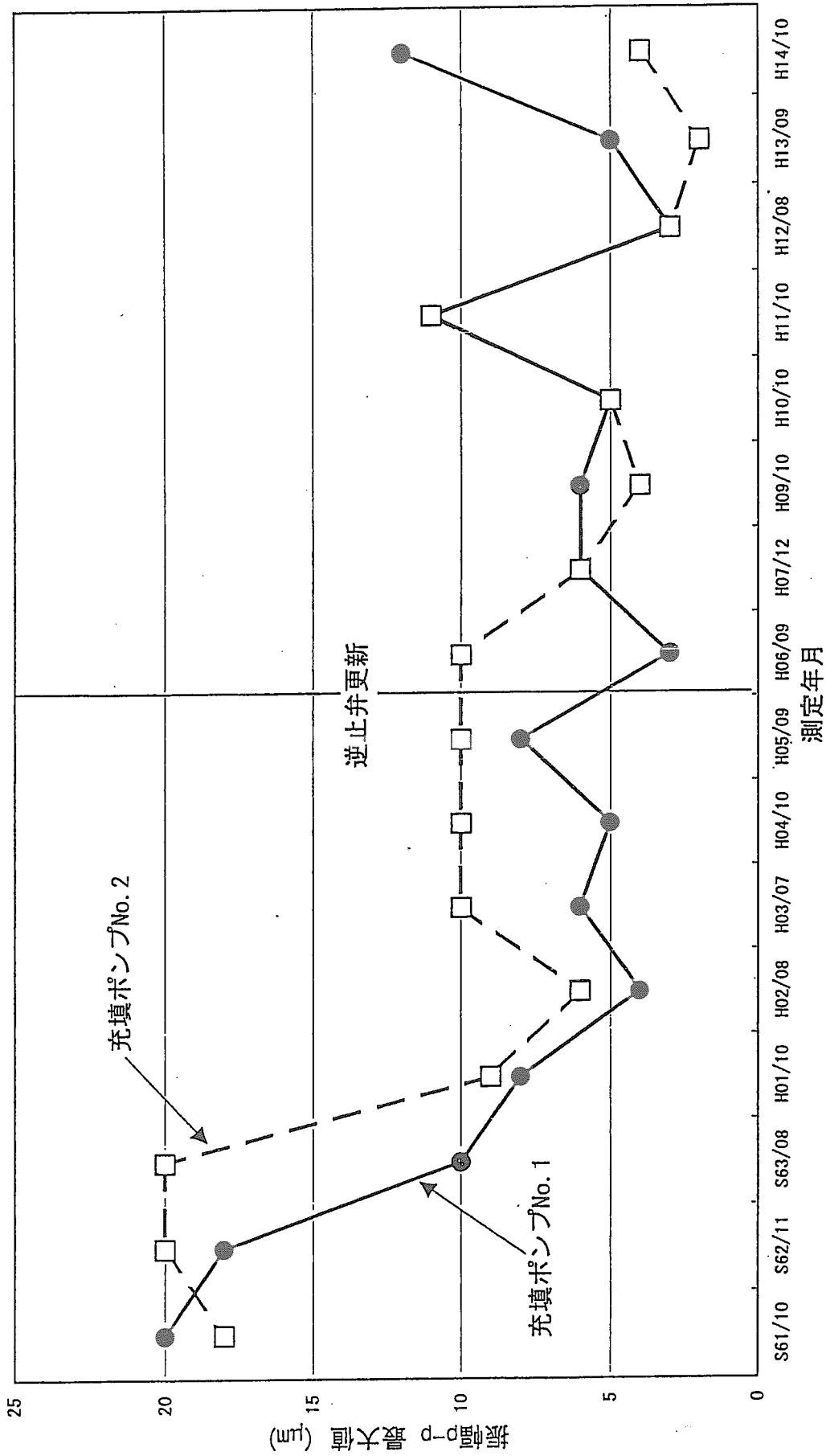
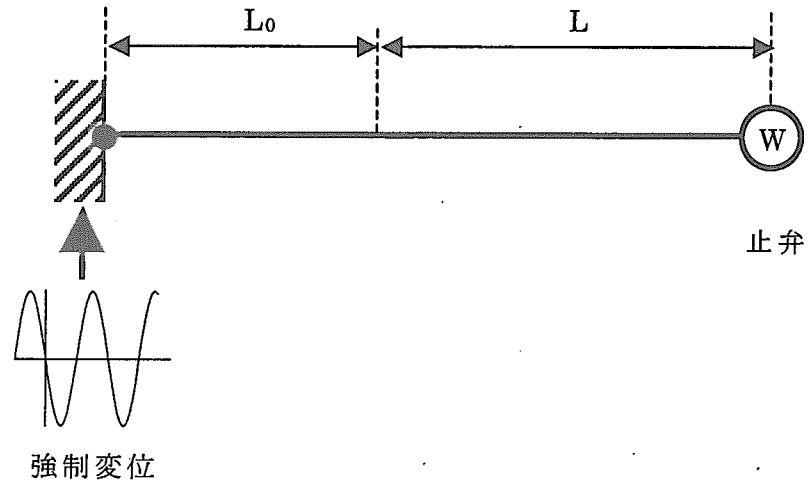


図 4.4 充填ポンプの振動測定結果 (定期検査時)



L_0 : 充填ポンプ出口側配管の剛性を模擬したはり (=50mm)
 (充填ポンプ No.2 圧力計導管の加振試験結果の固有振動数に一致する
 よう定めた寸法)

図 4.5 動解析モデル

ABAQUS

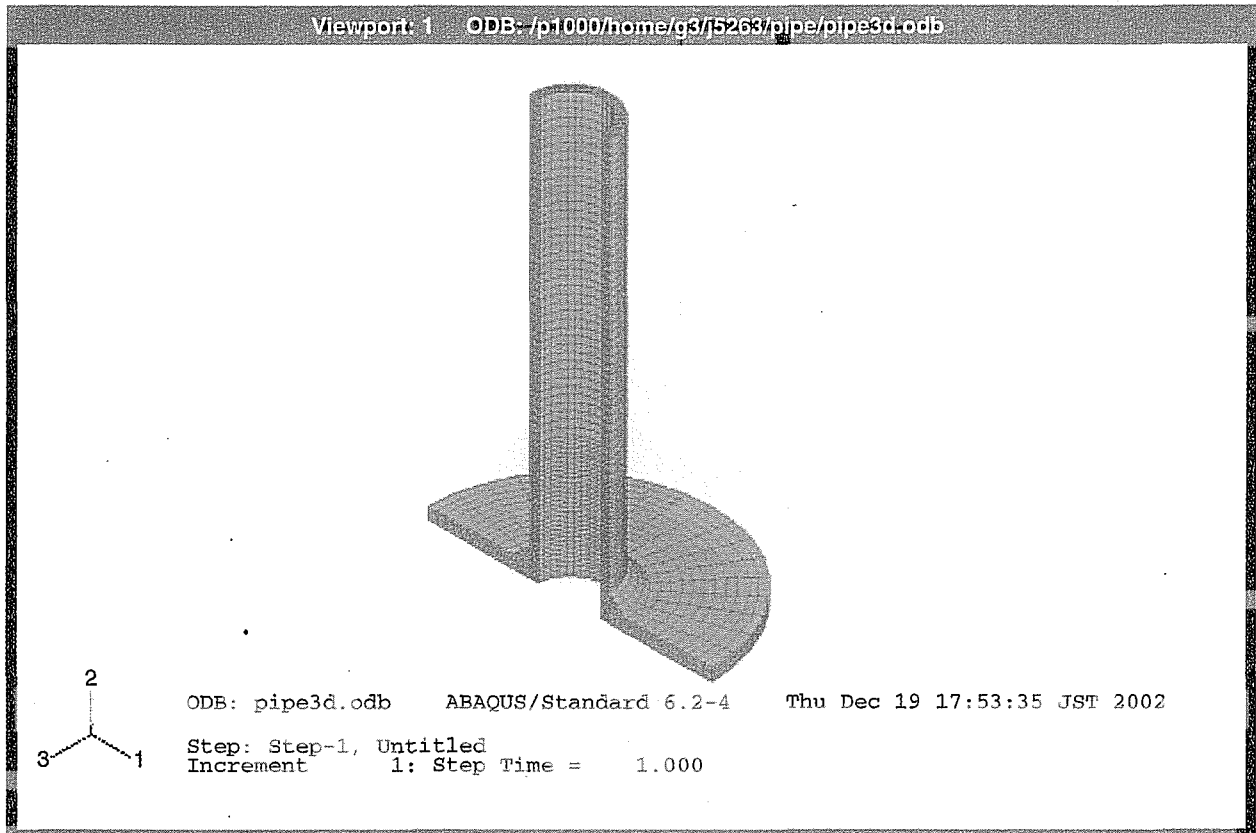


図 5.1 応力解析モデル

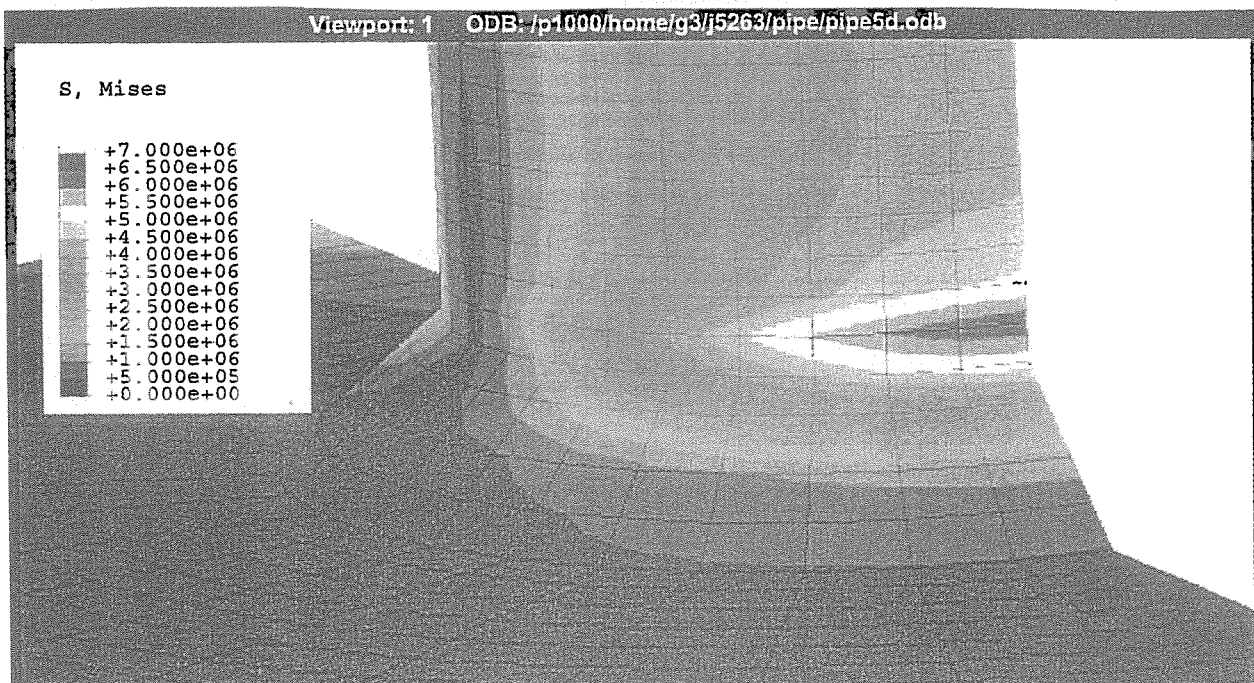
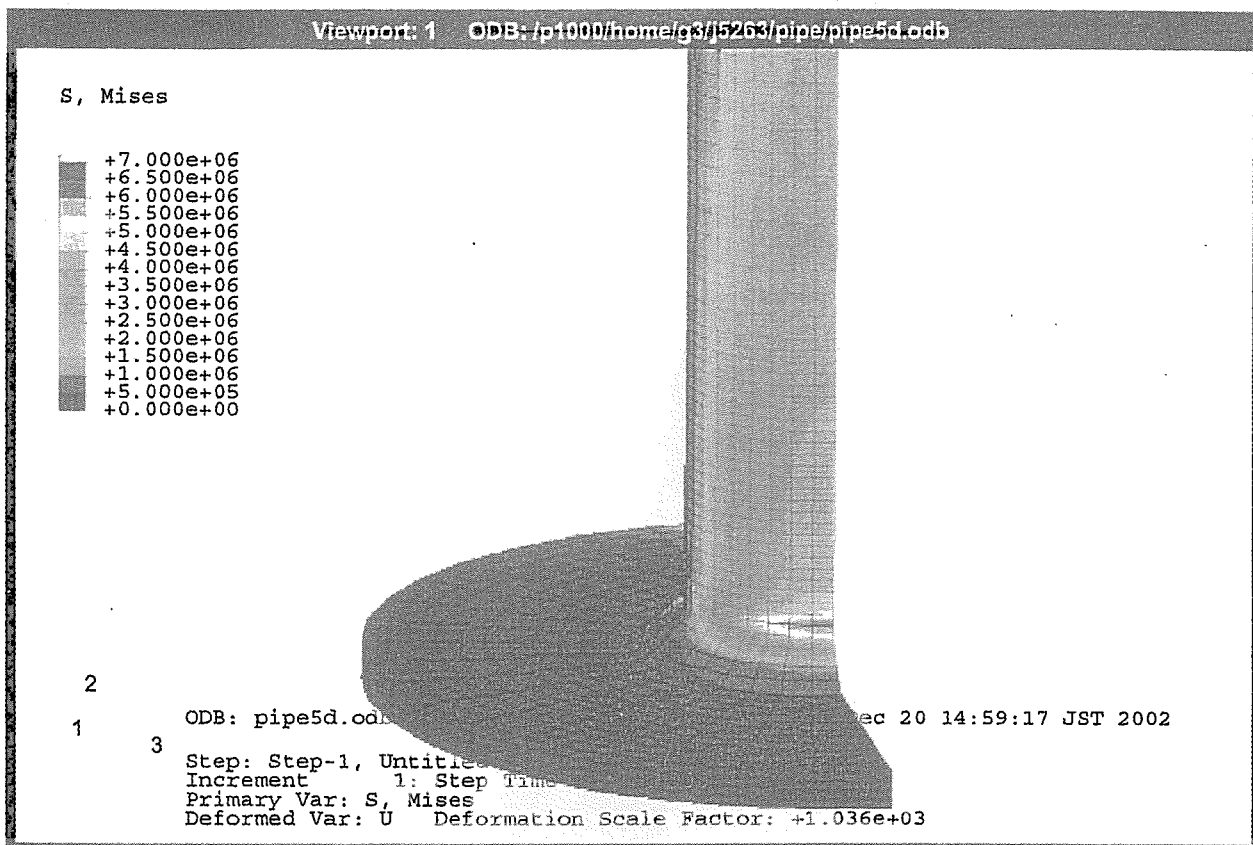
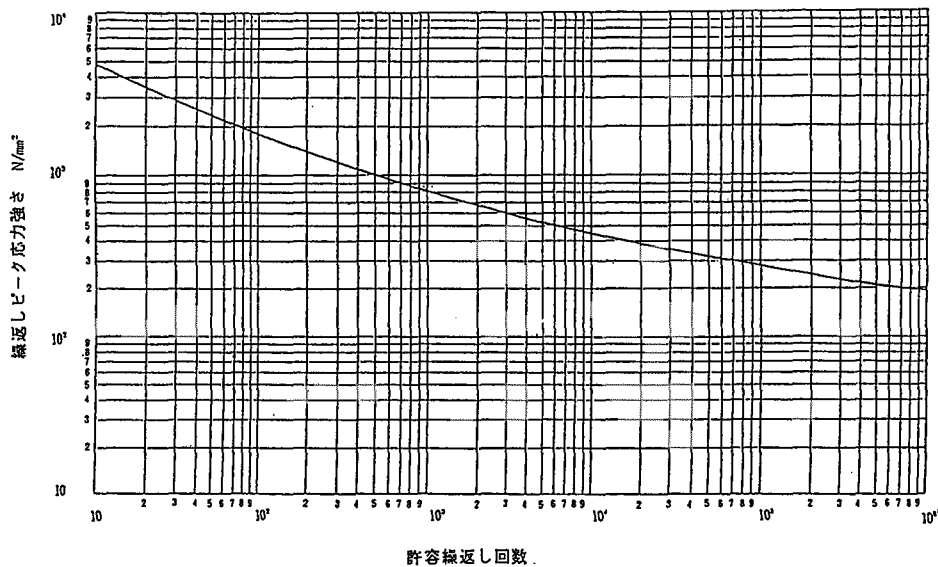
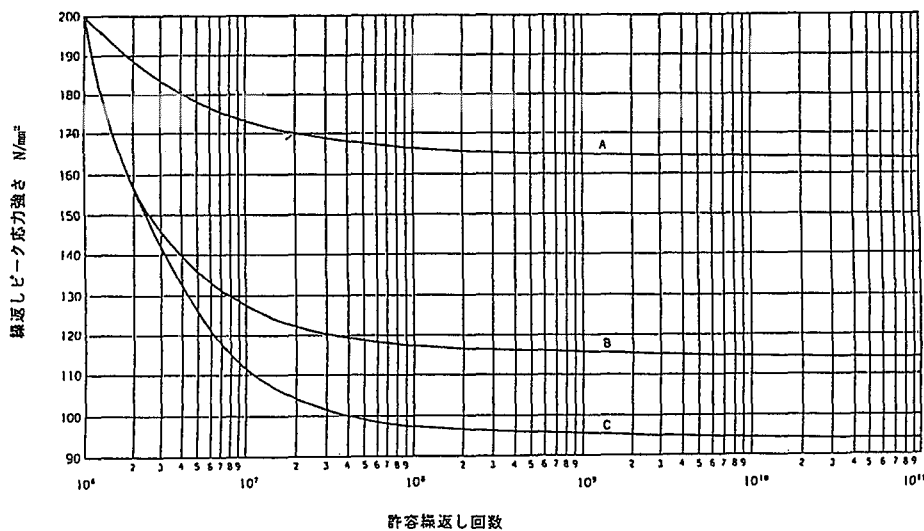


図 5.2 応力解析結果

(繰返しピーク応力強さが194N/mm²を超えるもの)



(繰返しピーク応力強さが194N/mm²以下のもの)



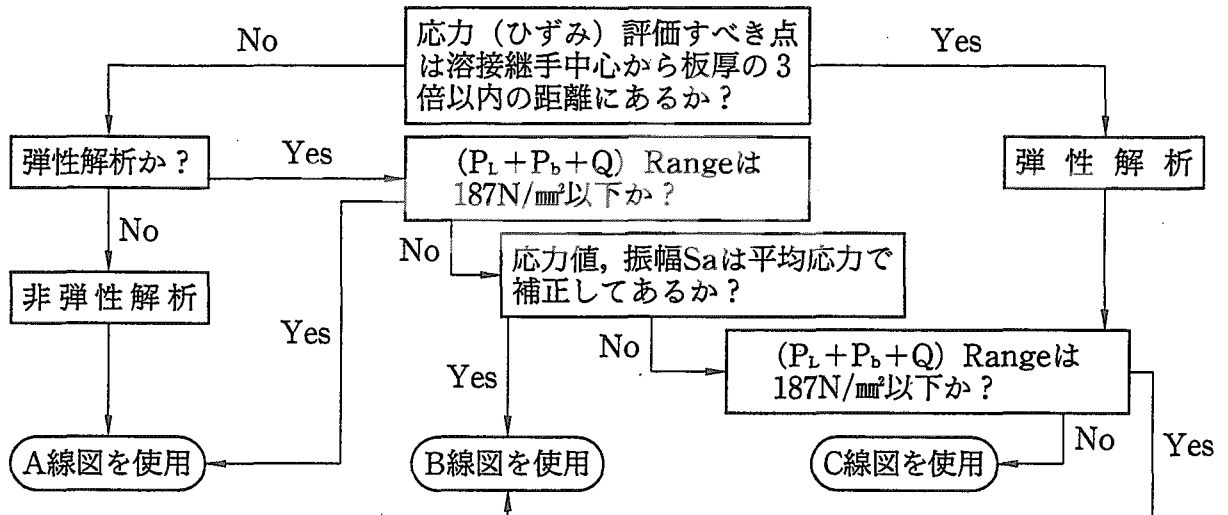
(備考)

- 1 この図における繰返しピーク応力強さは、疲れ解析による繰返しピーク応力強さに $\frac{1.95 \times 10^5}{\text{材料の使用温度における縦弾性係数}}$ を乗じて得た値とする。
- 2 曲線A, B及びCの使い分けは下記による。

出典：試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準⁵⁾

図 6.1 (1/2) 疲労線図

別 図



軸方向及び径方向の温度勾配による熱曲げ応力は、Qから除く。

3 温度が430度を超える場合は、この図を使用できない。

出典：試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準⁵⁾

図 6.1 (2/2) 疲労線図

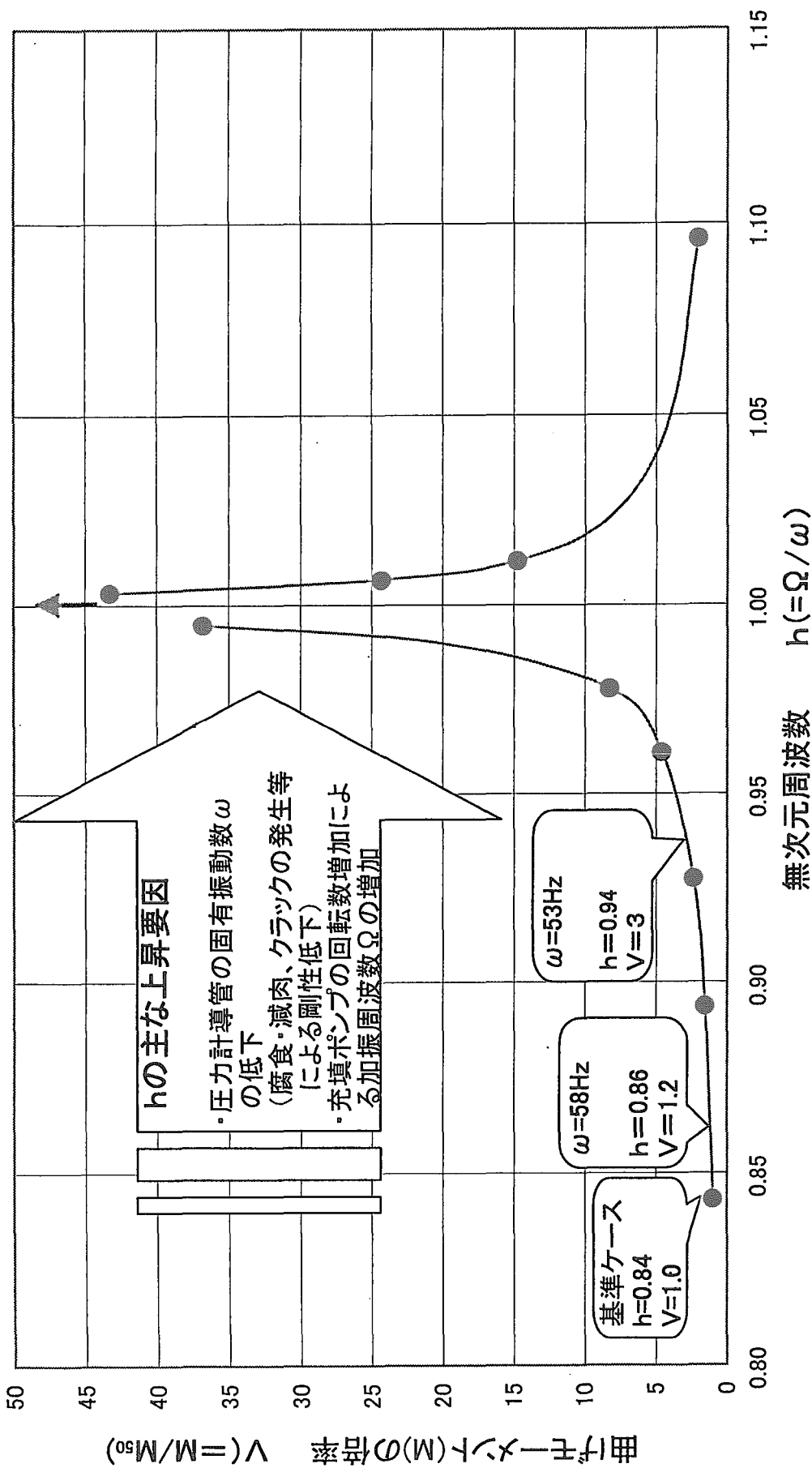


図6.2 圧力計導管の振動特性

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ - ン	b
バ - ル	bar
ガ - ル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ - ド	rad
レ - ム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス) (cm²/s)

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

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

1 cal = 4.18605 J(計量法)
= 4.184 J(熱化学)
= 4.1855 J(15 °C)
= 4.1868 J(国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

JMTR計測用配管のき裂発生原因の調査報告書(配管部の振動解析と応力解析の結果)

R100

古紙配合率100%
白紙度70%再生紙を使用しています。