

JAERI-Tech  
2002-024



JP0250138



HTTR出力上昇試験における  
高温配管熱変形挙動の評価  
(その1 20MWまでの結果)

2002年3月

塙 悟史・小嶋 崇夫・角田 淳弥・橘 幸男

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。

入手の間合わせは、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）で複写による実費領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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

HTTR 出力上昇試験における高温配管熱変形挙動の評価  
(その1 20MWまでの結果)

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

埴 悟史<sup>+</sup>・小嶋 崇夫・角田 淳弥・橘 幸男

(2001年1月22日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR (定格出力 30MW)) の 1 次冷却設備は、原子炉で加熱された 950°C の 1 次冷却材を中間熱交換器および加圧水冷却器へ導き、400°C に冷却した冷却材を原子炉へ戻すため、その機器配管系は非常に高温になる。そのため、1 次系機器配管系の熱変位挙動を確認することは機器健全性確認の観点から重要である。さらに、機器配管系の支持方法には、新しい試みである 3 次元の浮動支持方式を採用しているため、その熱変位挙動・特性を把握することは、3 次元浮動支持方式の熱変位特性を知る上でも重要である。

HTTR の出力上昇試験 (2) では、1 次冷却設備の熱変位特性を知るために、高温配管の熱変形測定試験を実施した。本報は、その試験結果及び解析評価結果を示したものである。熱変形測定試験では、熱変位挙動は温度変化に対して一次的に変化することを確認した。解析評価では、支持構造物の抵抗力が機器の熱変位挙動に影響を与えることが明らかとなり、またその抵抗力を最適化することで実測熱変位挙動を再現できることを確認した。また、30MW における予測解析を実施し、機器の健全性が確保されることを確認した。

Evaluation of Thermal Displacement Behavior of High Temperature Piping System  
in Power-up Test of HTTR (No.1 Results up to 20MW Operation)

Satoshi HANAWA<sup>+</sup>, Takao KOJIMA, Junya SUMITA and Yukio TACHIBANA

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

(Received January 22, 2002)

Temperature of the primary cooling system of the High Temperature Engineering Test Reactor, HTTR, becomes very high because the coolant temperature at the reactor outlet reaches 950°C, and 400°C at inlet of the reactor. Therefore, it is important to confirm the thermal displacement behavior of the high temperature piping system in the primary cooling system from the viewpoint of the structural integrity. Moreover, newly designed 3-dimensional floating support system is adopted to the cooling system, it is meaningful to verify the thermal displacement behavior of the piping system applied the 3-dimensional floating support system.

In the power-up test (up to 20MW operation), thermal displacement behavior of the high temperature piping system was measured. This paper describes the experimental and analytical results of thermal displacement characteristics of the high temperature piping system. The results showed that the resistance force induced from the supporting system effects to the thermal displacement behavior of cooling system, and the analytical results have a good agreement with the experimental results by optimizing the resistant force of the floating support system. Additionally, structural integrity at the 30MW operation was confirmed by the analysis.

Keywords : HTTR, Primary Cooling System, Floating Support, Thermal Displacement,  
Structural Integrity, Power Up

---

+ Department of JMTR

## 目 次

|                      |    |
|----------------------|----|
| 1. 緒言                | 1  |
| 2. H T T Rの冷却設備概要    | 3  |
| 3. 機器設計              | 6  |
| 3.1 設計解析             | 6  |
| 3.2 設計における熱変形挙動の解析結果 | 6  |
| 4. 出力上昇試験            | 9  |
| 4.1 試験方法             | 9  |
| 4.2 試験結果             | 9  |
| 5. 試験結果の解析的評価        | 17 |
| 5.1 解析手法             | 17 |
| 5.2 解析評価             | 22 |
| 6. 結論                | 45 |
| 謝辞                   | 45 |
| 参考文献                 | 46 |

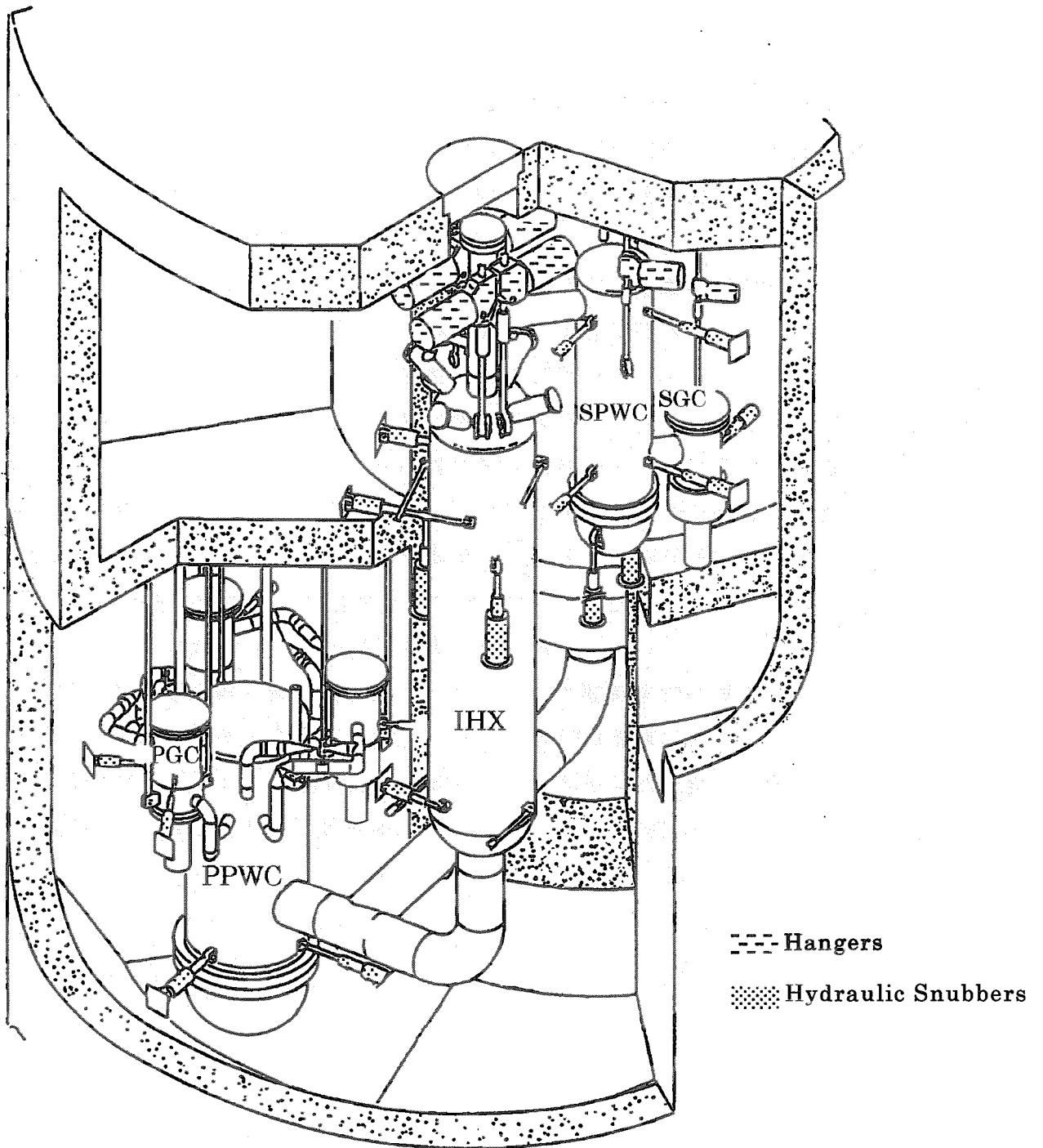
Contents

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introduction</b>                                  | <b>1</b>  |
| <b>2. Summary of HTTR Cooling System</b>                | <b>3</b>  |
| <b>3. Structural Design</b>                             | <b>6</b>  |
| 3.1 Analysis for Designing                              | 6         |
| 3.2 Analytical Results of Thermal Displacement Behavior | 6         |
| <b>4. Power-up Test</b>                                 | <b>9</b>  |
| 4.1 Experimental Procedure                              | 9         |
| 4.2 Experimental Results                                | 9         |
| <b>5. Evaluation of Experimental Results</b>            | <b>17</b> |
| 5.1 Analytical Procedure                                | 17        |
| 5.2 Evaluation  | 22        |
| <b>6. Conclusion</b>                                    | <b>45</b> |
| <b>Acknowledgements</b>                                 | <b>45</b> |
| <b>References</b>                                       | <b>46</b> |

## 1. 緒言

高温工学試験研究炉（HTTR）は定格出力が30MWであり、1次冷却材温度が原子炉出口で最高950℃、原子炉入口温度が395℃と高温である。高温機器に発生する熱膨張を吸収する構造は、機器健全性の観点からも重要であり、HTTRの設計には3次元の浮動支持方式や二重構造とした配管系等、新しい試みが行われている。浮動支持方式は、コンスタントハンガ及びリジッドハンガ等のハンガ類及び油圧防振器等により構成される。本方式によれば、熱膨張等の緩慢な変形挙動は比較的自由であり、地震等の急激な挙動は油圧防振器により拘束することができる。1次冷却設備の鳥瞰図をFig.1.1に示す。これらコンスタントハンガ、リジッドハンガ及び油圧防振器の組み合わせによる3次元浮動支持方式では、通常の配管系で必要となる多数の曲げ部が不要になることから、系統全体の縮小化が可能となり、結果的に原子炉格納容器の縮小化を可能とする。特に、HTTRでは長尺構造物である中間熱交換器を浮動支持していることから、3次元の浮動支持方式を用いた冷却機器の熱変形挙動を確認することは重要である。

HTTRでは、平成13年1月29日から3月1日にかけて出力上昇試験(2)(熱出力20MW、原子炉出口冷却材温度600℃)を実施した。出力上昇試験(2)では、1次冷却設備の熱変位挙動を知ると同時にその健全性を確認するために、1次冷却設備を構成する高温配管系の熱変形挙動を測定した。同時に解析的評価により、3次元浮動支持方式を採用した配管系の熱変形特性並びに機器の健全性を確認した。本報では、HTTRの1次冷却設備の概要および設計について、また出力上昇試験(2)で得られた試験結果、解析評価結果および健全性評価結果を示す。



- IHX : Intermediate heat exchanger
- PPWC : Primary pressurized water cooler
- PGC : Primary gas circulator
- SPWC : Secondary pressurized water cooler
- SGC : Secondary gas circulator

Fig.1.1 Bird's eye view of primary cooling system.



## 2. H T T Rの冷却設備概要

H T T Rの原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備、原子炉スクラム時などの異常時に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備及び炉容器冷却設備から構成される。主冷却設備は、Fig.2.1 に示すように、1次冷却設備、2次ヘリウム冷却設備及び加圧水冷却設備からなり、原子炉で発生した熱を最終的には加圧水冷却設備の加圧水冷却器により大気中へ放散する。1次冷却設備は、中間熱交換器（IHX）と1次加圧水冷却器（PPWC）の2種類の熱交換器を並列に配置し、原子炉で発生した熱を2次ヘリウム冷却設備又は加圧水冷却設備に伝達する。PPWCは、Uチューブ型の伝熱管を用いたヘリウム-加圧水型の熱交換器であり、IHXは、ヘリカルコイル型の伝熱管を用いたヘリウム-ヘリウムの熱交換器である。

特に1次系の機器は、約950℃の1次冷却材を内包するため、熱交換器の接続には二重構造を持つ二重管（Fig.2.2）を採用している。原子炉からの高温ヘリウムガスは、内管の内側を流れ、PPWCまたはIHXで冷却された約400℃のヘリウムガスは、内管と外管の間を流れる。この様に、耐熱部と耐圧部を分離することで、耐圧部の使用温度を低くする事が可能となっている。

H T T Rの運転方法は、PPWCで約20MW及びIHXで約10MWの除熱を行う並列運転と、IHXは使用せずPPWCのみで約30MWの除熱を行う単独運転がある。運転モードとしては、原子炉出口温度約850℃、熱出力30MWの定格運転と、原子炉出口温度約950℃、熱出力30MWの高温試験運転がある。

H T T Rの支持構造物には、機器配管系の荷重を支える観点から、コンスタントハンガ、リジッドハンガ及びスプリングハンガを用いており、一方、地震時の振動を抑制する目的で油圧防振器を用いている。コンスタントハンガは、コイルバネとリンク機構を組み合わせた構造で、機器配管系の上下の移動に対して、常に設定された一定の荷重で支持することができる。ただし、コンスタントハンガ建家側支持点は、水平方向には移動しない。従って、支持される機器が水平方向へ移動すると、機器吊り上げ力に応じた水平分力が移動を妨げる方向に働くことになる。H T T Rでは、熱による上下方向変位が大きいIHX及び2次加圧水冷却器（SPWC）にコンスタントハンガを設置している。油圧防振器は、機器配管系の熱変位を拘束することなく、油圧を媒体として、地震時による機器の振動を防止、減衰させることができる。ただし、油圧防振器には、オイルシール部の摩擦力、オリフィスでの流動抵抗力等、摺動抵抗が存在する。H T T Rの主冷却設備のうち、PPWC、IHX及びSPWCには合計約40基の油圧防振器が設置されている。

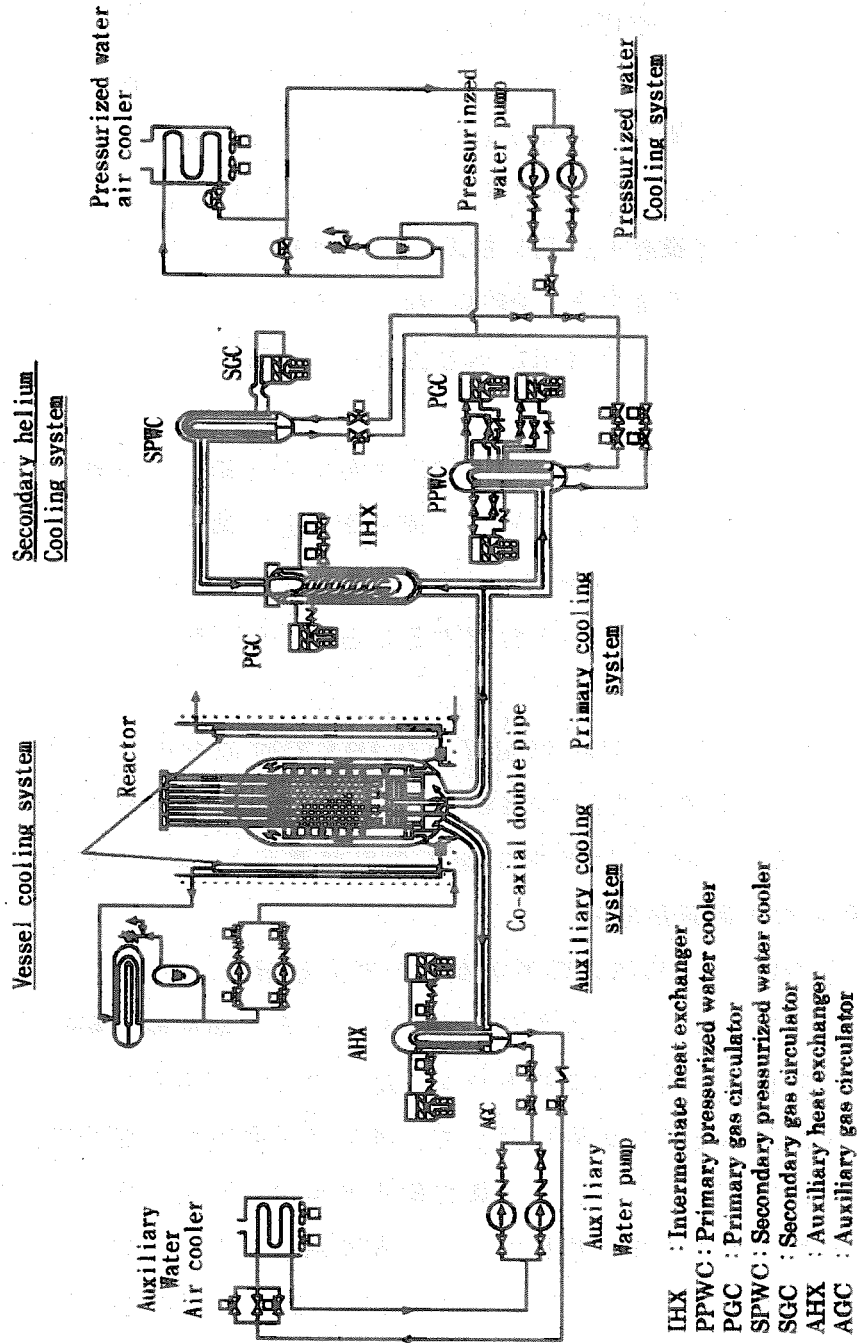


Fig.2.1 Schematic diagram of HTTR cooling system.

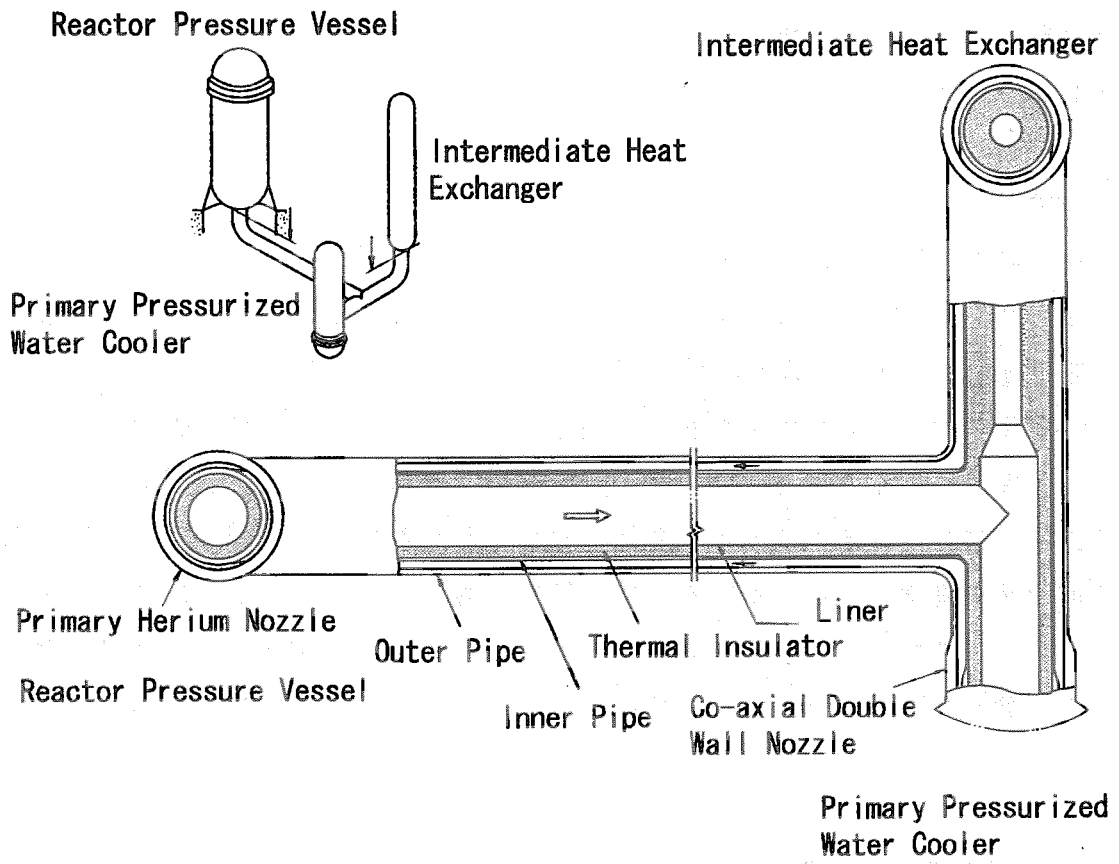


Fig.2.2 Cross section view of co-axial double pipe.

### 3. 機器設計

HTTR の高温機器の設計では、想定し得る各熱過渡事象における機械的荷重を算出し、それら機械的荷重条件から高温構造設計指針に従った強度評価を行う。ここで、考慮する機械的荷重条件は、内圧、自重、機械荷重、熱膨張および地震による荷重である。本章では、設計における熱膨張解析手法について示す。

#### 3.1 設計解析

設計計算における高温配管熱変形挙動の解析には、汎用有限要素コード MSAP<sup>1)</sup>を用い、PPWC、IHX、二重管等の主冷却設備の機器配管系は、はり要素によりモデル化した。解析モデルを Fig. 3.1 に示す。なお、原子炉圧力容器 (RPV) はモデル化せず、RPV と二重管接合部へ温度に対応した強制変位量を与えることで、RPV 二重管接合部の変形を模擬した。機器の支持条件を Table 3.1 に示す。表中には、耐震解析および自重解析における支持条件を併記してある。機器の支持条件は、通常の配管系解析と同様であり、熱膨張解析では支持構造物を考慮しない、耐震解析では耐震上機能を持たないコンスタントハンガのみ考慮しない、自重解析では機器重量を支持しないスナバのみ考慮しない支持条件としてある。また、機器配管系のモデル化に際しては、配管と各機器の接続ノズル部の局所剛性を考慮した。解析に使用した局所剛性を Table 3.2 に示す。

#### 3.2 設計における熱変形挙動の解析結果

定格運転状態の熱膨張解析結果を Table 3.3 に示す。なお、熱膨張評価位置は、解析モデル (Fig. 3.1) 中に示すものであり、出力上昇試験においても同様の位置を計測している。解析結果より、X 方向変位は二重管の変位に熱交換器類の全体が追従しており、約 40mm 程度変位している。Y 方向も同様であり、IHX 側は全体に約 15mm、PWC 側は約 12mm 変位している。

Table 3.1 Support condition for thermal expansion analysis.

| 支持の種類     | 熱膨張解析 | *耐震解析 | *自重解析 |
|-----------|-------|-------|-------|
| RPV 接続部   | 考慮する  | 考慮する  | 考慮する  |
| リジッドサポート  | 考慮する  | 考慮する  | 考慮する  |
| 油圧防振器     | 考慮しない | 考慮する  | 考慮しない |
| コンスタントハンガ | 考慮しない | 考慮しない | 考慮する  |

Table 3.2 Local rigidity at the connecting point between the pipe and heat exchangers.

|        |      |       | Kx                 | Ky                 | Kz                 | Kθx                   | Kθy                   | Kθz                   |
|--------|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|        |      |       | kg/mm              | kg/mm              | kg/mm              | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 |
| 1次系二重管 | RPV  | 内管支持部 | $2.32 \times 10^5$ | $6.64 \times 10^5$ | $6.64 \times 10^5$ | $1.69 \times 10^{11}$ | $1.72 \times 10^{10}$ | $1.72 \times 10^{10}$ |
|        |      | 外管ノズル | $7.52 \times 10^5$ | $3.23 \times 10^5$ | $3.23 \times 10^5$ | $1.57 \times 10^{13}$ | $3.14 \times 10^8$    | $3.14 \times 10^8$    |
|        | PWC  | 内管ノズル | $3.50 \times 10^4$ | $4.92 \times 10^4$ | $8.80 \times 10^4$ | $1.30 \times 10^{11}$ | $8.67 \times 10^9$    | $1.84 \times 10^9$    |
|        |      | 外管ノズル | $1.98 \times 10^5$ | $4.50 \times 10^5$ | $5.84 \times 10^5$ | $6.67 \times 10^{11}$ | $8.05 \times 10^{10}$ | $2.60 \times 10^{10}$ |
|        | IHX  | 内管ノズル | $2.87 \times 10^5$ | ∞                  | ∞                  | ∞                     | $1.30 \times 10^5$    | $1.30 \times 10^5$    |
|        |      | 外管ノズル | $1.15 \times 10^5$ | ∞                  | ∞                  | ∞                     | $6.67 \times 10^5$    | $6.67 \times 10^5$    |
| 2次系二重管 | SPWC | 内管ノズル | $3.29 \times 10^4$ | $2.07 \times 10^4$ | $3.39 \times 10^4$ | $4.91 \times 10^{10}$ | $3.18 \times 10^9$    | $8.91 \times 10^8$    |
|        |      | 外管ノズル | $1.61 \times 10^5$ | $2.40 \times 10^5$ | $2.77 \times 10^5$ | $2.23 \times 10^{11}$ | $2.63 \times 10^{10}$ | $1.10 \times 10^{10}$ |

Table 3.3 Analytical results at normal operation condition.

(mm)

|                       | X     | Y      | Z      |
|-----------------------|-------|--------|--------|
| RPV エルボ<br>(node104)  | 0.88  | —      | -15.19 |
| PWC 頂部<br>(node200)   | 41.77 | -11.83 | 6.70   |
| PWC ノズル部<br>(node120) | 41.76 | -4.74  | -17.3  |
| エルボ<br>(node132)      | 41.76 | 12.68  | -15.15 |
| IHX 上部<br>(node304)   | 41.73 | 14.68  | 46.13  |
| 2次系二重管<br>(node422)   | 39.37 | 16.82  | 54.47  |

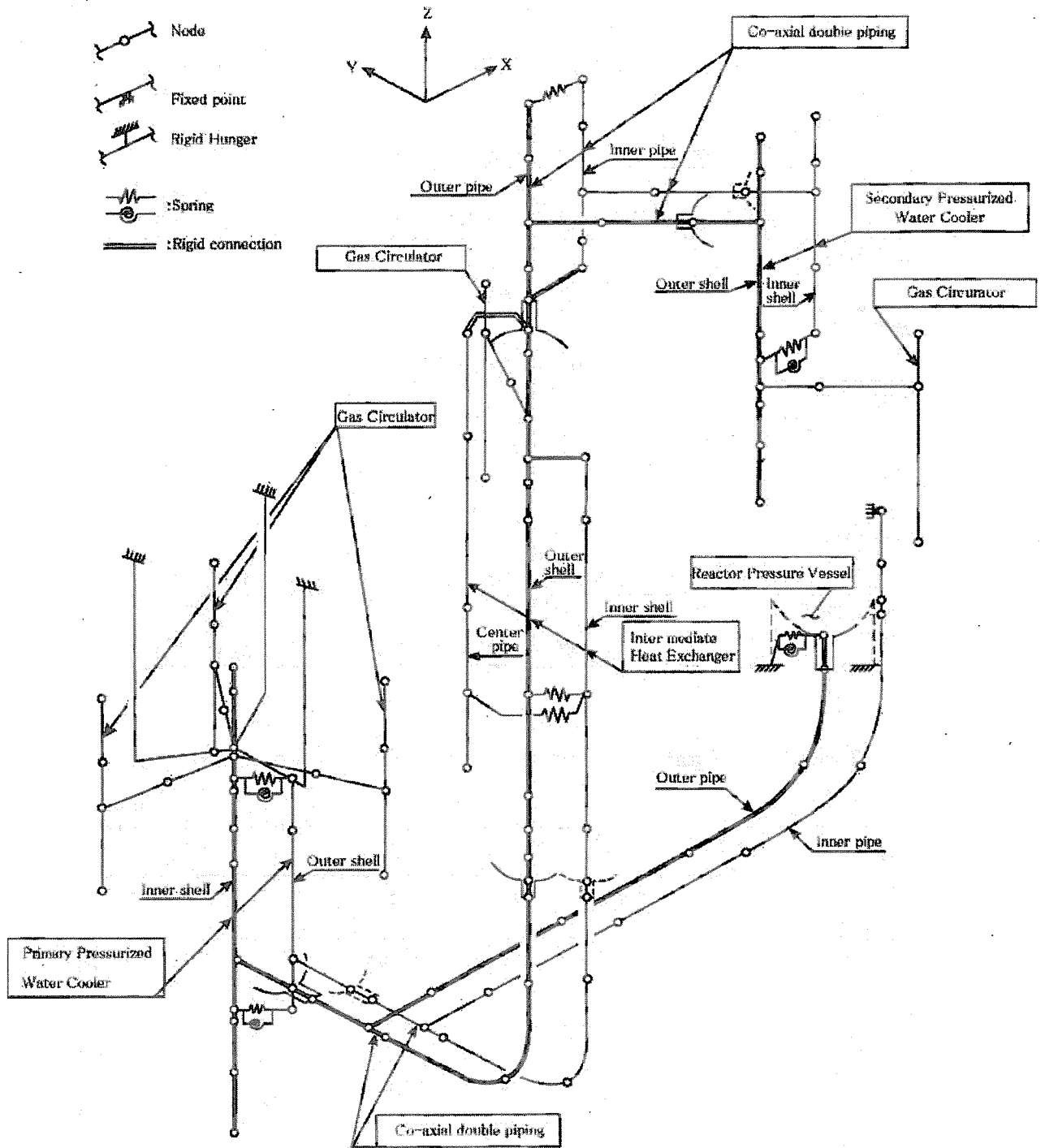


Fig. 3.1 Analytical model for design.

## 4. 出力上昇試験

### 4.1 試験方法

高温配管の熱変形測定は Fig. 4.1 に示す 6 カ所について行い、計測の座標軸は Fig. 4.1 に示す様に RPV→1 次系二重管 T 部の方向を X 軸、その直角方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸と定義した。なお、計測にはひずみゲージ式変位計を用い、その出力は A/D converter を介した後に変位換算を行った。熱変形データは 1 時間毎に収集し、同時に、原子炉入口冷却材温度、各 He ガス循環機出口温度、IHX 外胴温度、2 次冷却材温度等のプラントデータを収集した。

### 4.2 試験結果

単独運転および並列運転 20MW までの、高温配管変形挙動の温度依存性を Fig. 4.2 に示す。同図より、機器の熱変形挙動は温度変化に対してほぼ一次的に変化している。並列運転時の原子炉入口温度 293℃における実測変形挙動と設計評価値(定格運転時の評価値を 293℃の値として内挿)を Table 4.1 に示す。実測値と設計評価値では、特に IHX 上部水平方向の変形挙動に違いが認められ、実測では IHX 上部が IHX 下部変形に追従しない結果となっている。Fig. 4.3 に示す X 方向変形の時刻歴変化では、X1～X4 は原子炉入口 He 温度の変化に追従した熱変形挙動を示しているが、IHX 上部である X5 および X6 は He の温度変化に追従した変形挙動を示さない。特に、X6 は He 温度変化に対する変形挙動の時間的遅れが顕著である。また X5 および X6 では、単独運転時と並列運転時の同じ温度状態において、同様の変位量を示していない。これらは、IHX が長尺構造物であることに加え、周辺に設置される支持構造物が影響していると考えられる。なお、設計解析においては、前述のように熱変形挙動に対して支持構造物の影響は考慮していないことから、Table 4.1 に示す差異が発生していると推測される。

支持構造物が高温配管の熱変形挙動に影響を及ぼす原因としては、ハンガー類の水平分力と油圧防振器の低速摺動時における摺動抵抗力が考えられる。特に油圧防振器は、その構造が一般的な油圧緩衝器と基本的に同様な構造を有するため、低速摺動時には、摺動を開始するまでの静摩擦領域および摺動中の動摩擦領域が存在する。過去の非核熱で実施した試験結果を、各々 180℃の状態に補正した場合 (Fig. 4.4)、各測定点において測定値に若干のばらつきが認められる。これは、熱膨張により発生する配管反力とそれに対する前述の油圧防振器の摺動抵抗状態の関係が、各試験状態において変化することによるものと考えられる。

原子炉出力 20MW における並列運転時と単独運転時の熱変形挙動の比較を Fig. 4.5 に示す。プラント運転モードによる熱変形挙動への差異は、IHX 上部周辺の測定点 X5,Z5 およ

び X6,Z6 で顕著である。これは、単独運転時は 2 次ヘリウム冷却系が運転されていないために 2 次ヘリウム系の機器温度が低いためである。

Table 4.1 Comparison between experimental results and evaluated results by the design at 20MW.

| 計測点名称             | 単位 | PID 番号、計測位置 | 並列運転実測値 | 設計評価値 |
|-------------------|----|-------------|---------|-------|
| 原子炉入口 He 温度       | °C | 13A130      | 295.0   | —     |
| RPV 下部エルボ変位量      | mm | X1          | -0.26   | -0.7  |
| RPV 下部エルボ変位量      | mm | Z1          | -13.39  | -13.4 |
| 1 次 PWC 頂部変位量     | mm | X2          | 24.70   | 31.0  |
| 1 次 PWC 頂部変位量     | mm | Y2          | -11.22  | -8.8  |
| 1 次 PWC 頂部変位量     | mm | Z2          | 3.09    | 5.0   |
| 1 次 PWC 二重管接続部変位量 | mm | X3          | 26.15   | 31.8  |
| 1 次 PWC 二重管接続部変位量 | mm | Y3          | -4.14   | -3.4  |
| 1 次 PWC 二重管接続部変位量 | mm | Z3          | -9.52   | -10.1 |
| エルボ変位量            | mm | X4          | 25.54   | 33.8  |
| エルボ変位量            | mm | Y4          | 8.59    | 12.2  |
| エルボ変位量            | mm | Z4          | -10.90  | -10.7 |
| IHX 上部変位量         | mm | X5          | 9.48    | 31.0  |
| IHX 上部変位量         | mm | Y5          | 5.85    | 14.0  |
| IHX 上部変位量         | mm | Z5          | 30.46   | 34.2  |
| 2 次系二重管部変位量       | mm | X6          | 1.90    | 29.1  |
| 2 次系二重管部変位量       | mm | Y6          | 2.47    | 14.4  |
| 2 次系二重管部変位量       | mm | Z6          | 30.87   | 41.0  |



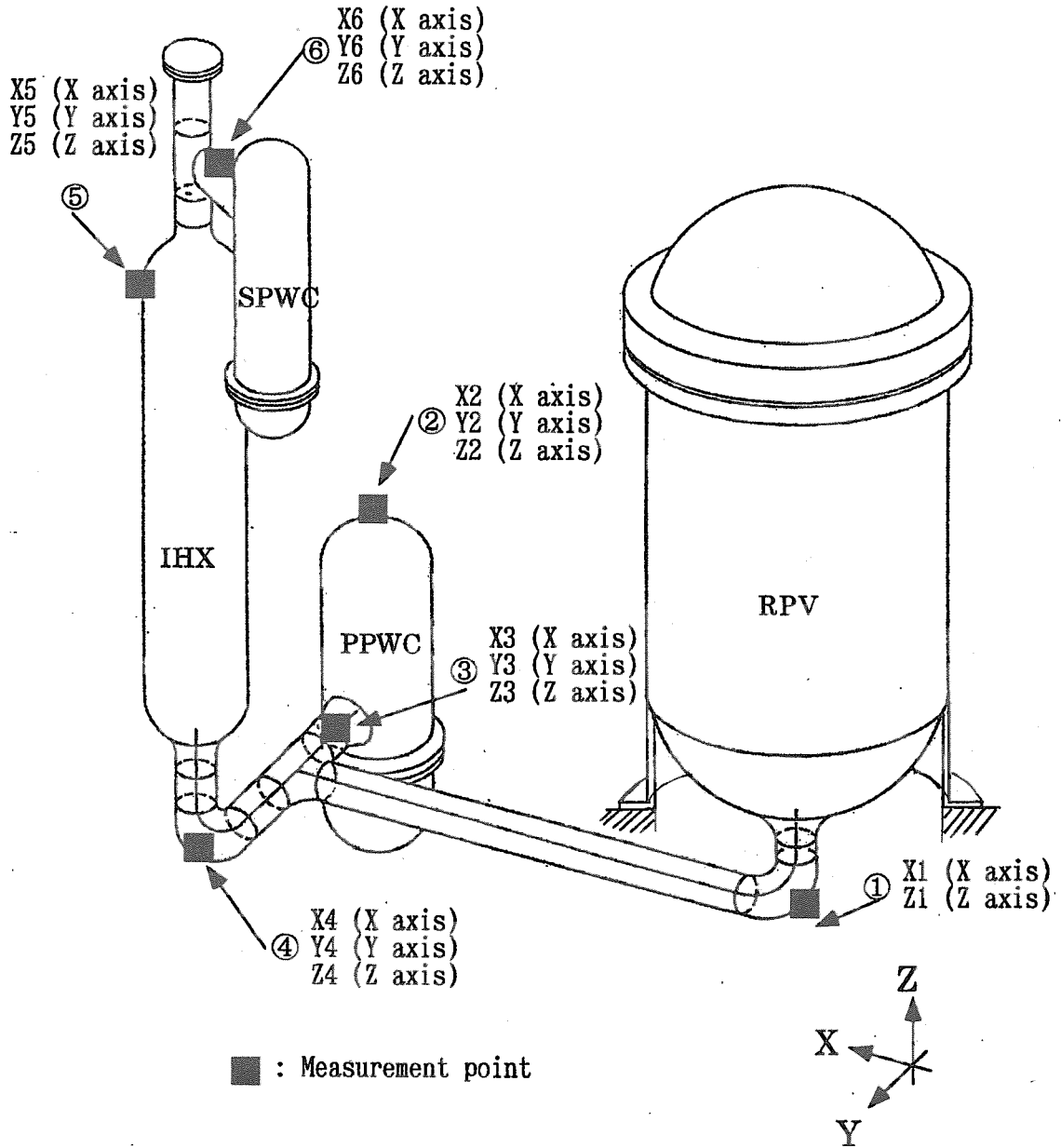


Fig. 4.1 Schematic diagram of measurement points.

This is a blank page.

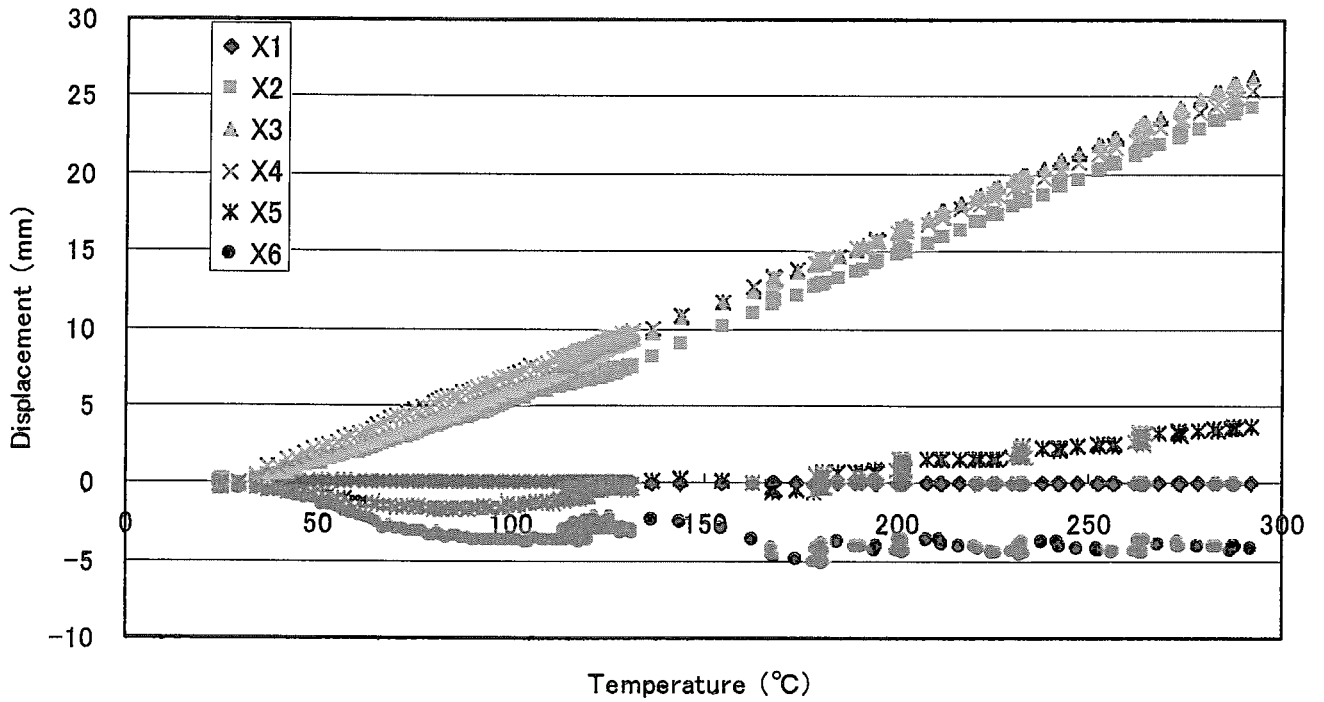


Fig. 4.2 Temperature dependency of thermal displacement behavior. (Single operation mode at 20MW)

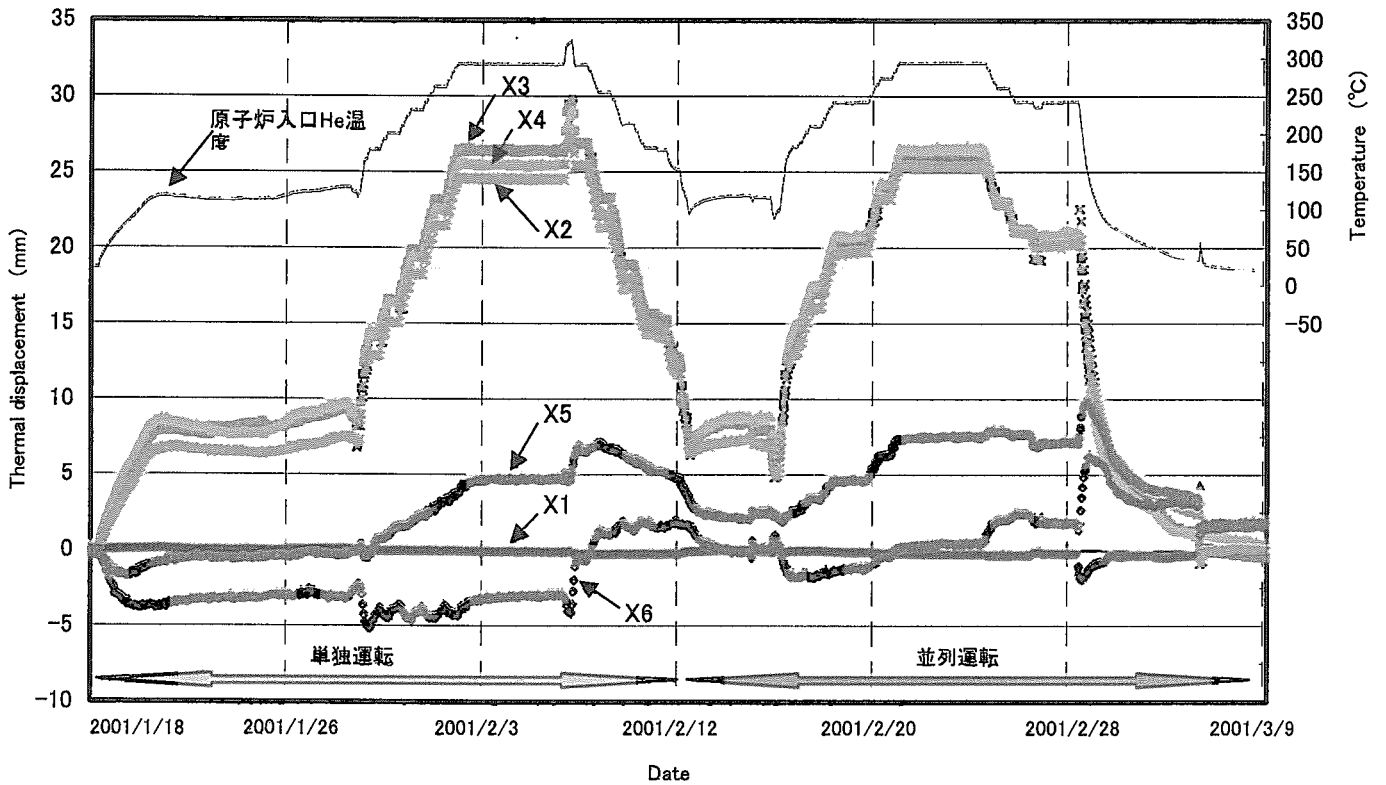


Fig. 4.3 Thermal displacement behavior with elapsed time. (X direction)

This is a blank page.

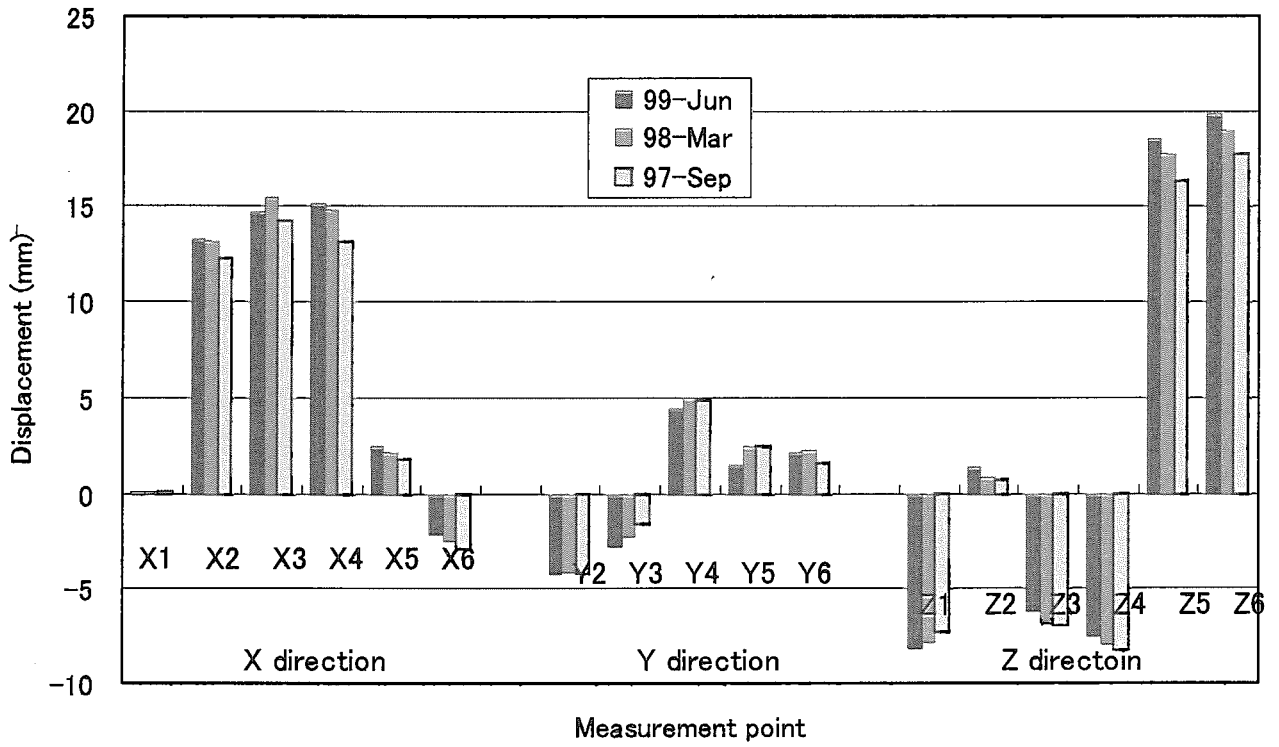


Fig. 4.4 Previous measurement compensated at 180°C.

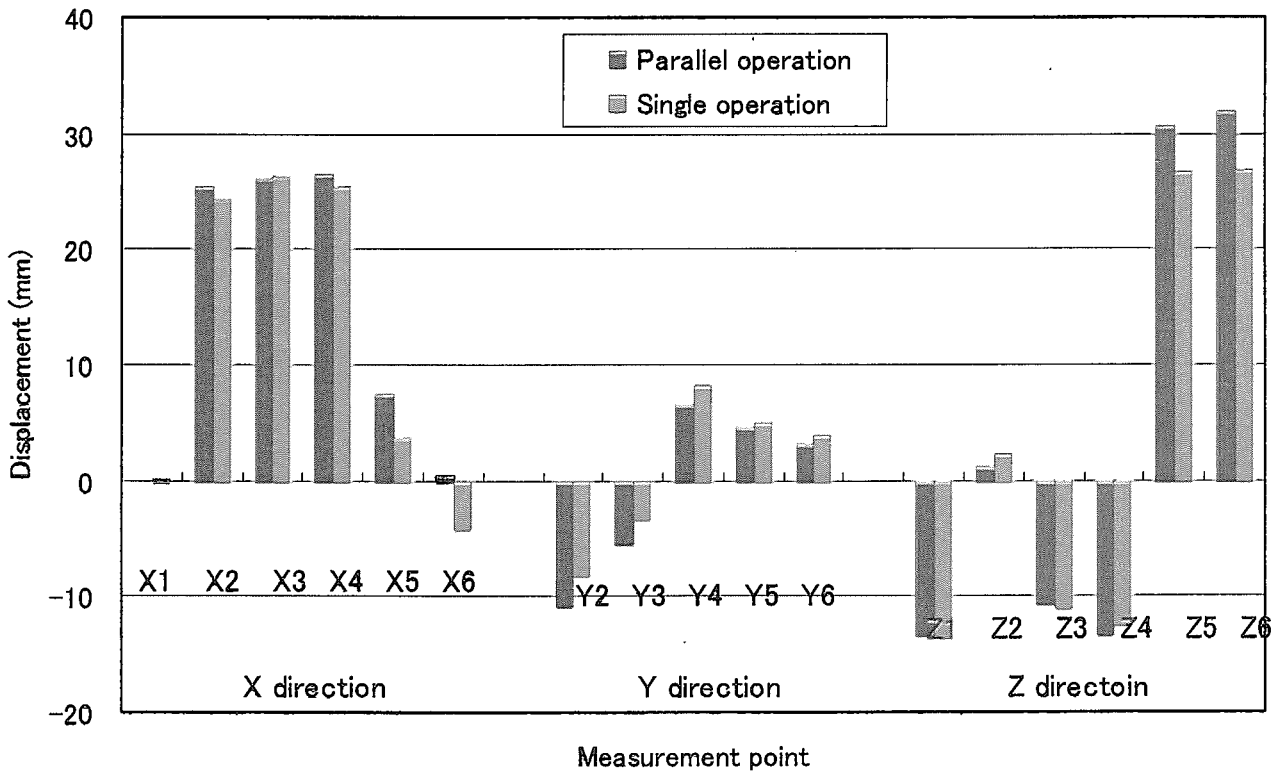


Fig. 4.5 Comparison of thermal displacement behavior between parallel operation mode and single operation mode.

This is a blank page.

## 5. 試験結果の解析的評価

### 5.1 解析手法

解析には、汎用有限要素コード「ABAQUS」<sup>2)</sup>を用いた。解析モデルを Fig.5.1 に示す。モデリングについては、PPWC、IHX、二重管等の主冷却設備の機器配管系は設計解析と同様にはり要素を用い、原子炉圧力容器 (RPV) はモデル化せず、RPV と二重管接合部へ温度に対応した強制変位量を与えた。また、機器配管系のモデル化に際しては、配管と各機器の接続ノズル部の局所剛性を考慮した。解析に使用した局所剛性は、Table 3.2 に示した設計条件と同様である。通常、配管系熱膨張解析では支持構造物は考慮しないのが常套的であるが、HTTR の高温配管系には、新たな試みである 3 次元の浮動支持を使用していることから、本解析では支持構造物の影響も考慮するため、ハンガ類及び油圧防振器を以下に示す手法でモデル化した。

ハンガ類のモデル化概念図を Fig.5.2 に示す。ハンガ類は機器の荷重に対して一定力で機器を支えているため、機器が水平方向へ移動した場合には、ハンガの吊り上げ力に対応する水平分力が発生し、また機器の水平移動量の増加に従い増加する。従って、本解析ではハンガ類をバネ要素によりモデル化し、用いたバネ定数は、各ハンガの機器吊り上げ力から算出した。解析に使用したバネ定数を Table 5.1 に示す。

油圧防振器のモデル化概念図を Fig.5.3 に示す。一般的に、油圧防振器が移動する際には、低速摺動においても抵抗力が発生し、低速での摺動抵抗力のうち支配的であるのはオイルシール部の摩擦力である。その抵抗力は、静止状態から動き始める際の静摩擦力と、摺動中の動摩擦力に区別できる。従って、機器から油圧防振器へ与えられる反力が、油圧防振器の静摩擦力以下であれば、油圧防振器は移動せず熱膨張は拘束される。一方、機器からの反力が油圧防振器の静摩擦力を越えれば、油圧防振器は一定の動摩擦力を生じながら摺動する。本解析では、油圧防振器を Fig.5.3 に示す抵抗力を有する非線形要素によりモデル化した。

油圧防振器の製造メーカーでは、製品の性能保証として摺動速度 1mm/sec における抵抗力を規定し、出荷前にその抵抗力を確認している。1mm/sec における実測抵抗力を Table 5.2 に示す。しかし、油圧防振器のモデル化において上記抵抗力を与えた場合、過去の解析評価において<sup>3)</sup>水平方向の熱変位挙動、特に熱交換器頂部が実測に比べ大きく拘束される結果が得られている。これは、機器配管系の熱膨張時の油圧防振器摺動速度は 1mm/sec より低速であり、その抵抗力は 1mm/sec の実測抵抗力より低い値であるためである。従って、本解析では油圧防振器の低速摺動抵抗力を減少させる方向で適宜変更し、実測挙動を再現した。

温度条件は、機器表面の実測温度及び 1 次冷却材温度を用いた。なお、材料物性値につ

いては、「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準(昭和 55 年度 通産省告示等第 501 号)」に準拠した。

Table 5.1 Hanging weight of constant and rigid hangers.

| Types of hangers | Hangers No. | Hanging weight (kg) | Spring constant for modeling (kg/mm) |
|------------------|-------------|---------------------|--------------------------------------|
| Constant hanger  | 3001        | 38400               | 20.2                                 |
| Constant hanger  | 3002        | 37800               | 19.9                                 |
| Constant hanger  | 2001        | 18600               | 23.3                                 |
| Constant hanger  | 2002        | 18600               | 23.3                                 |
| Rigid hanger     | 1001        | 17600               | 5.5                                  |
| Rigid hanger     | 1002        | 17600               | 5.5                                  |
| Rigid hanger     | 1003        | 17600               | 5.5                                  |

Table 5.2 Measured resistant force for hydraulic snubber.

| Types of hydraulic snubber | Capacity (kgf) | Measured resistant force (kgf) |
|----------------------------|----------------|--------------------------------|
| SHP-260T                   | 260000         | 2500                           |
| SHP-100T                   | 100000         | 750                            |
| SHP-40T                    | 40000          | 350                            |
| SHP-25T                    | 25000          | 130                            |
| SHP-16T                    | 16000          | 100                            |
| SHP-6T                     | 6000           | 40                             |
| SHP-3T                     | 3000           | 30                             |



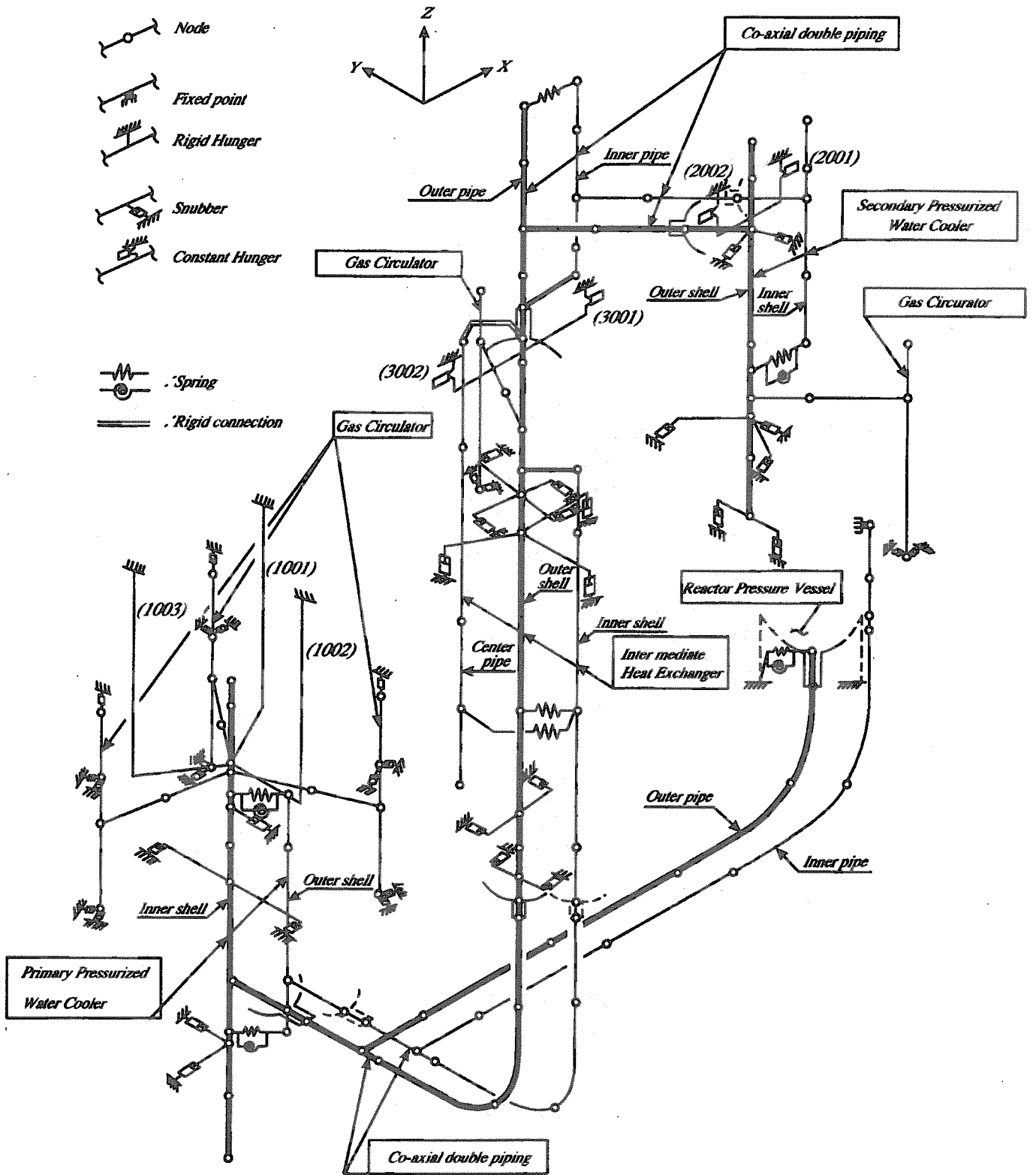
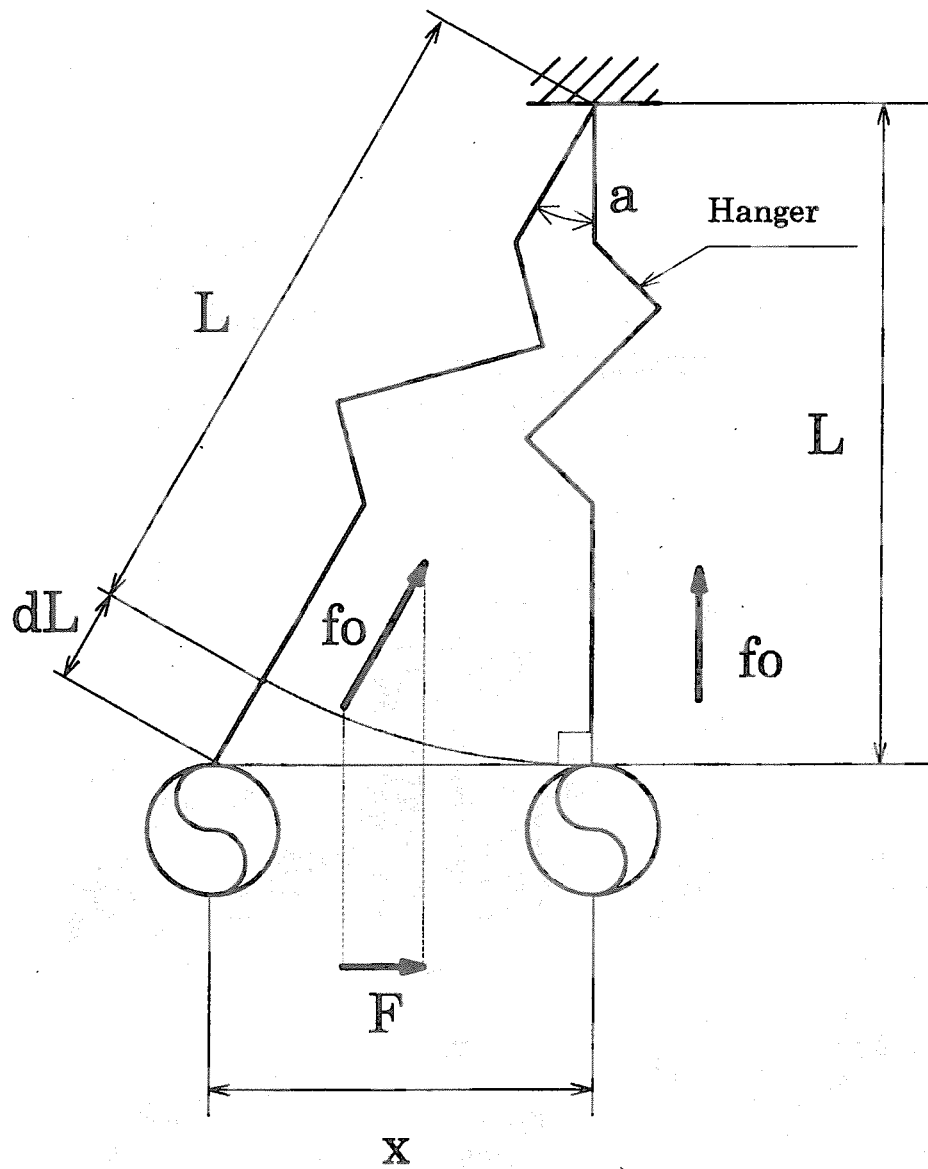


Fig. 5.1 Analytical model by FEM.



$$F = f_0 \sin \theta = x/L$$

$$k = f_0/L$$

$k$  : spring rate of hanger

Fig. 5.2 Schematic diagram of constant rigid hanger modeling.

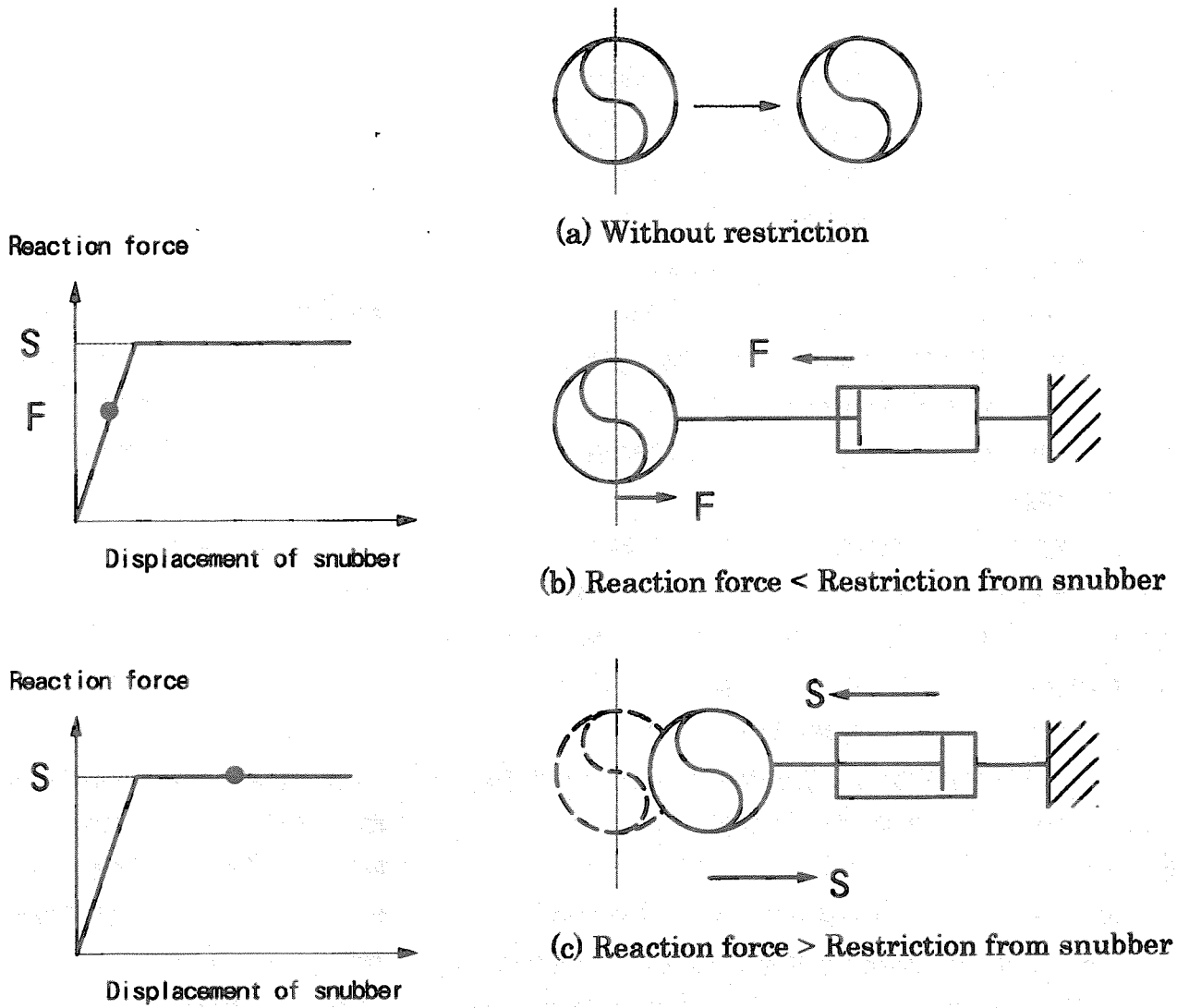


Fig. 5.3 Schematic diagram of hydraulic snubber modeling.

## 5.2 解析評価

### 5.2.1 熱変形挙動の解析的評価

高温配管の熱変形挙動評価において、油圧防振器の実機抵抗力が未知であるのは前述のとおりである。一方、熱膨張係数は、設計計算においては「構造等の技術基準」に従っているものの、これら値は膨大なデータベースより策定されるため、実機の熱膨張係数はこれら策定された値と若干異なることが考えられる。従って、熱膨張係数と油圧防振器の抵抗力をパラメータとして考え、単独運転について実機挙動を模擬した。解析ケース一覧を Table 5.3 に示す。

まず、熱膨張係数について確認するため、熱膨張係数を「構造等の技術基準」に従ったケース (Case 1.1) および熱膨張係数を「構造等の技術基準」記載値の 90%としたケース (Case 1.2) の解析を実施した。(なお、油圧防振器の抵抗力は 1mm/sec における実測値を用いている。) Fig.5.4 に示す解析結果より、熱膨張係数を「構造等の技術基準」記載値から減少させることで、解析結果は実測挙動に近づくことが確認された。

次に、熱膨張係数を「構造等の技術基準」記載値の 90%とし、油圧防振器の抵抗力をパラメータとした解析を実施した。抵抗力を 1mm/sec における実測値の 50%とした解析を Case2 として Case1.2 と比較した。結果を Fig.5.5 に示す。同図より、油圧防振器の抵抗力を減少方向に変化させることで解析結果は良く実測挙動を模擬でき、特に IHX 上部周辺(X5~X6、Y5~Y6)について、油圧防振器の抵抗力に対する挙動変化が顕著に現れた。

以上より、熱膨張係数および油圧防振器の抵抗力を最適化することで実測挙動を模擬できる可能性が示されたが、さらに実機に発生する現象を考えた場合、油圧防振器に関しては個々において性能(摺動抵抗力)が異なることが考えられる。従って、次ケースとして個々の油圧防振器の抵抗力を実測値から減少させる方向で各々を適宜変化させ、実機挙動の模擬を試みた (Case 3)。Fig.5.6 に示す結果より、個々の油圧防振器抵抗力を適宜与えることで実機挙動を模擬できることが示された。

並列運転についても、Case 3 と同様に熱膨張係数を「構造等の技術基準」記載値の 90%、油圧防振器の抵抗力を実測値から減少させる方向で各々適宜与え解析を実施した (Case 4)。解析結果を Table 5.4 に示す。なお、同表中には単独運転の解析結果 (Case 3) も併記した。これらより、油圧防振器の抵抗力を適宜与えることで、運転モードに関わらず実測挙動を良く模擬できることが明らかとなった。

### 5.2.2 健全性評価

原子炉出力 20MW における、単独・並列運転での配管に発生する軸力および合成モーメントの比較を Fig. 5.7 および Fig. 5.8 に示す。同図より、軸力、合成モーメントともに並列運転が単独運転を上回ることから、応力評価について単独運転は並列運転に包絡されるため、並列運転のみの評価を行うこととした。

並列運転での熱変形挙動について 20MW 解析評価値および定格出力 (30MW) 運転時の予測解析結果を Table 5.5 および Fig. 5.9 に示す。なお、解析条件は Case4 と同等である。各評価点について、変形挙動は温度変化に対して一次的に変化する。

配管軸力およびモーメントについて、強度評価点における分布および出力との関係を Fig. 5.10~

Fig. 5.13 に示す。軸力については、ティー部および RPV エルボ部の絶対値が大きいものの、その変化は出力に対して一次的である。一方、モーメントはティー部および PWC ノズル部の値が大きいものの、出力に対する増加率は、出力の上昇に伴い低下する傾向を示している。

機器の各強度評価点における 1 次応力の評価値を Table 5.6 に示す。なお、HTTR の二重管の熱膨張応力は、「高温ガス炉第 1 種機器の高温構造設計指針」に従い、1 次応力に分類される。また、配管力の最も厳しいティー部について、一次応力、ひずみおよびクリープ疲労損傷の制限に対する評価結果を Table 5.7 に示す。表中の各記号は参考文献 4) に示すところによる。なお、他の評価点においても、評価値は制限値を十分満足しており、各運転状態において機器の健全性は確保されることを確認した。

Table 5.3 Analytical conditions.

| 解析ケース    | 運転モード | 油圧防振器抵抗力         | 熱膨張係数            |
|----------|-------|------------------|------------------|
| Case 1.1 | 単独    | 1mm/sec 実測値      | 構造等の技術基準記載値      |
| Case 1.2 | 単独    | 1mm/sec 実測値      | 構造等の技術基準記載値の 90% |
| Case 2   | 単独    | 1mm/sec 実測値の 50% | 構造等の技術基準記載値の 90% |
| Case 3   | 単独    | 各々適宜値            | 構造等の技術基準記載値の 90% |
| Case 4   | 並列    | 各々適宜値            | 構造等の技術基準記載値の 90% |

Table 5.4 Comparison between experimental result and analytical result at 20MW.

| 計測点名称            | 単位 | PID 番号、<br>計測位置 | 単独運転実測値 | 単独運転解析値<br>解析ケース (Case 3) | 並列運転実測値 | 並列運転解析値<br>解析ケース (Case 4) |
|------------------|----|-----------------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|
| 原子炉入口 He 温度      | ℃  | 13A130          | 293.0   | —                         | 295.0   | —                         |
| RPV 下部エルボ変位量     | mm | X1              | 0.07    | -0.6                      | -0.26   | -0.6                      |
| RPV 下部エルボ変位量     | mm | Z1              | -13.61  | -11.9                     | -13.39  | -11.9                     |
| 1次 PWC 頂部変位量     | mm | X2              | 24.37   | 25.8                      | 24.70   | 26.0                      |
| 1次 PWC 頂部変位量     | mm | Y2              | -8.11   | -6.6                      | -11.22  | -6.6                      |
| 1次 PWC 頂部変位量     | mm | Z2              | 2.32    | 4.4                       | 3.09    | 4.1                       |
| 1次 PWC 二重管接続部変位量 | mm | X3              | 26.28   | 27.2                      | 26.15   | 27.4                      |
| 1次 PWC 二重管接続部変位量 | mm | Y3              | -3.28   | -2.3                      | -4.14   | -2.3                      |
| 1次 PWC 二重管接続部変位量 | mm | Z3              | -10.96  | -8.5                      | -9.52   | -8.6                      |
| エルボ変位量           | mm | X4              | 25.47   | 25.9                      | 25.54   | 26.1                      |
| エルボ変位量           | mm | Y4              | 8.13    | 11.1                      | 8.59    | 11.1                      |
| エルボ変位量           | mm | Z4              | -12.45  | -9.5                      | -10.90  | -9.6                      |
| IHX 上部変位量        | mm | X5              | 3.65    | 3.4                       | 9.48    | 4.4                       |
| IHX 上部変位量        | mm | Y5              | 5.02    | 5.7                       | 5.85    | 6.0                       |
| IHX 上部変位量        | mm | Z5              | 26.69   | 28.6                      | 30.46   | 31.7                      |
| 2次系二重管部変位量       | mm | X6              | -4.20   | -4.9                      | 1.90    | -4.4                      |
| 2次系二重管部変位量       | mm | Y6              | 3.89    | 4.2                       | 2.47    | 4.4                       |
| 2次系二重管部変位量       | mm | Z6              | 26.91   | 29.2                      | 30.87   | 32.0                      |

Table 5.5 Predicted thermal displacement behavior at 20MW,30MW.

| 計測点名称                | 単位 | 計測位置 | 20MW 解析値 | 30MW 予測値 |
|----------------------|----|------|----------|----------|
| RPV 下部エルボ(X 方向)      | mm | X1   | -0.6     | -0.9     |
| RPV 下部エルボ(Z 方向)      | mm | Z1   | -11.9    | -15.3    |
| 1 次 PWC 頂部(X 方向)     | mm | X2   | 26.0     | 36.4     |
| 1 次 PWC 頂部(Y 方向)     | mm | Y2   | -6.6     | -10.3    |
| 1 次 PWC 頂部(Z 方向)     | mm | Z2   | 4.1      | 7.2      |
| 1 次 PWC 二重管接続部(X 方向) | mm | X3   | 27.4     | 38.3     |
| 1 次 PWC 二重管接続部(Y 方向) | mm | Y3   | -2.3     | -4.6     |
| 1 次 PWC 二重管接続部(Z 方向) | mm | Z3   | -8.6     | -11.5    |
| エルボ部(X 方向)           | mm | X4   | 26.1     | 37.3     |
| エルボ部(Y 方向)           | mm | Y4   | 11.1     | 14.4     |
| エルボ部(Z 方向)           | mm | Z4   | -9.6     | -13.0    |
| IHX 上部(X 方向)         | mm | X5   | 4.4      | 8.0      |
| IHX 上部(Y 方向)         | mm | Y5   | 6.0      | 5.5      |
| IHX 上部(Z 方向)         | mm | Z5   | 31.7     | 46.2     |
| 2 次系二重管部(X 方向)       | mm | X6   | -4.4     | -4.5     |
| 2 次系二重管部(Y 方向)       | mm | Y6   | 4.4      | 4.0      |
| 2 次系二重管部(Z 方向)       | mm | Z6   | 32.0     | 47.8     |

Table 5.6 (1) Evaluated stress values for each position.

| 強度計算箇所     | 一 次 応 力 の 制 限                                       |  |   |  |   |  |   |  |
|------------|---|--|---|--|---|--|---|--|
|            | 設計条件  | I、II   |   | III  |   | IV   |   |  |
|            |   | $P_s+P_s^*$<br>( $S_m$ )<br>< $P_L+P_L^*$<br>+ $P_b+P_b^*$ ><br>( $K_sS_m$ ) | $P_s$<br>( $S_t$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $K_sS_t$ ) | $P_s+P_s^*$<br>( $1.2S_m$ )<br>< $P_L+P_L^*$<br>+ $P_b+P_b^*$ ><br>( $1.2K_sS_m$ ) | $P_s$<br>( $S_t$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $K_sS_t$ ) | $P_s+P_s^*$<br>( $2S_m$ )<br>< $P_L+P_L^*$<br>+ $P_b+P_b^*$ ><br>( $2K_sS_m$ ) | $P_s$<br>( $2S_R/3$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $2K_sS_R/3$ ) |  |
|            | $t_c$<br>( $t_m$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $1.5S_0$ ) | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |
| RPV /ズル部   | 17.4<br>(36.8)<br>3.0<br>(17.3)                     | 5.4<br>(14.2)<br>5.4<br>(19.0)   | 5.4<br>(15.7)<br>5.4<br>(17.4)                      | 5.8<br>(17.0)<br>5.8<br>(22.8)   | 5.8<br>(20.8)<br>5.8<br>(23.3)                      | 5.8<br>(28.4)<br>5.8<br>(38.1)   | 5.8<br>(25.8)<br>5.8<br>(29.2)                            |  |
| RPV 下部エルボ部 | 17.4<br>(36.8)<br>3.1<br>(17.6)                     | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |
| PPWC /ズル部  | 17.4<br>(36.8)<br>3.1<br>(17.6)                     | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |
| ティー (分岐側)  | 17.4<br>(36.8)<br>2.9<br>(17.6)                     | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |

単位(kg/mm<sup>2</sup>)



Table 5.6 (2) Evaluated stress values for each position.

| 強度計算箇所      | 一 次 応 力 の 制 限                   |  |   |  |   |  |   |  |
|-------------|---------------------------------|--|---|--|---|--|---|--|
|             | 設計条件                            | I、II   |   | III  |   | IV   |   |  |
|             | $t_c$<br>( $t_m$ )              | $P_s+P_s^*$<br>( $S_m$ )<br>< $P_L+P_L^*$<br>+ $P_b+P_b^*$ ><br>( $K_sS_m$ ) | $P_s$<br>( $S_t$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $K_sS_t$ ) | $P_s+P_s^*$<br>( $1.2S_m$ )<br>< $P_L+P_L^*$<br>+ $P_b+P_b^*$ ><br>( $1.2K_sS_m$ ) | $P_s$<br>( $S_t$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $K_sS_t$ ) | $P_s+P_s^*$<br>( $2S_m$ )<br>< $P_L+P_L^*$<br>+ $P_b+P_b^*$ ><br>( $2K_sS_m$ ) | $P_s$<br>( $2S_R/3$ )<br>< $P_L+P_b$ ><br>( $2K_sS_R/3$ ) |  |
| テイー (母管側 1) | 17.4<br>(36.8)<br>2.9<br>(17.6) | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |
| テイー (母管側 2) | 17.4<br>(36.8)<br>2.9<br>(17.6) | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |
| IHX エルボ部    | 17.4<br>(36.8)<br>3.0<br>(17.6) | 5.4<br>(14.2)<br>5.6<br>(19.0)   | 5.4<br>(15.7)<br>5.4<br>(17.4)                      | 5.8<br>(17.0)<br>5.8<br>(22.8)   | 5.8<br>(20.8)<br>5.8<br>(23.3)                      | 5.8<br>(28.4)<br>5.8<br>(38.1)   | 5.8<br>(25.8)<br>5.8<br>(29.2)                            |  |
| IHX ノズル部    | 17.4<br>(36.8)<br>3.0<br>(17.6) | 4.4<br>(14.2)<br>4.4<br>(19.0)   | 4.4<br>(15.7)<br>4.4<br>(17.6)                      | 4.7<br>(17.0)<br>4.7<br>(22.8)   | 4.7<br>(20.8)<br>4.7<br>(23.5)                      | 4.7<br>(28.4)<br>4.7<br>(38.1)   | 4.7<br>(25.8)<br>4.7<br>(29.4)                            |  |

単位(kg/mm<sup>2</sup>)

Table 5.7(1) Result of structural integrity evaluation at Tee.

1次応力の制限(ティー分岐側)

単位 (応力: kg/mm<sup>2</sup>)

| 運転状態                           | 評価項目  | 温度 (°C) | 時間 (hr)  | 計算値  | 許容値  | 備考           |
|--------------------------------|---|---------|----------|------|------|--------------|
| 設計条件                           | $t_c \leq t_m$  | 430     | —        | 17.4 | 36.8 |              |
|                                | $\langle P_L + P_b \rangle \leq 1.5S_0$                     | 430     | —        | 2.9  | 17.6 |              |
| 運転状態<br>I、II<br>(T)            | $\langle P_s + P_s^* \rangle \leq S_m$                      | 430     | —        | 4.4  | 14.2 |              |
|                                | $\langle P_s \rangle \leq S_t$                              | 430     | 6.00E+03 | 4.4  | 15.7 |              |
|                                | $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq K_t S_m$    | 430     | —        | 4.4  | 19.0 | $K_s = 1.34$ |
|                                | $\langle P_L + P_b \rangle \leq K_t S_t$                    | 430     | 6.00E+03 | 4.4  | 17.6 | $K_t = 1.12$ |
| 運転状態<br>III                    | $\langle P_s + P_s^* \rangle \leq 1.2S_m$                   | 430     | —        | 4.7  | 17.0 |              |
|                                | $\langle P_s \rangle \leq S_t$                              | 430     | 3.00E+02 | 4.7  | 20.8 |              |
|                                | $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq 1.2K_s S_m$ | 430     | —        | 4.7  | 22.8 | $K_s = 1.34$ |
|                                | $\langle P_L + P_b \rangle \leq K_t S_t$                    | 430     | 3.00E+02 | 4.7  | 23.5 | $K_t = 1.13$ |
| 運転状態<br>I、II、<br>III<br>(T)    | $\sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B$                          | 430     | 6.00E+03 |      |      |              |
|                                |   | 399     | 1.05E+05 | 0.04 | 1.00 | $B = 1.00$   |
|                                | $\sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0$                        | 430     | 6.00E+03 |      |      |              |
|                                |   | 399     | 1.05E+05 | 0.04 | 1.00 |              |
| 運転状態<br>IV                     | $\langle P_s + P_s^* \rangle \leq 2S_m$                     | 430     | —        | 4.7  | 28.4 |              |
|                                | $\langle P_s \rangle \leq 2S_R/3$                           | 430     | 3.00E+01 | 4.7  | 25.8 |              |
|                                | $\langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* \rangle \leq 2K_s S_m$   | 430     | —        | 4.7  | 38.1 | $K_s = 1.34$ |
|                                | $\langle P_L + P_b \rangle \leq 2K_t S_R/3$                 | 430     | 3.00E+01 | 4.7  | 29.4 | $K_t = 1.14$ |
| 運転状態<br>I、II、<br>III<br>IV、(T) | $\sum_i \frac{t_i}{t_{Ri}} \leq B_R$                        | 430     | 6.00E+03 |      |      |              |
|                                |   | 399     | 1.05E+05 | 0.02 | 1.00 | $B_R = 1.00$ |
|                                | $\sum_j \frac{t_j}{t_{Rb}} \leq 1.0$                        | 430     | 6.00E+03 |      |      |              |
|                                |   | 399     | 1.05E+05 | 0.02 | 1.00 |              |

注記 (1) (T)は、試験状態のうち「構造等の技術基準」別表第2の適用温度範囲を超える試験状態を示す。

(2) 厚さの単位はmmとする。

Table 5.7(2) Result of structural integrity evaluation at Tee.

1次+2次応力の制限

$$S^*n = \langle P_L^* + P_b^* + Q^* \rangle_R$$

$$Sn = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R$$

$$Sn' = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* - Q_{Tb} - Q_{Tb}^* \rangle_R$$

| 負荷サイクル | 温度 (°C) | $S^*n \leq 3S_{mH}$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | $Sn \leq 3S_m$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | $Sn \leq \beta_s(3S_m)$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | $Sn' \leq 3S_m$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | 備考 |
|--------|---------|--|---|--|--|----|
| S2     | 430     | 3.1  | 42.6                                    | ---  | ---                                      |    |
| 2C     | 430     | ---  | ---                                     | 5.2  | 69.2                                     |    |
|        |         | Srh=42.6(kg/mm <sup>2</sup> )                |   | βs=2.5   |  |    |

Saの制限

$$T_o = 401(°C)$$

$$P' = \langle P_L + P_L^* + (P_b + P_b^*) / K_t \rangle_{max} = 7.84 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$Q' = \langle Q + Q^* \rangle_R$$

| 負荷サイクル<br>番号 | 壁厚平均金属温度<br>(°C) | $\langle Q + Q^* \rangle_R$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | $P' + Q' \leq Sa$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | 備考     |         |
|--------------|------------------|--|--|--------|---------|
|              |                  |  |  | Saの評価式 | 温度 (°C) |
| 2A 01-S1 C   | 430 20           | 4.39   | 12.2 18.1                                  | 1.25St | 430     |

メカニカルラチェットの制限

$$X_s = \langle P_L + P_b \rangle / (1.5 S_{mH})$$

$$Y_s = S_n^* / (1.5 S_{mH})$$

| 負荷サイクル<br>番号 | 最高金属温度<br>(°C) | $S_n^* \leq \beta_s (3 S_{mH})$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) |       | Xs       | Ys       | 領域 | 許容領域      |
|--------------|----------------|--|-------|----------|----------|----|-----------|
| S2           | 430            | 6.3  | 106.5 | 0.376678 | 0.295034 | E  | E,S1,S2,P |
| βs = 2.5     |                |  |       |          |          |    |           |

Table 5.7(3) Result of structural integrity evaluation at Tee.

累積疲れ損傷係数の算定(その1)

$$\epsilon t = K_A' \epsilon_n + K \epsilon_o + K_T \epsilon_F$$

$$K_A' = (S'/S)K^2$$

| ひずみサイクル | 最高金属温度 (°C) | 回数 n | $\epsilon_n$ | $\epsilon_o$ | $\epsilon_F$                   | K         | $K_A'$<br>Ke | $\epsilon t$<br>S'<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Nd        | n/Nd      | 備考       |   |
|---------|-------------|------|--------------|--------------|--------------------------------|-----------|--------------|---|-----------|-----------|----------|---|
|         |             |      |              |              | $S_p$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) |           |              |   |           |           |          |   |
| 2A03    | 1C01        | 430  | 250          | 8.713E-06    | 0.000E+00                      | 2.474E-05 | 1.27         | 1.27  | 4.100E-05 | 1,000,000 | 0.000    | B |
| 2A01    | C           | 399  | 198          | 3.505E-04    | 0.000E+00                      | 3.085E-04 | 1.37         | 1.37  | 8.536E-04 | 1,000,000 | 0.000198 | B |
| 2A01-S1 | C           | 399  | 1            | 6.233E-04    | 0.000E+00                      | 5.453E-04 | 1.36         | 1.36  | 1.508E-03 | 1,000,000 | 0.000001 | B |
| 3A01    | C           | 399  | 1            | 3.775E-04    | 0.000E+00                      | 3.319E-04 | 1.36         | 1.36  | 9.150E-04 | 1,000,000 | 0.000001 | B |
| 1A01    | C           | 399  | 89           | 3.419E-04    | 0.000E+00                      | 3.010E-04 | 1.42         | 1.42  | 8.497E-04 | 1,000,000 | 0.000089 | C |
| 3B01    | 2A02        | 430  | 211          | 2.367E-05    | 0.000E+00                      | 2.756E-05 | 1.27         | 1.27  | 6.342E-05 | 1,000,000 | 0.000211 | B |
|         | S1          | 430  | 200          | 2.746E-04    | 0.000E+00                      | 2.423E-04 | 1.21         | 1.21  | 6.255E-04 | 1,000,000 | 0.0002   | A |
| T       | C           | 100  | 40           | —            | —                              | 3.257E+01 | —            | —   | —         | 1,000,000 | 0.00004  | D |

KT=1.21 Df =  $\sum (n_i/Nd_i) = 0.00099$

注記 (1) 備考の記号の意味は、次のとおりである。  
 A: 「材料強度基準等」に示す許容ひずみ範囲(A)  
 B: 「材料強度基準等」に示す許容ひずみ範囲(B)  
 C: 「材料強度基準等」に示す許容ひずみ範囲(C)  
 D: 「構造等の技術基準」別図第2による。  
 (2) 二段表示記号の下端( $S_p, K_e, S'$ )は、ひずみサイクルが「構造等の技術基準」別表第2の温度範囲内にある場合に用いる。

累積クリープ損傷係数の算定(その1)

(1/2)  $D_{CN}$ の算定

| ひずみサイクル | $S_K$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | 温度<br>T<br>(°C) | 時間<br>t<br>(hr) | 許容時間<br>$T_d$<br>(hr) | $2 \sum (t/T_d)$ | 備考 |
|---------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------------------|----|
| 2A      | 1A                             | 430             | 6.000E+03       | 1.015E+07             | 0.0012           | A  |
| 2A      | S1                             | 399             | 1.050E+05       | 1.034E+07             | 0.0203           | A  |

$$DCN = \sum_K (DCN)_K = 2 \sum_K (t/T_d)_K = 2.03081677453528E-02$$

注記 備考の記号の意味は、次のとおりである。  
 A:  $S_K = \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle$   
 B:  $S_K = \text{Min} [1.25S_y|_K, \text{Max} \{ \langle P_m \rangle + 0.5 \langle P_L + P_L^* + P_b + P_b^* + Q + Q^* \rangle_R, \langle P_L + P_b + Q \rangle \}]$   
 C:  $S_K = S_g$

(2/2)  $D_{OP}$ の算定

| ひずみサイクル | $\epsilon t$ | $\text{Max}(3S_m/E, 2S_g/E)$ | n         | $D^{**}$ | $nD^{**}$ | 備考  |     |                    |
|---------|--------------|------------------------------|-----------|----------|-----------|-----|-----|--------------------|
| 2A      | C            | 1.508E-03                    | 2.389E-03 | —        | —         | 0.0 | 0.0 | 3S <sub>m</sub> /E |

T=(°C)  $D_{CP} = \sum (\eta_K D_K^{**}) = 0$

注記 備考には、3S<sub>m</sub>/E又は2S<sub>g</sub>/Eのうち大きい方を示す。

Table 5.7(4) Result of structural integrity evaluation at Tee.

クリープ疲れ損傷の制限

| 評価項目  | $D_f$ | $D_C$ | $D_f + D_C$ | 許容値   |
|---|-------|-------|-------------|-------|
| $D_f + D_C \leq D$  | 0.001 | 0.02  | 0.021       | 0.602 |
| $D_C = D_{CN} + D_{CP}$<br>$D_{CN} = 0.305$<br>$D_{CP} = 0$ |       |       |             |       |

座屈の防止

| 運転状態 | 評価項目                              | 温度   | 計算値                   | 許容値                   | 備考                 |
|------|-----------------------------------|------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
|      |                                   | (°C) | (kg/mm <sup>2</sup> ) | (kg/mm <sup>2</sup> ) |                    |
| Ⅲ    | $F_C/A + D_0M/(2yl) \leq S_y/F_b$ | 430  | 0.4                   | 11.89                 | $y=1.3$<br>$f_B=3$ |
| Ⅳ    | $F_C/A + D_0M/(2yl) \leq S_y/F_b$ | 430  | 0.15                  | 15.85                 | $y=1.3$<br>$f_B=3$ |

注記: 本強度計算箇所は、内圧による引張応力が大きく、他の応力を組み合わせても圧縮応力は発生しないため、時間に依存する座屈は評価の必要がない。

This is a blank page.

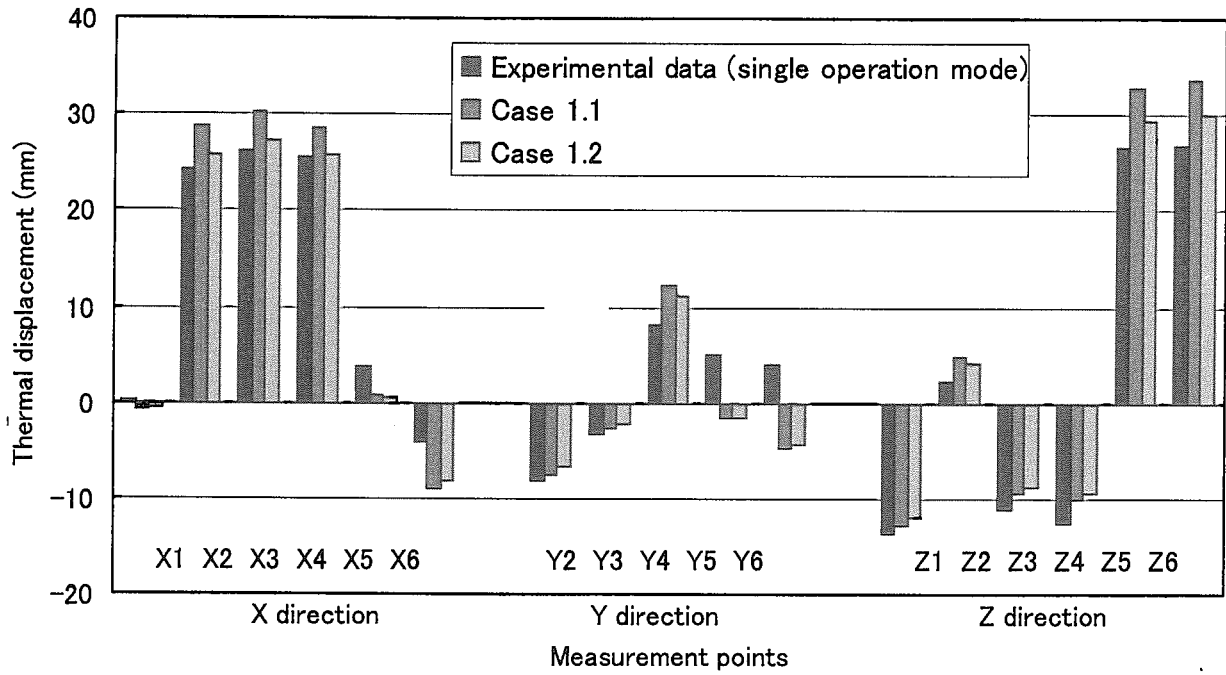


Fig. 5.4 The effect of thermal expansion coefficients.

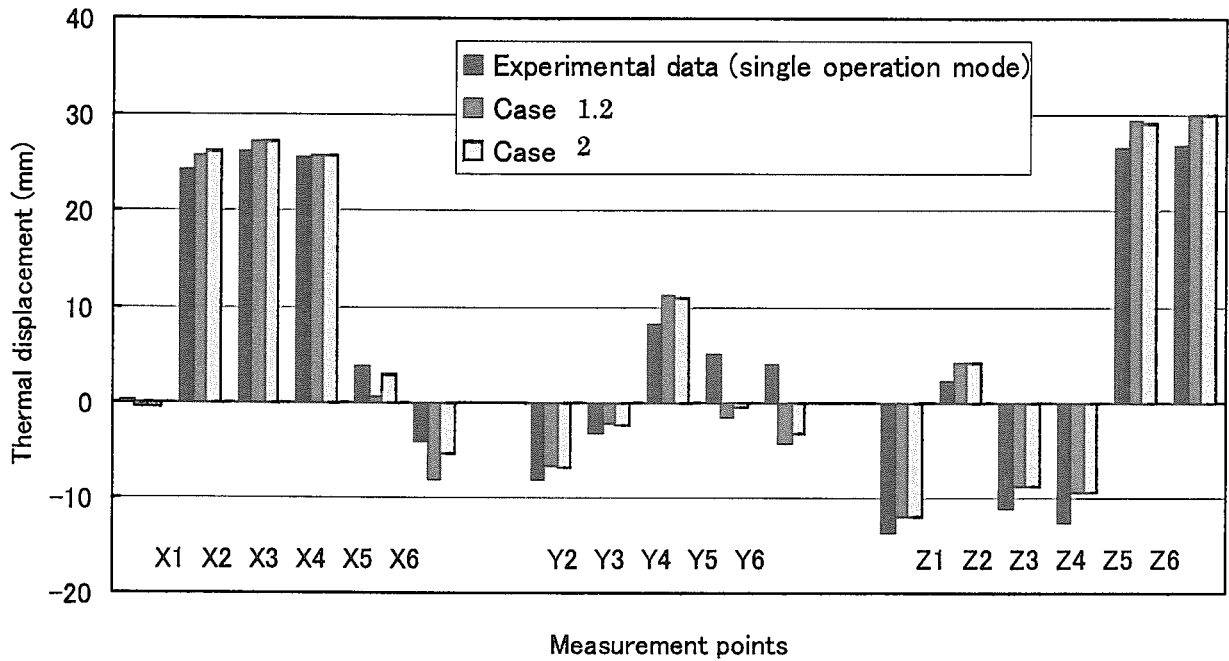


Fig. 5.5 The effect of resistance force from hydraulic snubbers.

This is a blank page.



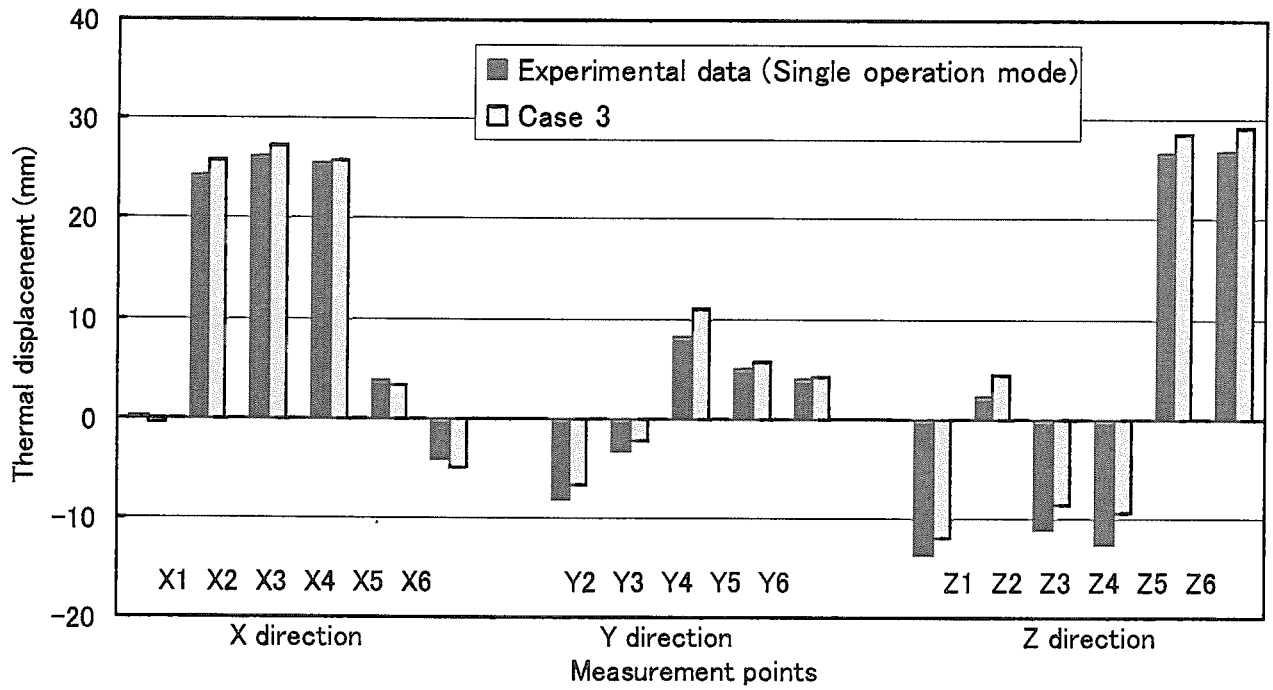


Fig. 5.6 Comparison between experimental and analytical results of single operation mode.

This is a blank page.

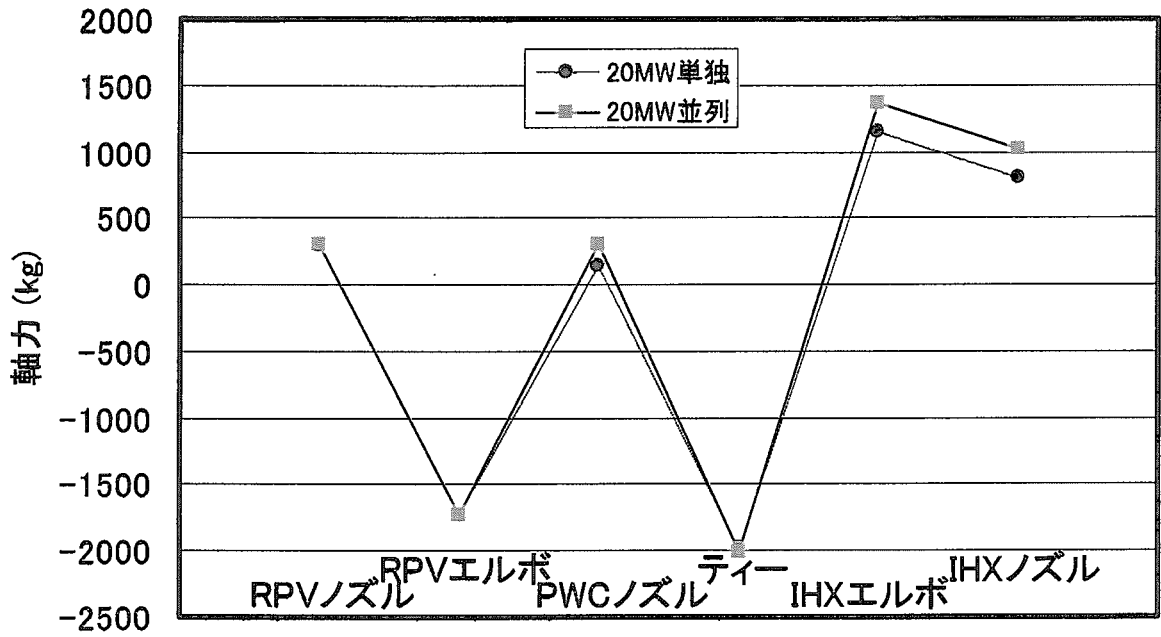


Fig.5.7 Axial force distribution of single and parallel operation mode at 20MW.

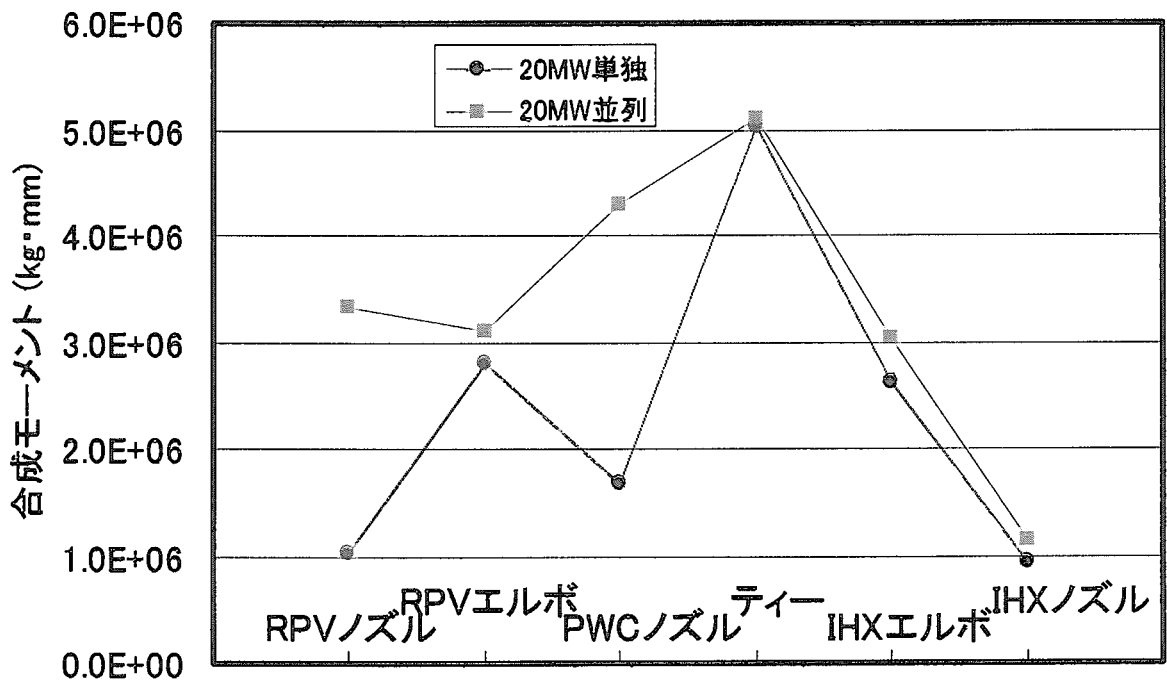


Fig.5.8 Moment distribution of single and parallel operation mode at 20MW.

This is a blank page.

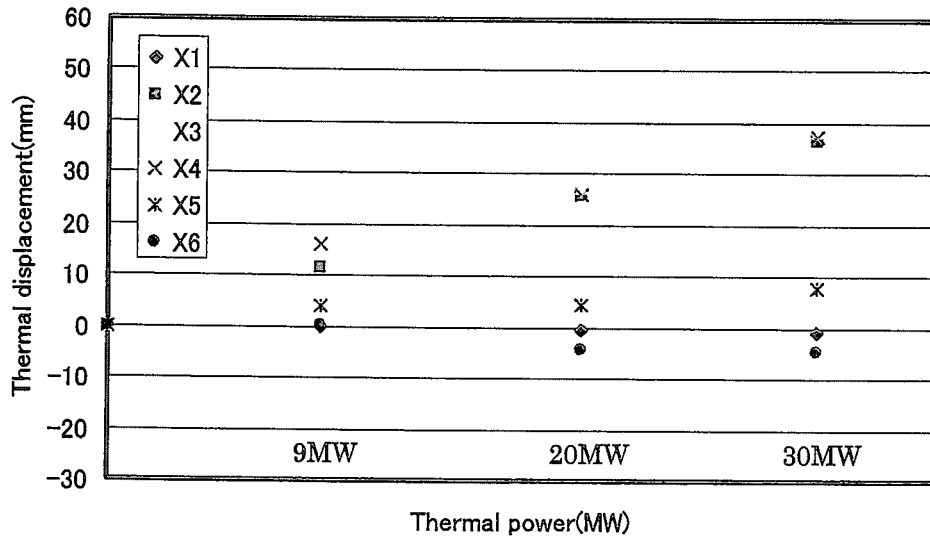


Fig.5.9 (1) Predicted thermal displacement for X direction.

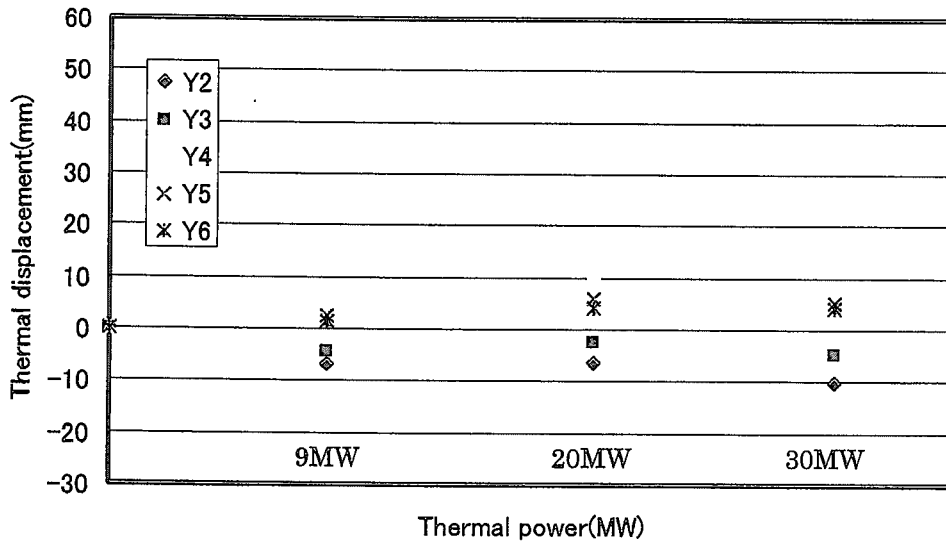


Fig.5.9 (2) Predicted thermal displacement for Y direction.

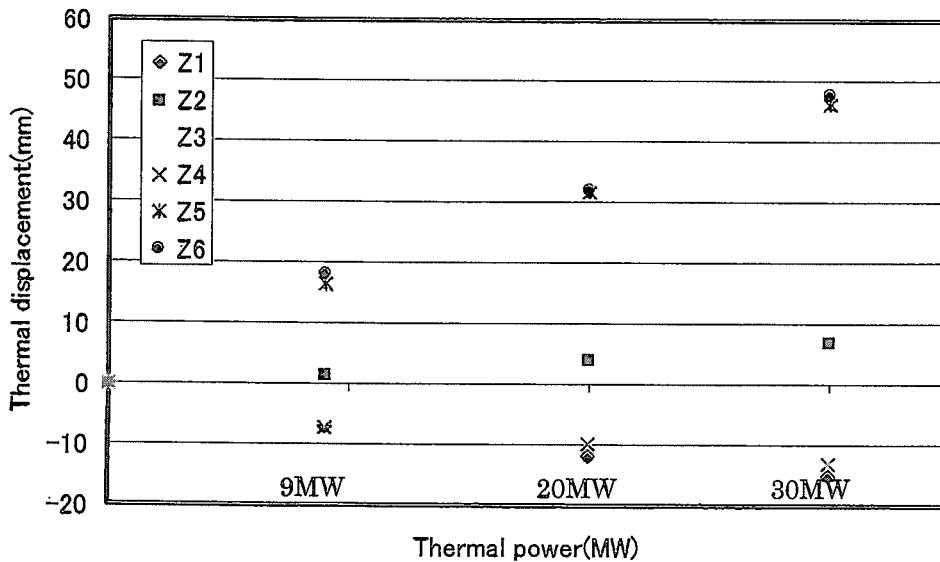


Fig.5.9 (3) Predicted thermal displacement for Z direction.

This is a blank page.

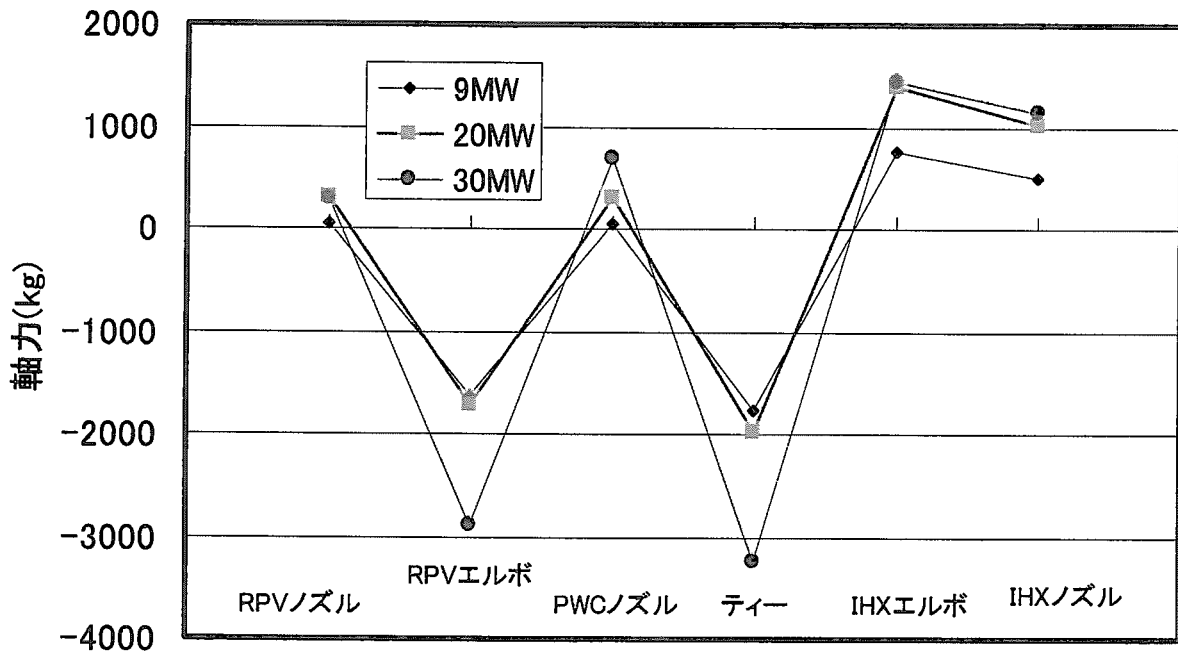


Fig.5.10 Distribution of axial force at parallel operation mode.

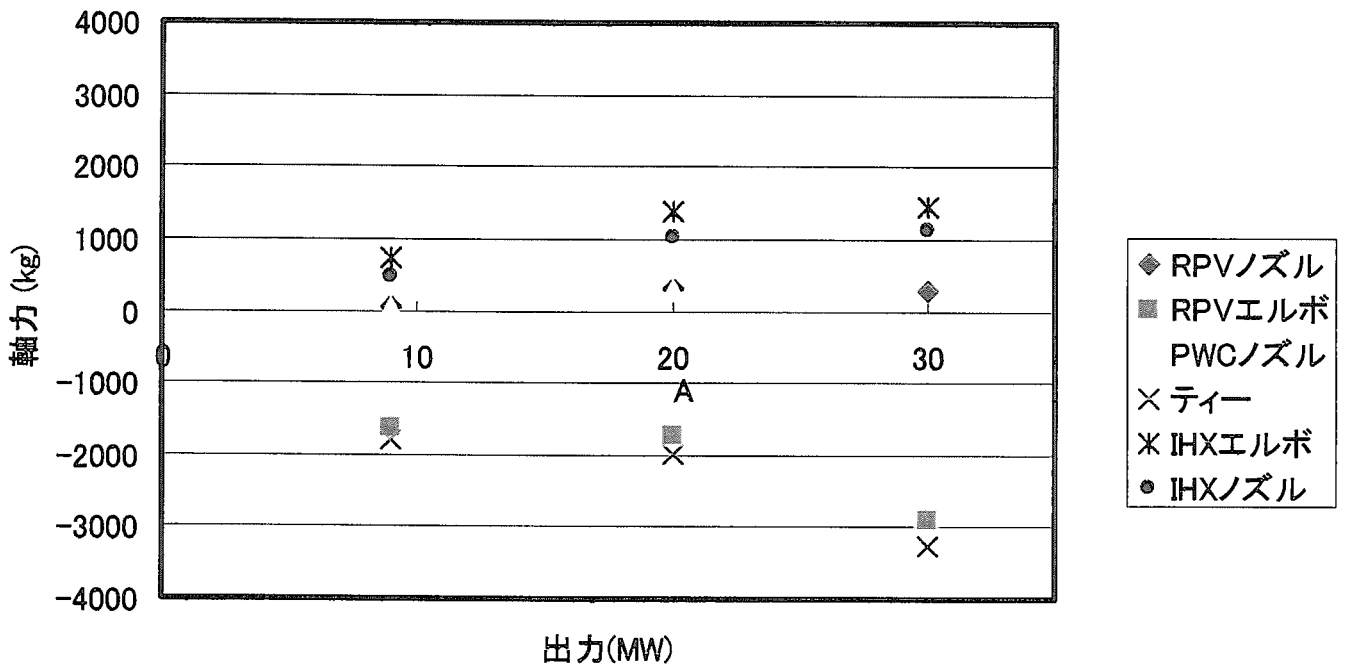


Fig.5.11 Change of axial force with thermal power at parallel operation mode.

This is a blank page.



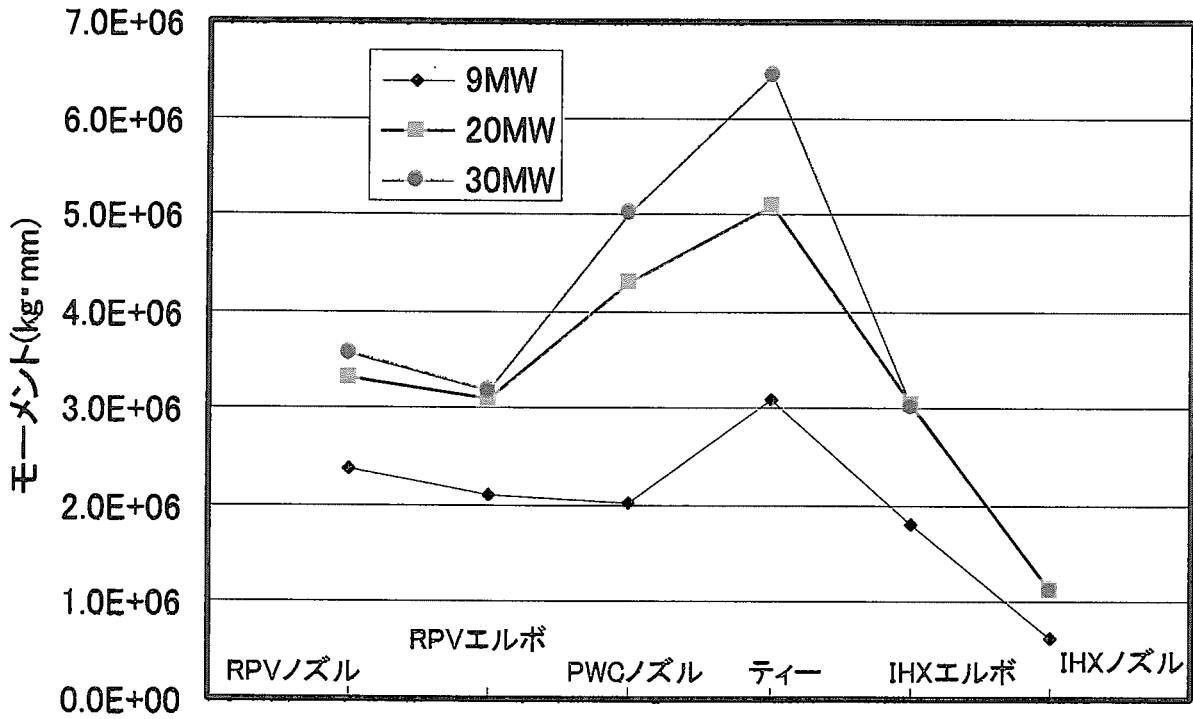


Fig.5.12 Distribution of moment at parallel operation mode.

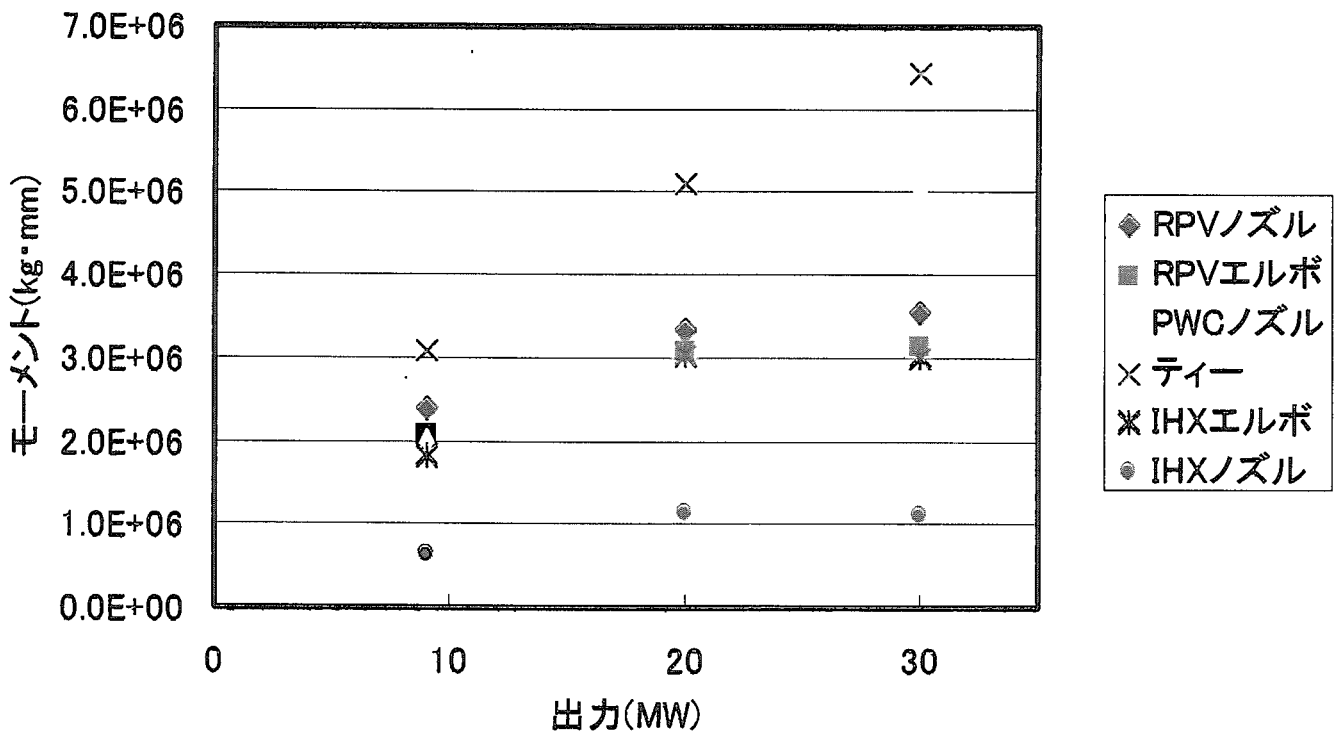


Fig.5.13 Change of moment with thermal power at parallel operation mode.

This is a blank page.

## 6. 結論

HTTRの出力上昇試験(2)で、高温配管の熱変形測定試験を実施した。本試験により以下のことが明らかとなった。

- (1)3次元浮動支持方式を採用した配管系においては、従来の機器・配管系の設計手法とは異なり、その熱変形挙動を評価するためには支持構造物からの抵抗力を考慮する必要があることが明らかとなった。
- (2)配管系の熱膨張は、温度に対してほぼ一次的に変化するが、一定温度に対する値にはばらつきがあり、原因は配管熱膨張時における油圧防振器の抵抗状態の違いによるものと推測される。
- (3)支持構造物からの抵抗力は、ハンガ類からの水平分力および油圧防振器の摺動抵抗力が存在し、油圧防振器の抵抗力を各々適宜与えることにより、実機の熱変形挙動を再現できることが確認された。
- (4)各運転状態において、機器の健全性は確保されることが確認された。

なお、既報<sup>3)</sup>よりハンガ類からの水平分力の影響は明らかであり、その影響は IHX 等の長尺構造物に対して顕著となる。従って、機器のハンガ吊り下げ位置を再検討することで、ハンガ水平分力の影響を減少させ熱応力のさらなる低減が可能になると考えられる。

## 謝辞

本試験を行うに当たり、原子炉の運転を担当した HTTR 試験室の運転班の各位および測定作業等に協力いただいた HTTR 技術開発室の試験班の各位に深く感謝致します。

また本報をまとめるに当たり有益な助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部 馬場治部長、同部大久保実次長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 田井 浩一,構造解析コード”MSAP”について1,配管技術,vol.1,pp102,1990.
- 2) Hibbit, karlsson and Sorensen, INC. :ABAQUS/Standard User's Manual ver.5.7, 1997.
- 3) S.Hanawa, M.Ishihara, Y.Tachibana and H.Koikegami, : Experimental and analytical study on thermal displacement characteristics of cooling system applied to floating support unit., ICONE-8, 8251, 2000.
- 4)高温工学試験研究炉設計室、高温工学試験研究炉の高温構造設計方針、JAERI-M 89-005 (1989)

# 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    | 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 <sup>-1</sup>     |
| 力           | ニュートン  | N  | m·kg/s <sup>2</sup> |
| 圧力、応力       | パスカル   | Pa | N/m <sup>2</sup>    |
| 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 <sup>2</sup>   |
| 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 <sup>2</sup>   |
| 放射能         | ベクレル   | Bq | s <sup>-1</sup>     |
| 吸収線量        | グレイ    | Gy | J/kg                |
| 線量等量        | 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<sup>-19</sup>J  
1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表5 SI接頭語

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

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        | b   |
| バール      | bar |
| ガール      | Gal |
| キュリー     | Ci  |
| レントゲン    | R   |
| ラド       | rad |
| レム       | rem |

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m  
1 b=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa  
1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq  
1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg  
1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy  
1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

(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、1eVおよび1u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、ヘクト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関係理事会指令では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 <sup>5</sup> dyn) | kgf      | lbf      |
|---|-------------------------|----------|----------|
|   | 1                       | 0.101972 | 0.224809 |
|   | 9.80665                 | 1        | 2.20462  |
|   | 4.44822                 | 0.453592 | 1        |

粘度 1Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))  
動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

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

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

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

| 放射能 | Bq                   | Ci                        |
|-----|----------------------|---------------------------|
|     | 1                    | 2.70270×10 <sup>-11</sup> |
|     | 3.7×10 <sup>10</sup> | 1                         |

| 吸収線量 | Gy   | rad |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

| 照射線量 | C/kg                  | R    |
|------|-----------------------|------|
|      | 1                     | 3876 |
|      | 2.58×10 <sup>-4</sup> | 1    |

| 線量当量 | Sv   | rem |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

HTTR出力上昇試験における高温配管熱変形挙動の評価(その1) 20MWまでの結果)



古紙配合率100%  
白化度70%再生紙を使用しています