

高温工学試験研究炉(HTTR)の高温機器・ 配管における熱変位挙動の評価

Evaluation of Thermal Displacement Behavior of High Temperature
Component and Piping System in HTTR

篠原 正憲 濱本 真平 藤本 望

Masanori SHINOHARA, Shimpei HAMAMOTO and Nozomu FUJIMOTO

大洗研究開発センター
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR
Oarai Research and Development Center

December 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

高温工学試験研究炉（HTTR）の高温機器・配管における熱変位挙動の評価

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

篠原 正憲・濱本 真平・藤本 望

(2009 年 9 月 24 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℃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、395℃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、機器配管の支持方式には、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有効性を確認する観点から重要である。

HTTR の定格運転では、1 次冷却設備の熱変位特性を知るために、高温配管の熱変位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。熱変位挙動は温度変化に対して 1 次的に変化することを確認した。解析評価結果から、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。

Evaluation of Thermal Displacement Behavior of High Temperature Component and Piping System in HTTR

Masanori SHINOHARA , Shimpei HAMAMOTO and Nozomu FUJIMOTO

Department of HTTR
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 24, 2009)

Temperature of the equipment in the primary cooling system of the High Temperature Engineering Test Reactor, HTTR, is very high because the coolant temperature at the reactor outlet reaches 950°C, and 395°C at inlet of the reactor. It is important to confirm the thermal displacement behavior of the high temperature component and piping system in the primary cooling system from the viewpoint of the structural integrity. As 3-dimensional floating support system is adopted to the cooling system, it is meaningful to verify of the thermal displacement effect behavior of the component and piping system.

In the rated operation (up to 30MW operation) of HTTR, thermal displacement behavior of the high temperature equipment and piping system was measured. This paper describes the experimental and analytical results of thermal displacement characteristics of the high temperature component and piping system. The results showed that the resistance force induced by the supporting system effects linearly to the thermal displacement behavior of cooling system, and the analytical results show a good agreement with the experimental results by optimizing the resistant force of the floating support system.

Keywords : HTTR, High Temperature Component, Piping, Thermal Displacement, Floating Support System

目次

1. 緒言	1
2. HTTRの冷却設備概要	2
3. HTTRの支持構造物	3
4. 機器の熱変位解析手法	4
5. 変位測定	5
5.1 測定方法	5
5.2 測定結果	5
6. 解析	6
6.1 解析手法	6
6.2 変位挙動評価	7
7. 結言	8
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the cooling system of HTTR	2
3. Outline of the support structure of HTTR	3
4. Method for thermal displacement analyzing of equipment	4
5. Thermal displacement measurement	5
5.1 Method	5
5.2 Results	5
6. Analysis	6
6.1 Method	6
6.2 Evaluation of thermal displacement behavior	7
7. Conclusion	8
Acknowledgment	8
References	8

This is a blank page.

1. 緒言

高温工学試験研究炉（HTTR）は原子力エネルギー利用の多様化として、水素製造と発電が可能である高温ガス炉の技術基盤の確立を目的とした試験研究炉である。HTTR は、燃料として被覆粒子燃料、主要な炉心構造材に黒鉛、1 次冷却材にヘリウムガスを用いた原子炉熱出力 30MW、原子炉入口冷却材温度 395℃、原子炉出口温度 850/950℃の日本初の高温ガス炉である。

HTTR では、機器健全性の観点から高温機器に発生する熱膨張を追従して熱応力を減少させる構造として、3 次元の浮動支持方式が取り入れられている。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（オイルスナバ）により構成される。本方式によれば、熱膨張等の緩慢な変位挙動は比較的自由であり、地震等の急激な挙動はオイルスナバ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。これらのコンスタントハンガ、リジッドハンガ及びオイルスナバの組合せによる 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、過度の熱応力が発生していないかを調べるために、3 次元浮動支持方式を用いた冷却機器等の熱変位挙動を確認することは重要である。

墙らは、出力 20MWまでの HTTR 出力上昇試験における高温配管熱変位挙動を評価し、熱変位挙動は温度変化に対して一次的に変化し、解析評価では、個々のオイルスナバに抵抗力を適宜与えることで実測熱変位挙動を再現できることを確認した¹⁾。しかし、中間熱交換器上部での熱変位が計測結果と解析結果で一致していなかった。そこでオイルスナバを機器から取り外して摺動抵抗を調べた結果、従来解析では、過大な抵抗力を用いていることが分かった。そこで本研究は、この問題（特に IHX 上部が一致しないこと）を解決するために、オイルスナバの抵抗力に着目して検討した。

HTTR では、定格単独運転（熱出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850℃）を平成 16 年 1 月 27 日から 2 月 25 日(RS-5)および平成 19 年 1 月 23 日から 2 月 2 日(RS-9)にかけて実施した。また、高温単独運転（熱出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 950℃）を平成 16 年 3 月 31 日から 5 月 1 日(PT-5)にかけて実施した。運転中には、1 次冷却設備の熱変位挙動を知るために、1 次冷却設備を構成する高温配管系の熱変位挙動を測定した。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位挙動を確認した。本報告では、HTTR の 1 次冷却設備および支持構造物の概要について、また、運転での試験結果および解析評価結果を示す。

2. HTTR の冷却設備概要

HTTR 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 (Fig.2.2) 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 (Fig.2.3) 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.2.4) 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。

HTTR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950℃、熱出力30MWの高温試験運転がある。

3. HTTRの支持構造物

HTTRの支持構造物には、機器配管系の荷重を支える観点から、原子炉格納容器（C/V）内1次主冷却設備の主要機器は原子炉圧力容器（RPV）以外、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等で支持する浮動支持方式を用いることにより、RPVを中心とした熱膨張を機器が移動することで吸収し、配管反力を低くするものである。一方、地震時の振動を抑制する目的でオイルスナバを用いている。

コンスタントハンガ（Fig.3.1）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。HTTRでは、機器の仕様及び配置を考慮して、支持方式を選定している。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）には、どの方向反力を受けても追従して移動できるハンガ吊り下げ方式、PPWCには鉛直用耐震サポートの配置が難しいため、上部支持コラム方式を採用している。Fig.3.2に各浮動支持方式の概要を示す。

オイルスナバ（Fig.3.3）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、オイルスナバには、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。HTTRの主冷却設備のうち、PPWC、IHX及びSPWCには合計42基のオイルスナバが設置されている。Table3.1に対象系統のオイルスナバの容量を示す。

4. 機器の熱変位解析手法

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った。ここで考慮した機械的荷重条件は、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、設計における熱変位解析手法について示す。

設計における高温配管熱変位挙動の解析には、汎用有限要素コード MSAP²⁾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。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 4.1 に示す。表中には、耐震解析及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、熱変位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いる。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 4.2 に示す。

5. 変位測定

5.1 測定方法

高温機器及び高温配管の熱変位測定は Fig.5.1 に示す 6 ヶ所について行い、計測の座標軸は、RPV 下部ノズル部から 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、各ヘリウム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。

5.2 測定結果

定格単独運転 (RS-5) 並びに高温単独運転 (PT-5) での高温機器及び高温配管変位挙動の原子炉入口温度依存性を Fig.5.2～5.4 及び Fig.5.8～5.10 に示す。同図より、機器・配管の熱変位挙動は温度変化に対してほぼ一次的に変化している。

RS-5 並びに PT-5 での高温配管変形挙動の時刻歴変化を Fig.5.5～5.7 及び Fig.5.11～5.13 に示す。X 方向については、X1～X4 は原子炉入口温度変化に追従した熱変形挙動を示しているが、IHX 上部周辺である X5 および X6 は温度変化に追従した変形挙動を示さない。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。Y 方向については、Y4～Y6 は、温度変化に対してプラス側に変位し、Y3 の変位は、ほぼ一定であり、Y2 は温度変化に対してマイナス側に変位する。Z 方向については、Z5,Z6 が温度変化に対してプラス側に変位し、Z2 の変位は、ほぼ一定であり、Z1,Z3,Z4 は、温度変化に対しマイナス側に変位する。この挙動は IHX 上部周辺の Z5 及び Z6 の熱変形挙動は単独運転時には 2 次ヘリウム冷却系が運転されていないので、2 次ヘリウム系の機器温度が低いためであると考えられる。

PT-5 における高温配管の熱変形計測図 (最大変化量) を Fig.5.14 に示す。

6. 解析

6.1 解析手法

解析には、汎用有限要素コード「ABAQUS³⁾」を用いた。解析モデルを Fig.6.1 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。Table6.1 に機器ノズル部変位量を示す。

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、Table4.2 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が、HTTR の高温配管系には、3 次元の浮動支持方式を使用しており、その影響が無視できないことから、本解析では、ハンガ類及びオイルスナバ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.6.2 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、ハンガの吊り下げ力に対応する水平分力が発生し、この分力は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下げ力から算出した。解析に使用したバネ定数を Table6.2 に示す。

オイルスナバのモデル化概念図を Fig.6.3 に示す。一般的に、オイルスナバが移動する際には、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、機器からオイルスナバへ与えられる反力が、オイルスナバの静摩擦力以下であれば、オイルスナバは移動せず熱膨張は拘束される。一方、機器からの反力がオイルスナバの静摩擦力を越えれば、オイルスナバは一定の動摩擦力を生じながら摺動する。本解析では、オイルスナバを Fig.6.3 に示す抵抗力を有する非線形要素によりモデル化した。

オイルスナバ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 6.3 に示す。しかし、オイルスナバ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⁴⁾において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オイルスナバ摺動速度は 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。そこで測定により、摺動速度 0.5mm/sec では抵抗力が小さいことを確認した。

本解析ではオイルスナバの低速摺動抵抗力を減少させる方向で変更し、実測挙動を再現した。

温度条件は、機器の実測温度を用いた。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。

6.2 変位挙動評価

高温機器及び高温配管の熱変位挙動評価において、オイルスナバの実機抵抗力が未知であるのは前述のとおりである。また、従来解析では、熱膨張係数についても次の理由により未知であると考えた。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、これらの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、熱膨張係数とオイルスナバの抵抗力をパラメータ（熱膨張係数を構造等の技術基準記載値の 90%、オイルスナバの抵抗力を各々適宜）として考え、単独運転について実機挙動を模擬した。しかし、従来解析において上記をパラメータとするため、本解析では、熱膨張係数を設計計算に用いた「構造等の技術基準」に準拠し、オイルスナバ抵抗力の影響を明らかにする為に、オイルスナバ抵抗力のみを大きく変化させた解析を行い、定格単独運転について評価した。

実際の運転中におけるオイルスナバの摺動速度としては、運転データより、数 mm/day であるため、製造メーカーが規定している摺動速度 1mm/sec における抵抗力よりも十分に小さな値であると考え、オイルスナバ抵抗力無しとして解析を行った。Fig.6.4 にオイルスナバの実測摺動抵抗力を示す。Fig.6.5 に示す解析結果より、オイルスナバ抵抗力無しの場合が、Y 方向の変位量が改善され、実測挙動に近づくことが確認された。

次に、出力上昇過程は熱変形速度が定格時に比べて速く、オイルスナバ抵抗力が大きい可能性が考えられる。そこで、全体系の変位に及ぼす熱変形速度の影響を明らかにする為に、熱変形速度が大きいと考えられる定格到達時について、オイルスナバ抵抗力無しの解析を行い、評価した。定格到達時(RS-5)の計測変位と解析変位を Fig.6.6 に示す。熱変形速度が比較的速い時刻についても、オイルスナバ抵抗力無しの場合は計測値との対応が良い。また、他の運転サイクル(定格単独運転：RS-9)および(高温単独運転：PT-5)についても同様の結果が確認された。定格運転(RS-9)、高温運転(PT-5)の計測変位と解析変位をそれぞれ Fig.6.7、6.8 に示す。これらより実機では解析で想定している低速抵抗も生じないほど、熱変形速度が遅い可能性がある。

また、従来解析との比較においてもおおむね良好であり、オイルスナバ抵抗力無しとすることで、熱膨張係数及びオイルスナバの抵抗力をパラメータにしなくても良いことが確認された。

7. 結言

HTTR の定格運転 (30MW) で、高温機器・配管の熱変位測定を実施した。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になった。
- (2) 定格運転時(RS-5)でも配管系の熱膨張は、温度に対してほぼ1次的に変化するが、高温配管変形挙動の時刻歴変化では、IHX 上部は原子炉入口温度変化に追従した変形挙動を示さない。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。
- (3) 熱変位に影響を及ぼす支持構造物からの抵抗力には、ハンガ類の水平分力およびオイルスナバの摺動抵抗力があるが、オイルスナバの摺動速度は非常に遅いため、摺動抵抗力を無視することで、実機の熱変形挙動を再現できることが確認された。

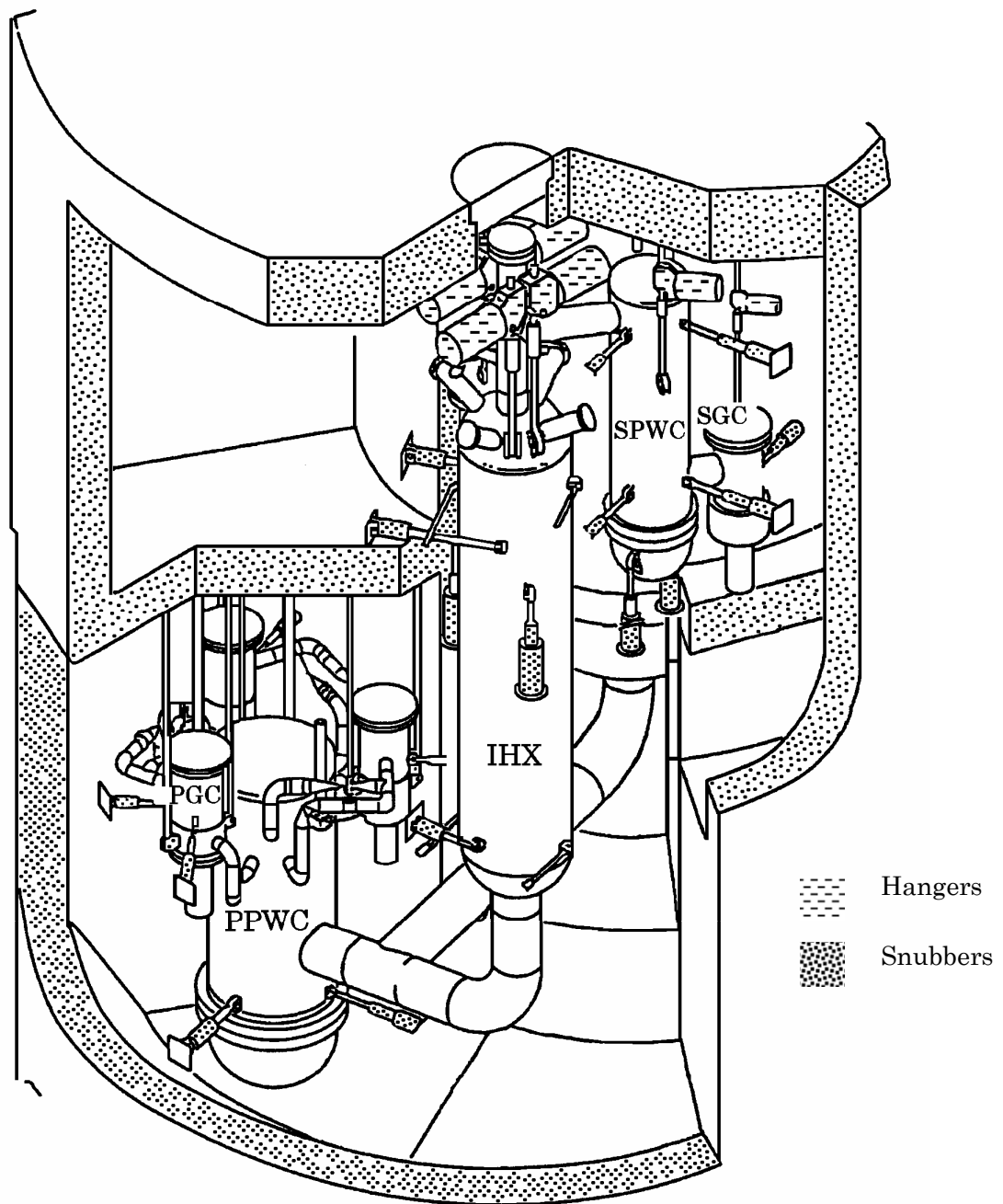
謝辞

本試験を行うに当たり、原子炉の運転を担当した HTTR 運転管理課の運転班の各位および測定作業に協力をいただいた HTTR 技術課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部 伊与久達夫研究主席に深く感謝致します。

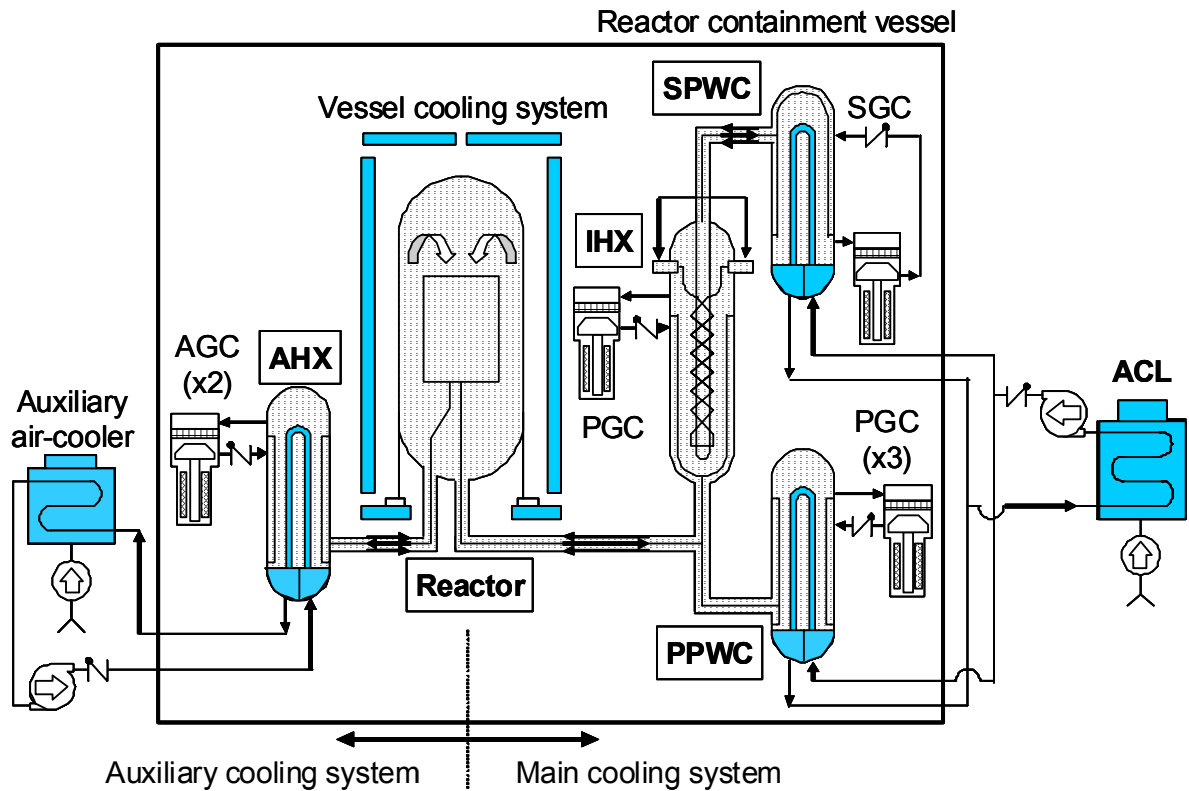
参考文献

- 1) 塙 悟史 他, HTTR 出力上昇試験における高温配管熱変位挙動の評価(その1 20MW までの結果), JAERI-Tech 2002-024
- 2) 田井 浩一, 構造解析コード"MSAP"について 1, 配管技術, vol.1,p.102,1990.
- 3) Hibbit, karlsson and Sorensen, INC.:ABAQUS/Standard User's Manual ver.5.7,1997
- 4) 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



- 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 1次冷却設備 鳥瞰図



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

Fig.2.1 HTTR 冷却設備概要図

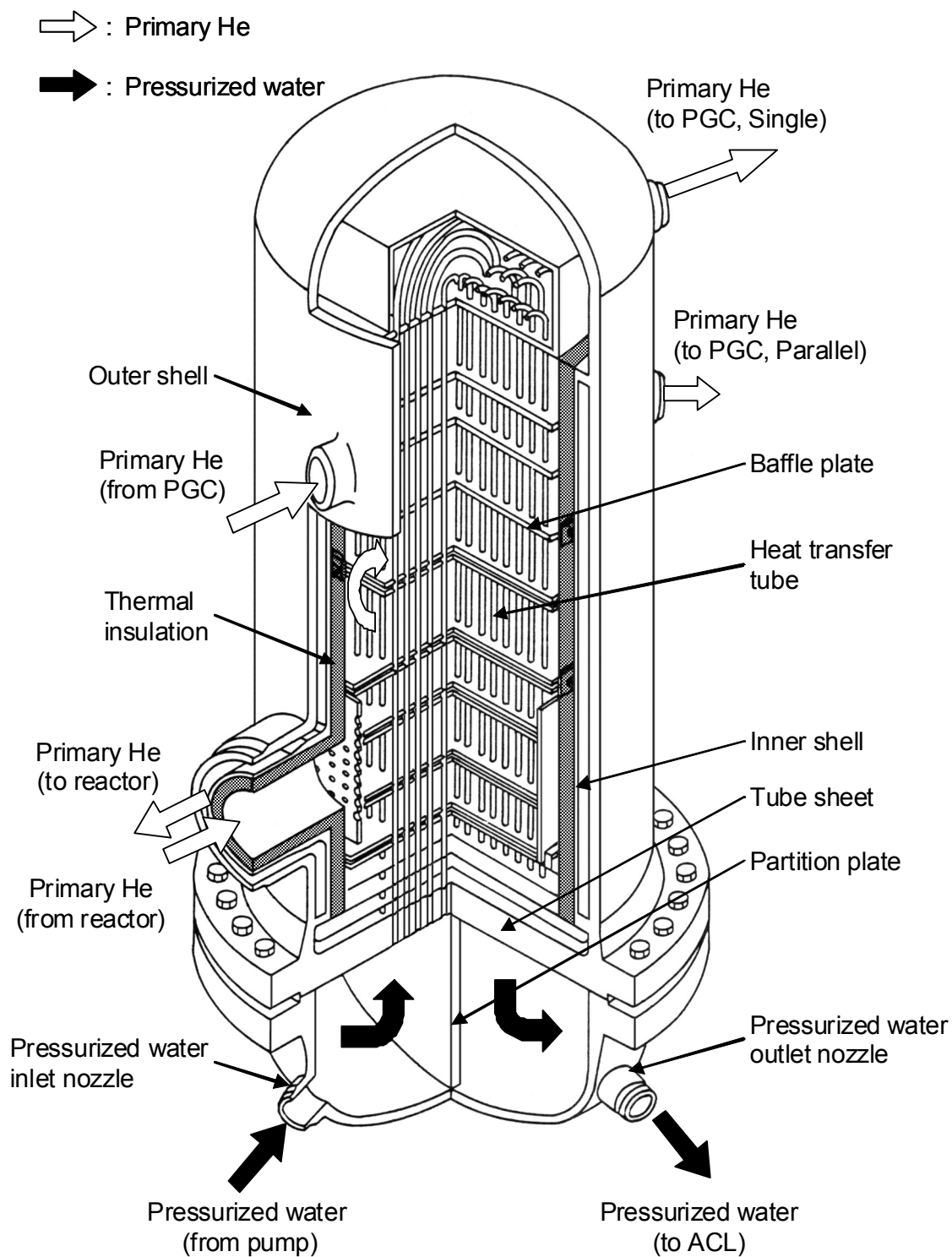


Fig.2.2 1次加圧水冷却器構造図

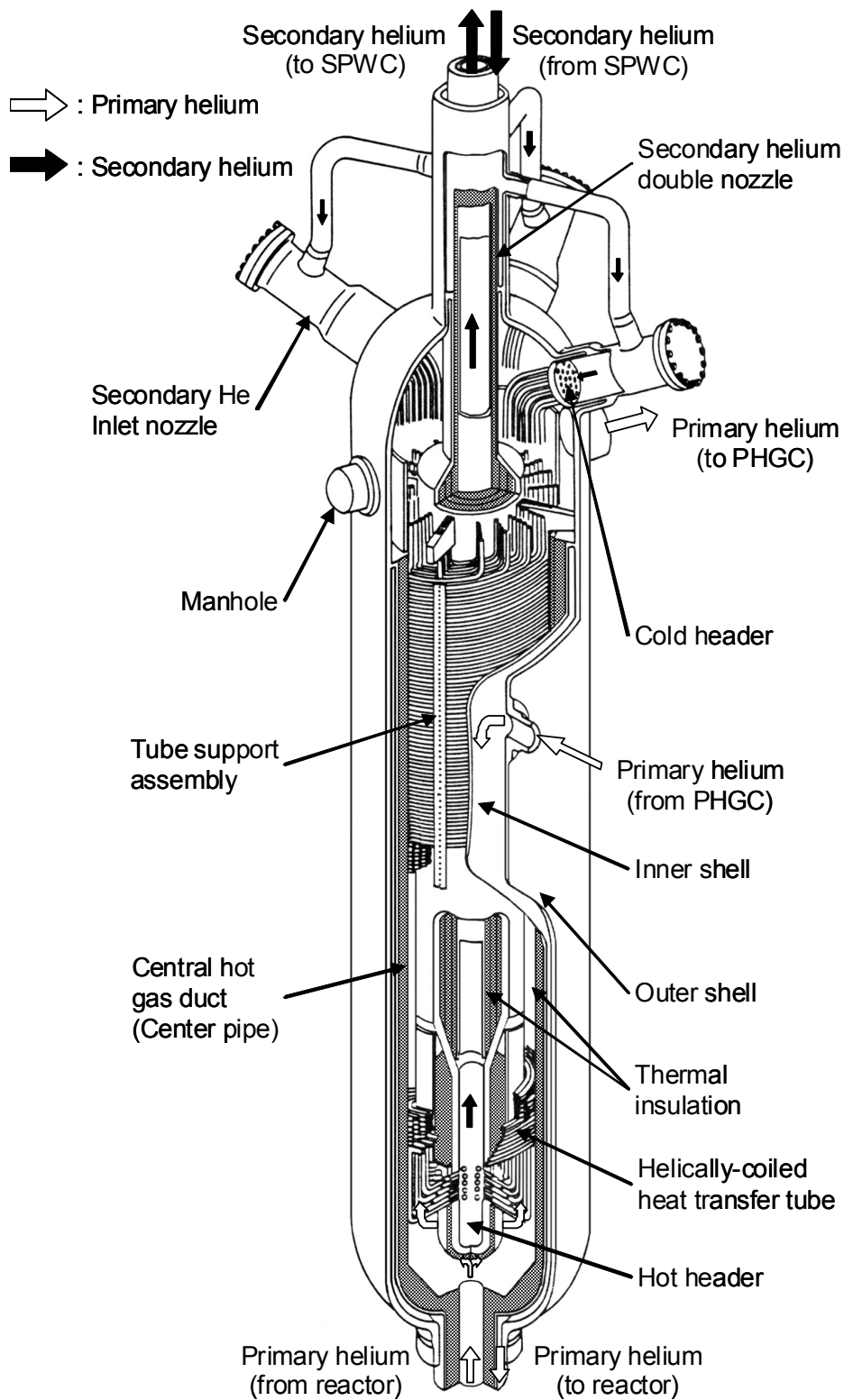


Fig.2.3 中間熱交換器構造図

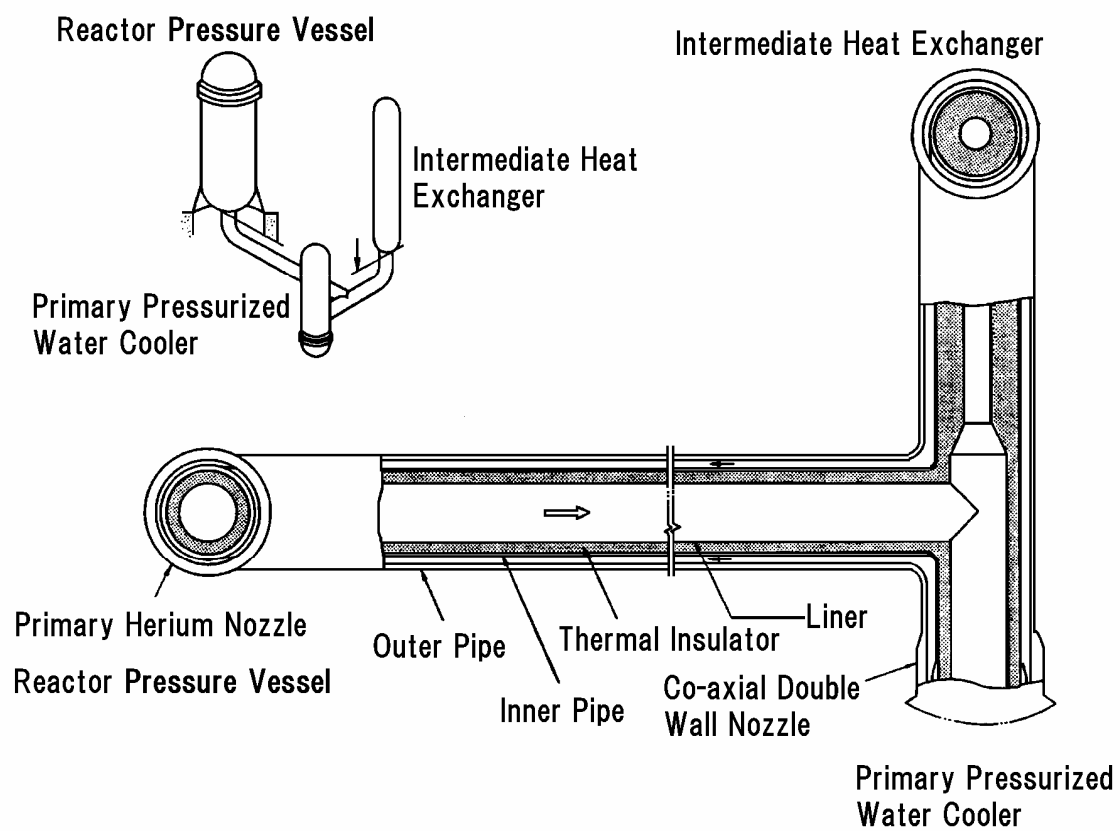


Fig.2.4 二重管構造図

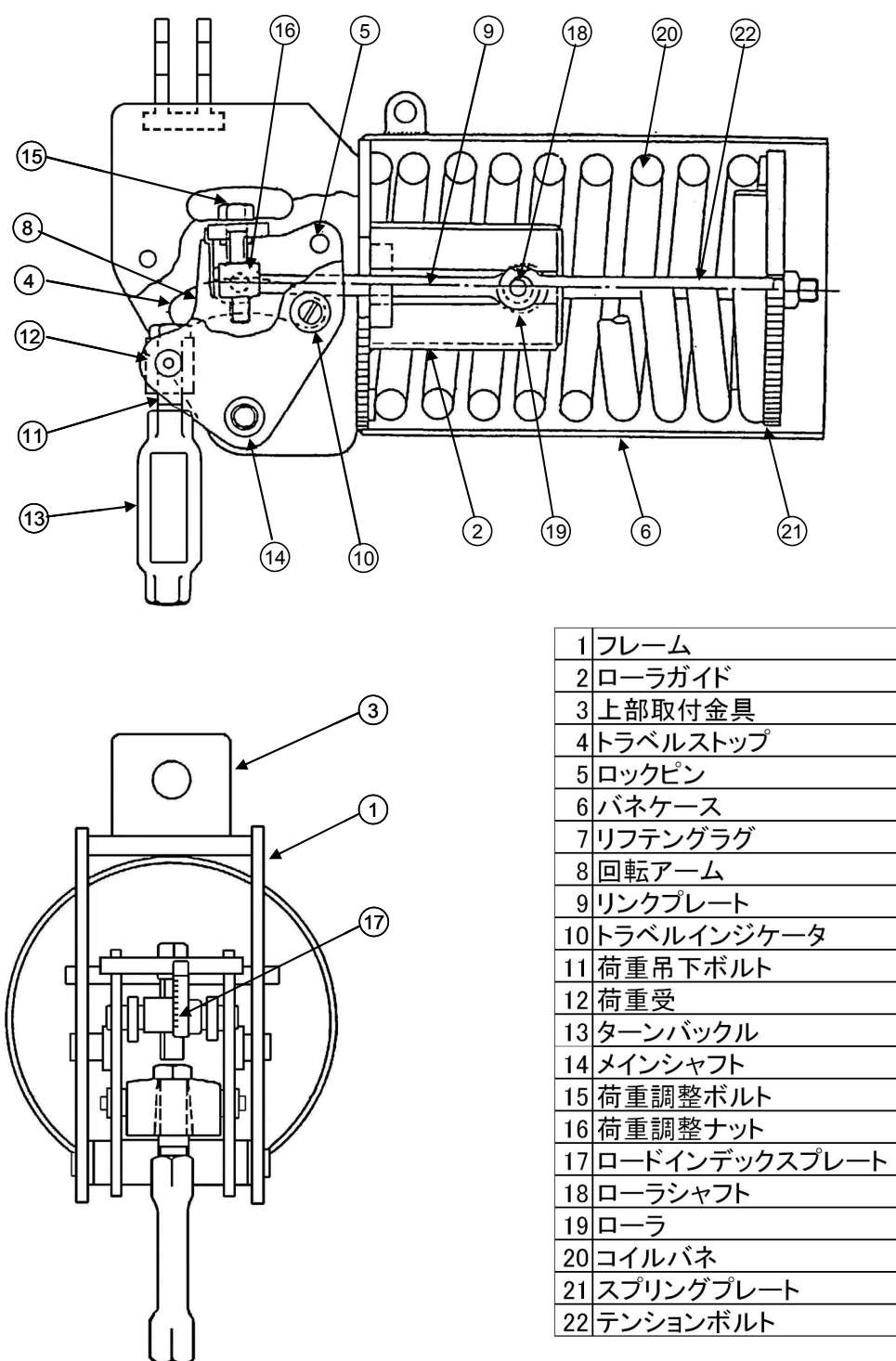


Fig.3.1 コンスタントハンガ構造

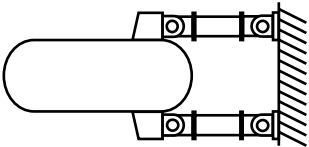
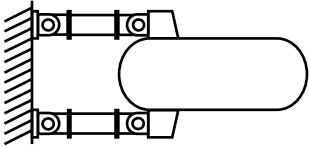
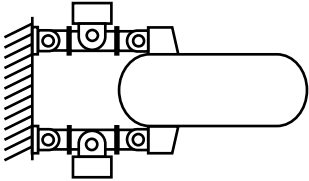
	下部支持脚方式	上部支持コラム方式	ハンガ吊下げ方式
概念図			
特徴	- 鉛直方向の耐震サポートが不要。 - 機器が傾かない。	同左	- どの方向の反力を受けても追従して移動できる。 - 配管に強制変位が掛からない。
留意事項	支持点レベルによっては1次系配管に強制変位を与える。	- 支持点レベルによっては1次系配管に強制変位を与える。 - 裾付け押上げ装置が必要。	- 機器が傾くことがあり得る。 - 鉛直方向の耐震サポートが必要。 - ハンガのメンテナンスが必要。 - 裾付け押上げ装置が必要。
	IHX : 支持脚の設置が配置上厳しいので不可。 PPWC : メンテナンス時（水室を取外す）に障害となる（不採用） SPWC : 固定点を設ける事になり不可。	IHX : 1次系配管に大きな強制変位を与えるので不可。 PPWC : 熱膨張のバランス点で支持することにより上記の問題はない。又、鉛直方向耐震サポートが不要となり有利である。 SPWC : 同左	IHX : 熱的拘束がない事、及び上下部支持脚方式とも難点がある事より本方式を採用。 PPWC : 鉛直耐震サポートが配置上設置が難しいため不可。 SPWC : 採用

Fig.3.2 各浮動支持方式の概要

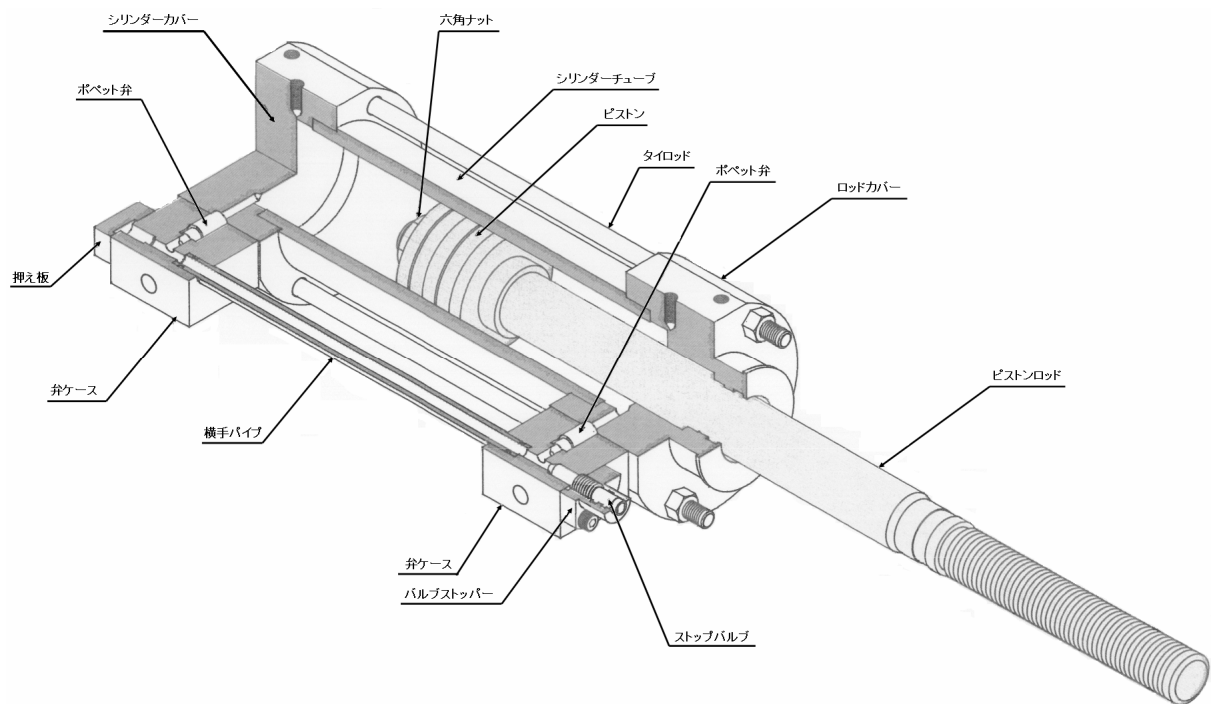


Fig.3.3 オイルスナバ構造図

Table3.1 対象系統のオイルスナバの容量

取付機器	オイルスナバ	
	番号	容量(t)
1 次加圧水冷却器	1011	100
	1012	25
	1013	25
	1041	40
	1042	260
1 次加圧水冷却器ヘリウム循環機 (A)	1111	16
	1112	16
	1141	3
	1142	3
	1106	6
1 次加圧水冷却器ヘリウム循環機 (B)	1211	16
	1212	16
	1241	3
	1242	3
	1206	6
1 次加圧水冷却器ヘリウム循環機 (C)	1311	16
	1312	16
	1341	3
	1342	3
	1306	6
中間熱交換器	3005	25
	3006	25
	3007	25
	3011	40
	3012	40
	3013	40
	3014	40
	3041	40
	3042	40
	3043	40
	3044	40
中間熱交換器ヘリウム循環機	3141	3
	3142	3
2 次加圧水冷却器	2011	40
	2012	40
	2041	40
	2042	25
	2043	25
	2005	25
	2006	25
2 次加圧水冷却器ヘリウム循環機	2141	6
	2142	6

Table 4.1 機器の支持条件

支持の種類	熱変位解析	耐震解析	自重解析
R P V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
オイルスナバ	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 4.2 解析に使用した局所剛性

			K _x	K _y	K _z	K _{θ_x}	K _{θ_y}	K _{θ_z}
			kg/mm	kg/mm	kg/mm	kg/mm	kg/mm	kg/mm
1次系二重管	R P V	内管支持部	2.32×10^5	6.64×10^5	6.64×10^5	1.69×10^{11}	1.72×10^{10}	1.72×10^{10}
		外管ノズル	7.52×10^5	3.23×10^5	3.23×10^5	1.57×10^{13}	3.14×10^8	3.14×10^8
	P P W C	内管ノズル	3.50×10^4	4.92×10^4	8.80×10^4	1.30×10^{11}	8.67×10^9	1.84×10^9
		外管ノズル	1.98×10^5	4.50×10^5	5.84×10^5	6.67×10^{11}	8.05×10^{10}	2.60×10^{10}
	I H X	内管ノズル	2.87×10^5	∞	∞	∞	1.30×10^5	1.30×10^5
		外管ノズル	1.15×10^5	∞	∞	∞	6.67×10^5	6.67×10^5
2次系二重管	S P W C	内管ノズル	3.29×10^4	2.07×10^4	3.39×10^4	4.91×10^{10}	3.18×10^9	8.91×10^8
		外管ノズル	1.61×10^5	2.40×10^5	2.77×10^5	2.23×10^{11}	2.63×10^{10}	1.10×10^{10}

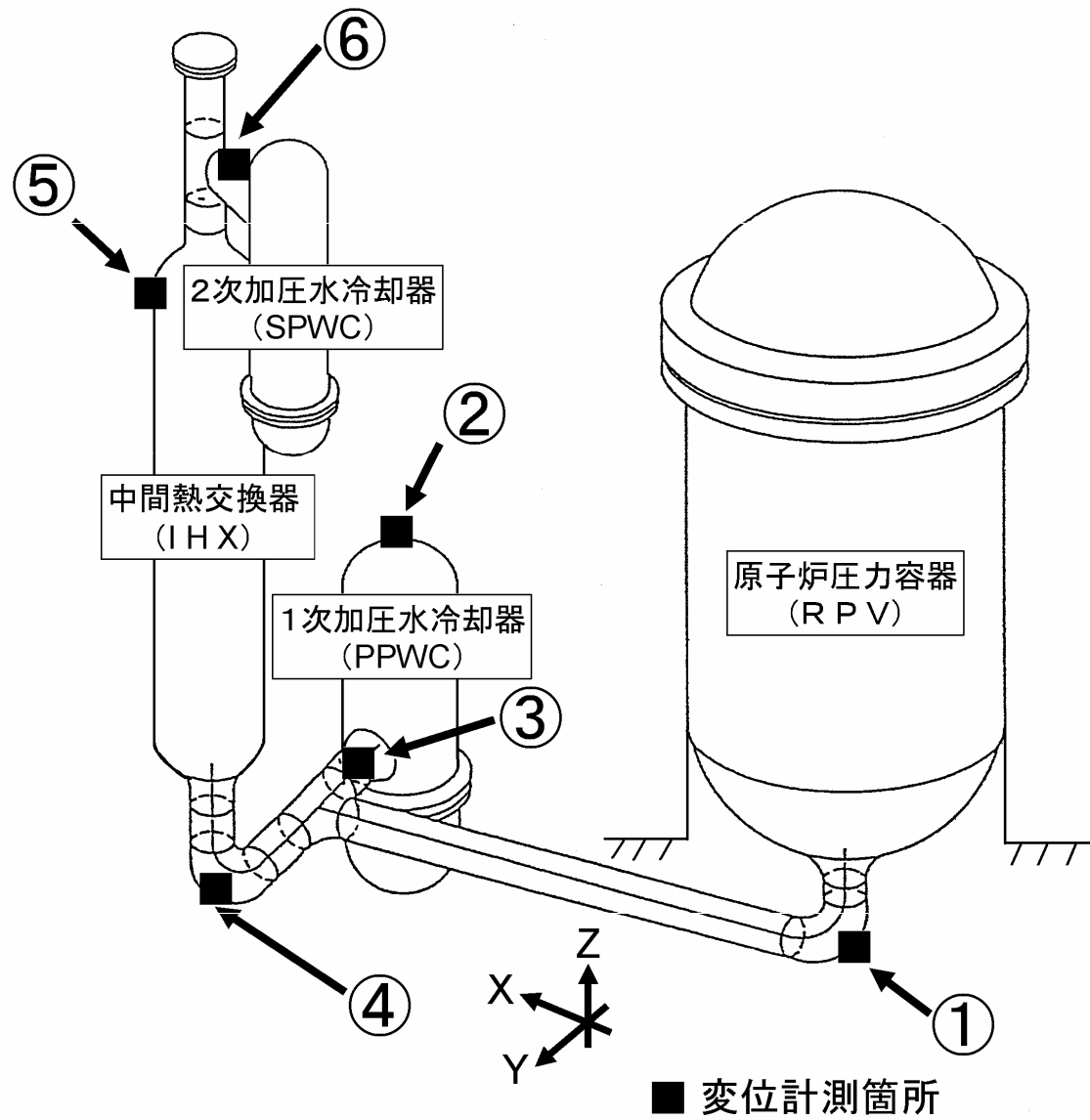


Fig.5.1 変位計測箇所

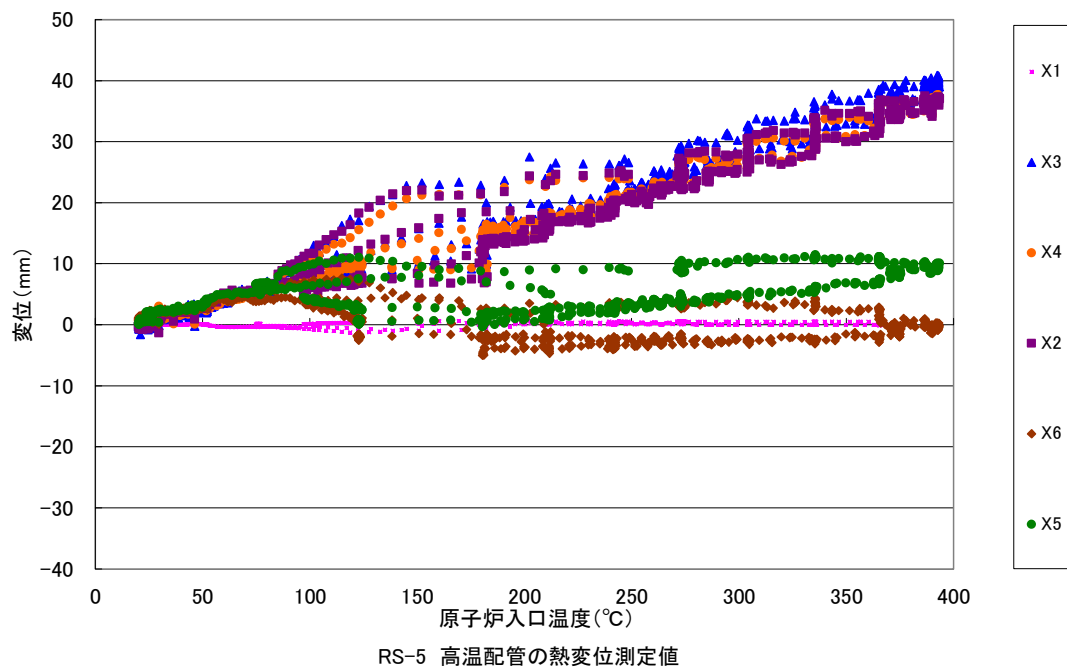


Fig.5.2 高温配管変形挙動の温度依存性（X方向）

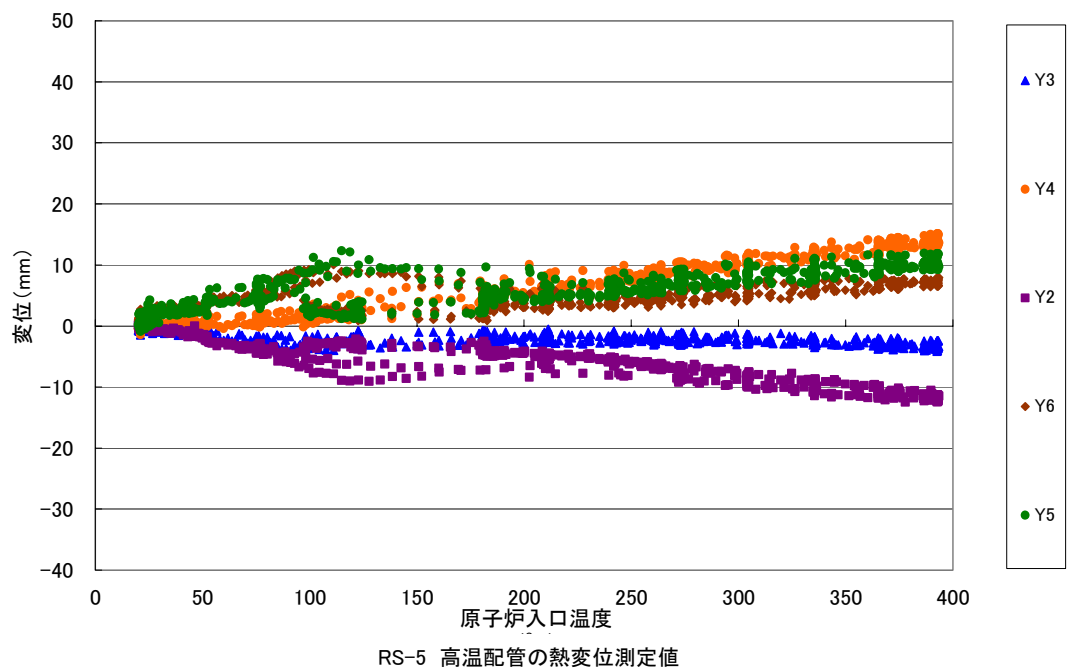


Fig.5.3 高温配管変形挙動の温度依存性（Y方向）

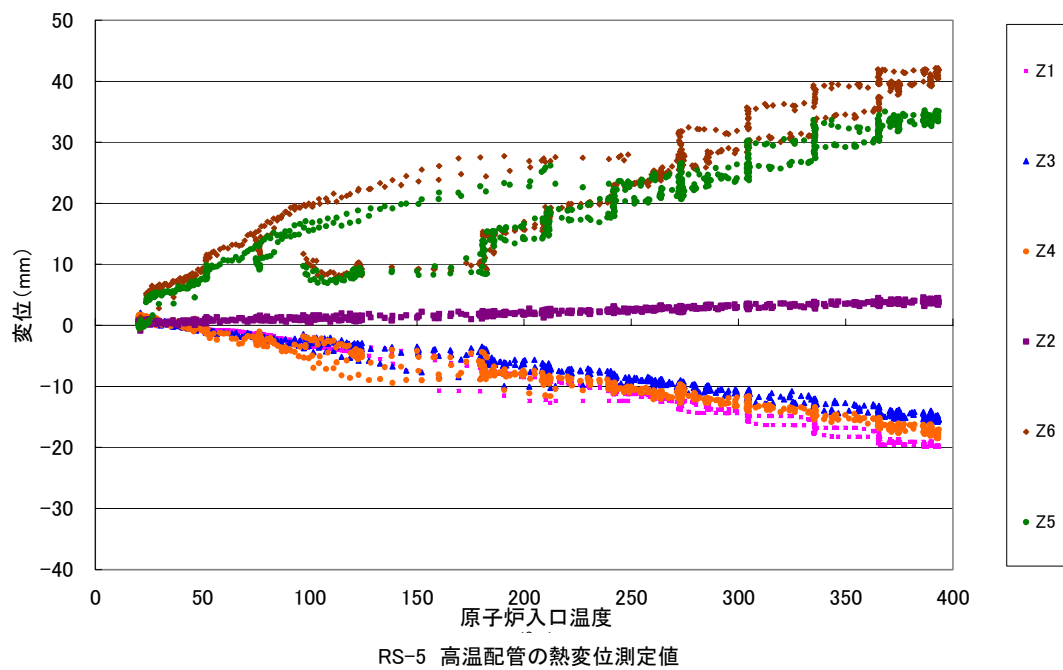


Fig.5.4 高温配管変形挙動の温度依存性（Z方向）

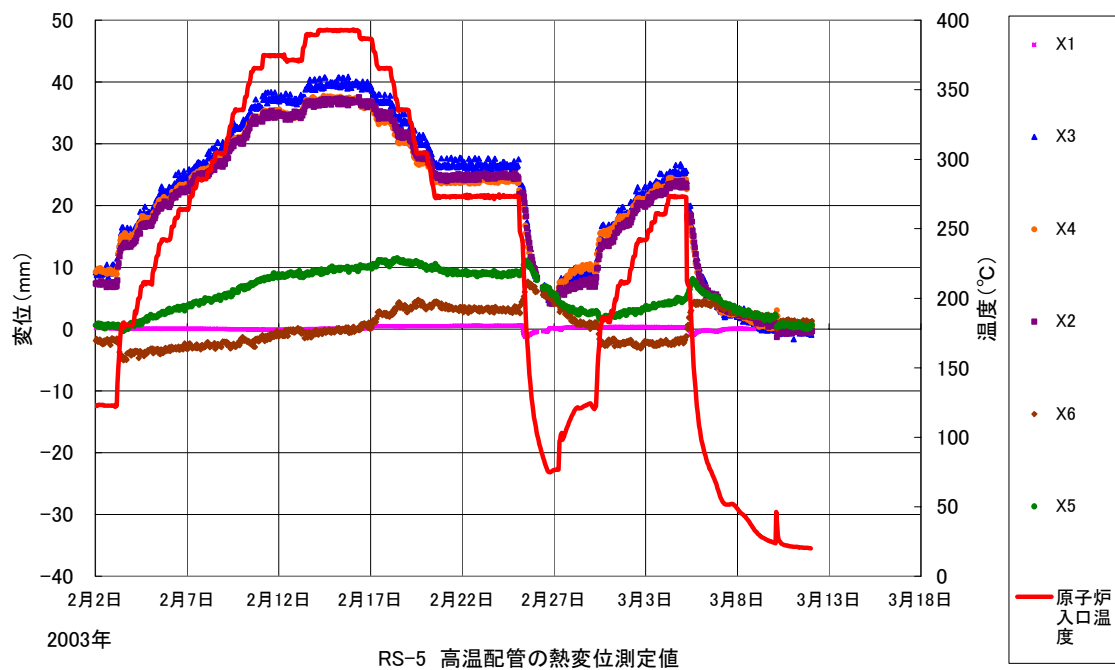


Fig.5.5 高温配管変形挙動の時刻暦変化（X方向）

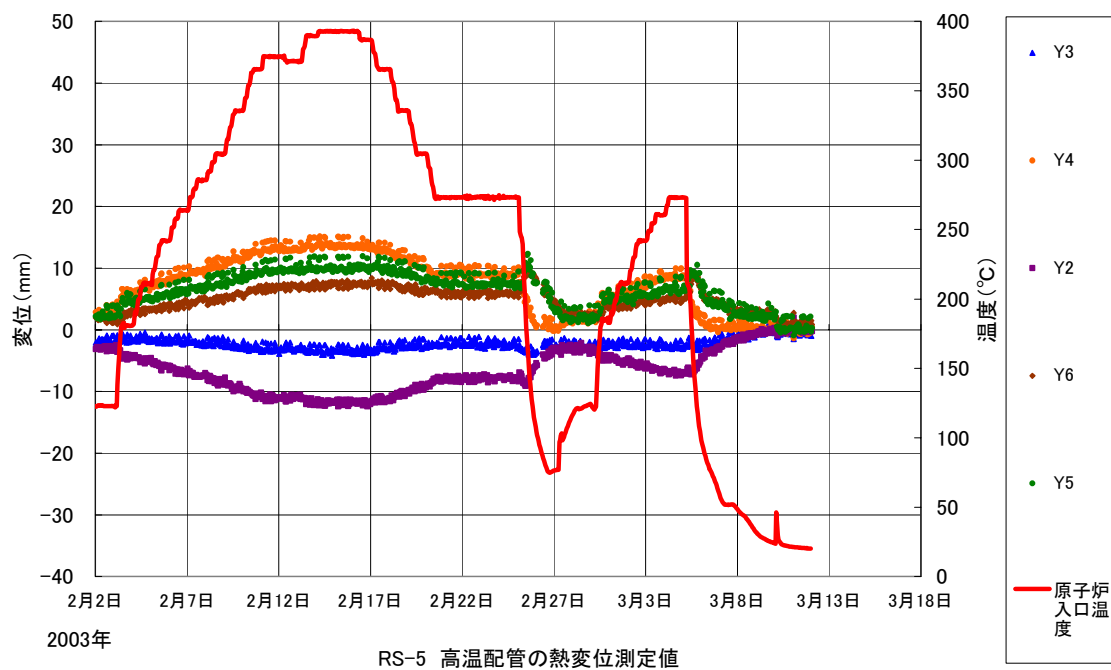


Fig.5.6 高温配管変形挙動の時刻暦変化（Y方向）

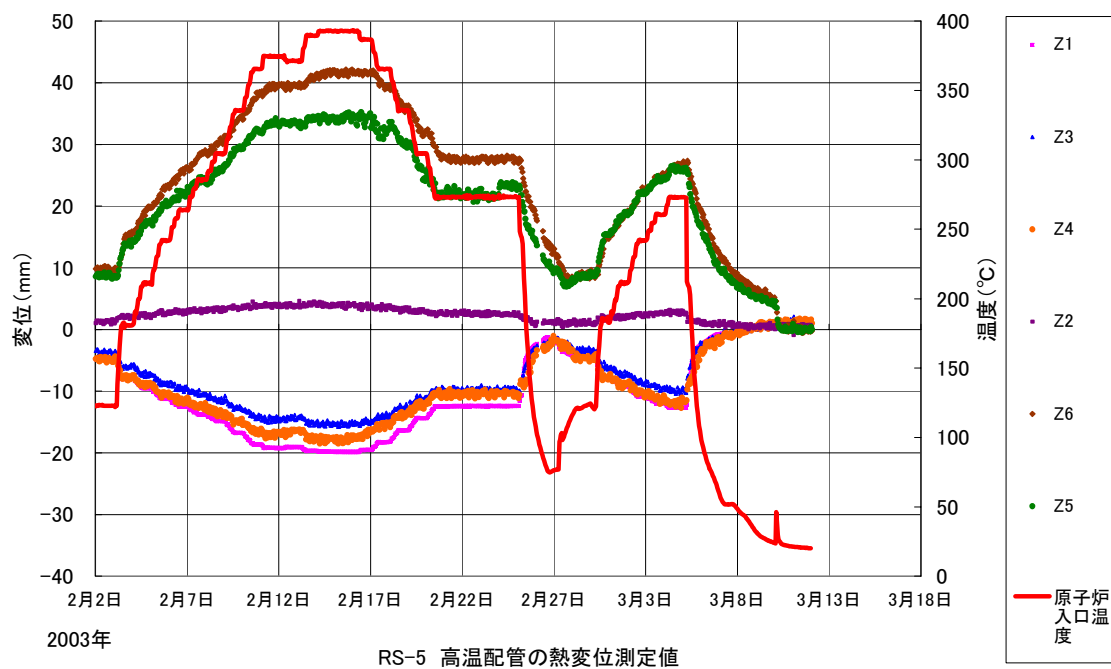


Fig.5.7 高温配管変形挙動の時刻暦変化（Z方向）

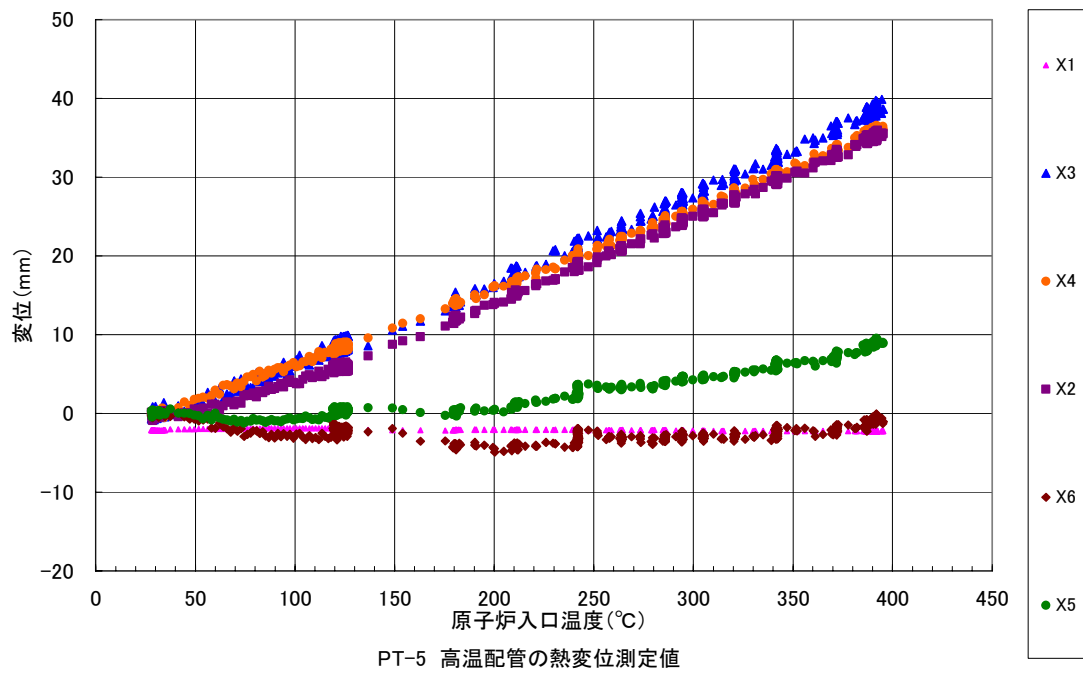


Fig.5.8 高温配管変形挙動の温度依存性 (X方向)

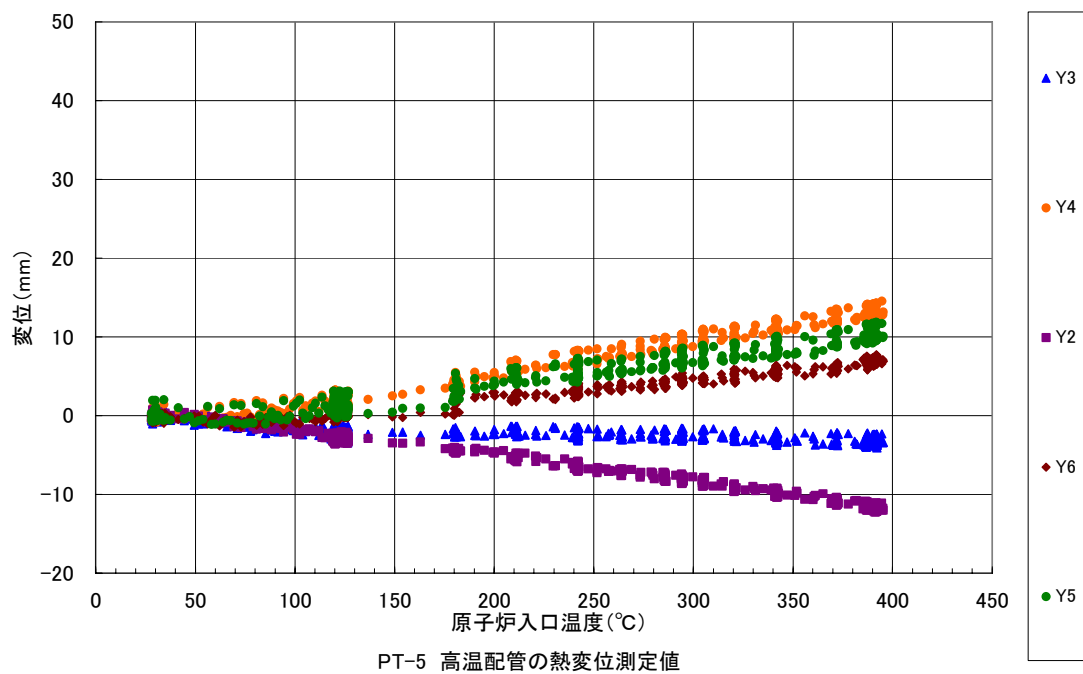


Fig.5.9 高温配管変形挙動の温度依存性 (Y方向)

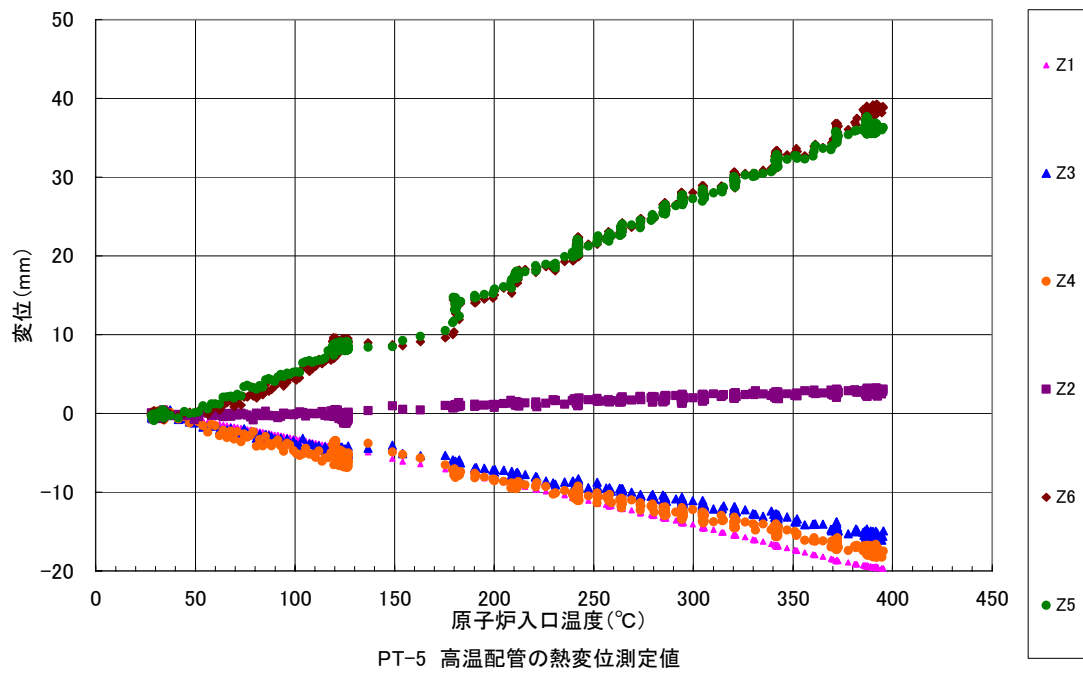


Fig.5.10 高温配管変形挙動の温度依存性 (Z方向)

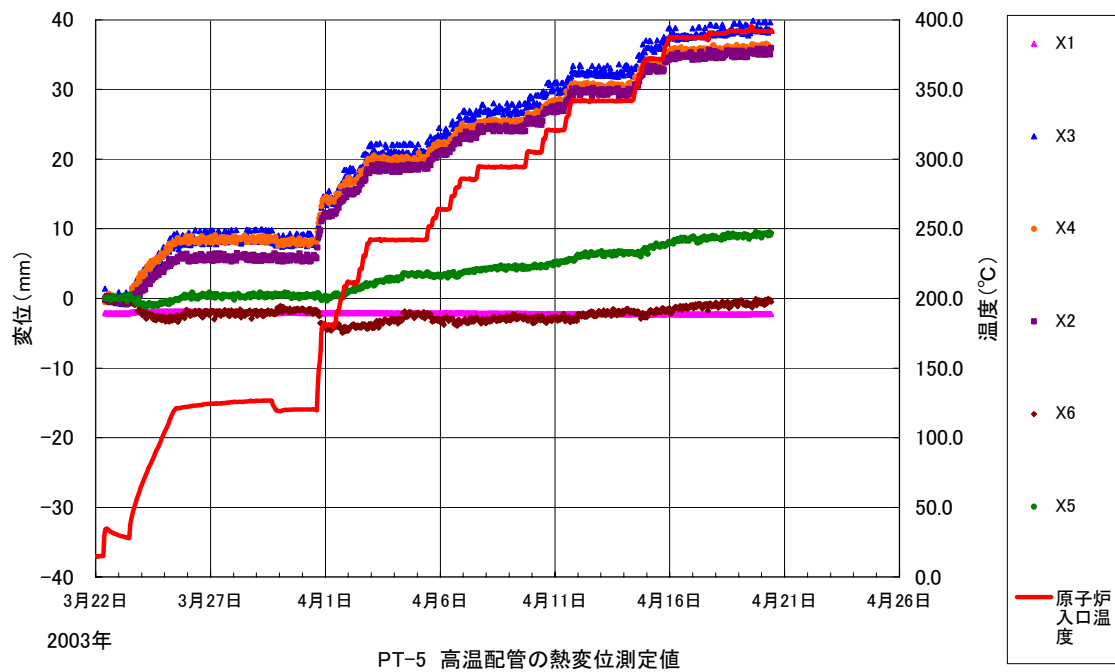


Fig.5.11 高温配管変形挙動の時刻暦変化 (X方向)

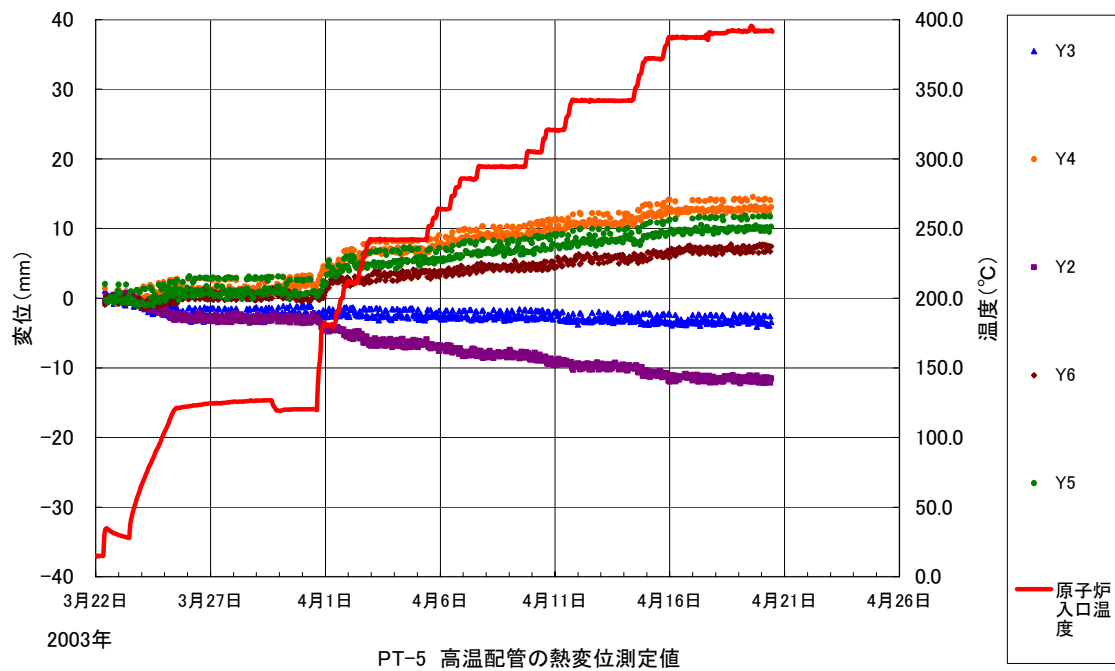


Fig.5.12 高温配管変形挙動の時刻暦変化 (Y方向)

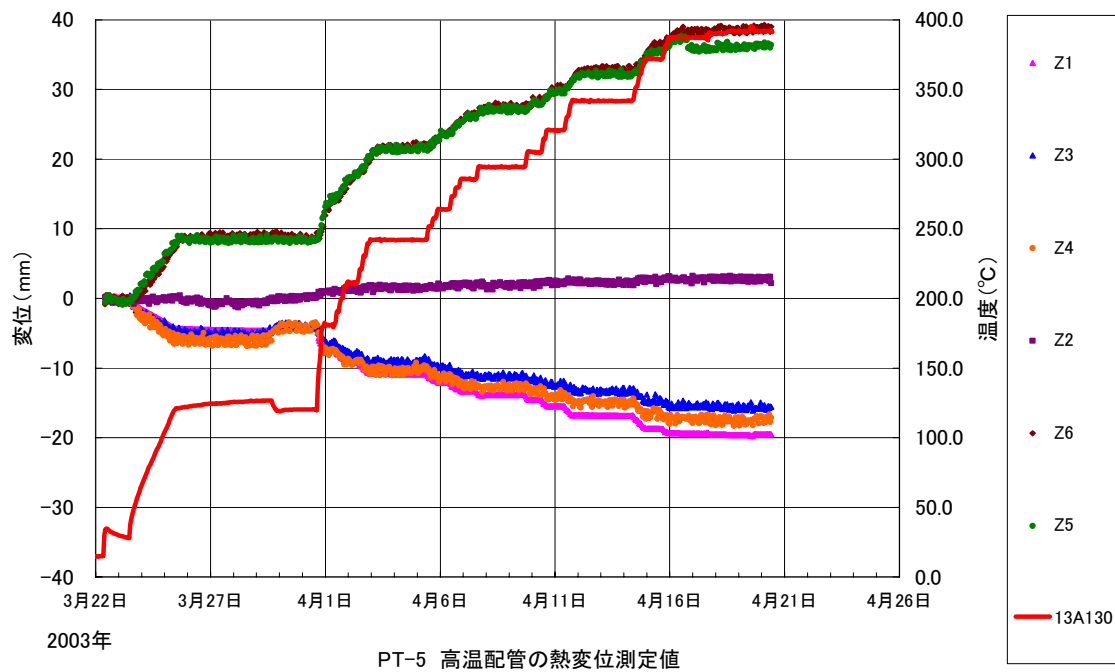


Fig.5.13 高温配管変形挙動の時刻暦変化 (Z方向)

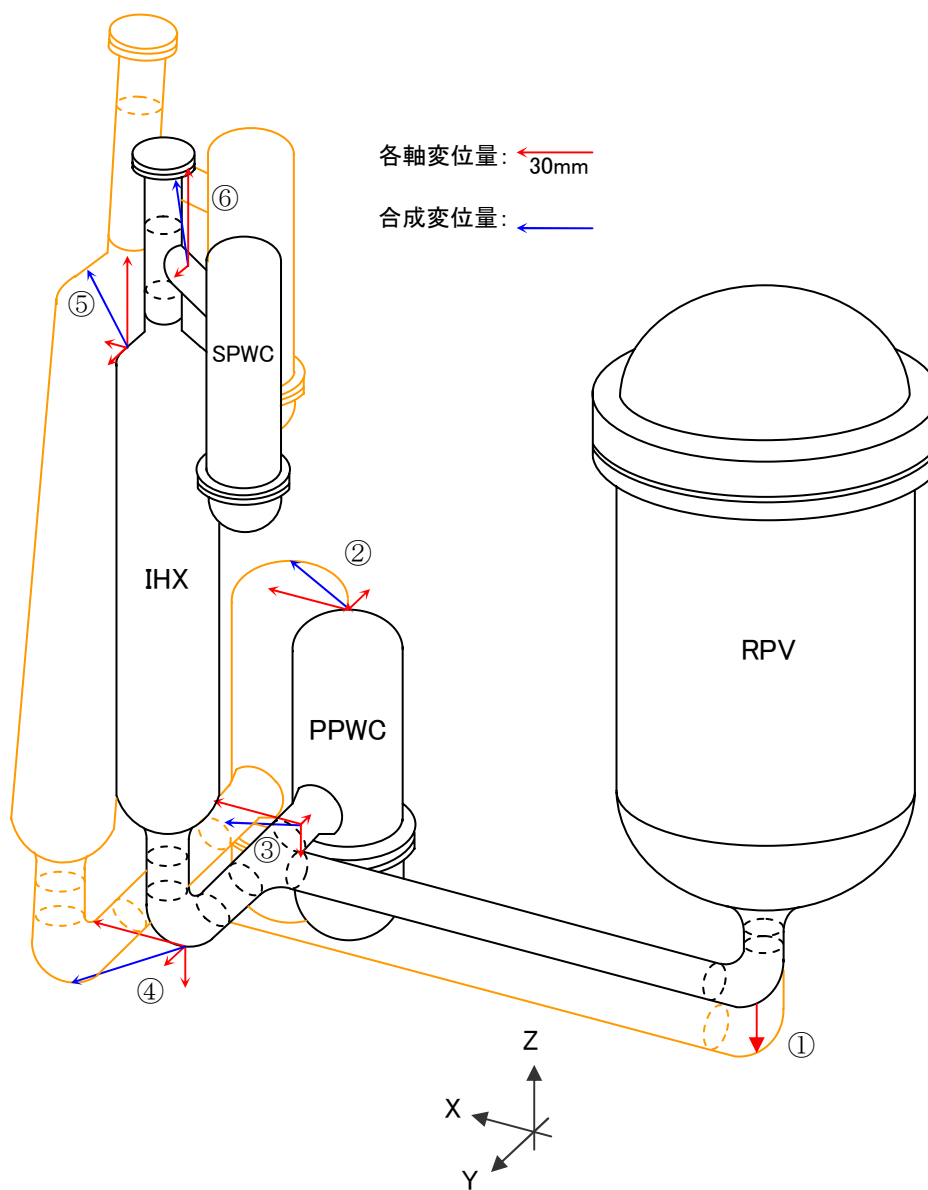


Fig.5.14 配管熱変位イメージ図 (PT-5 単独運転時)

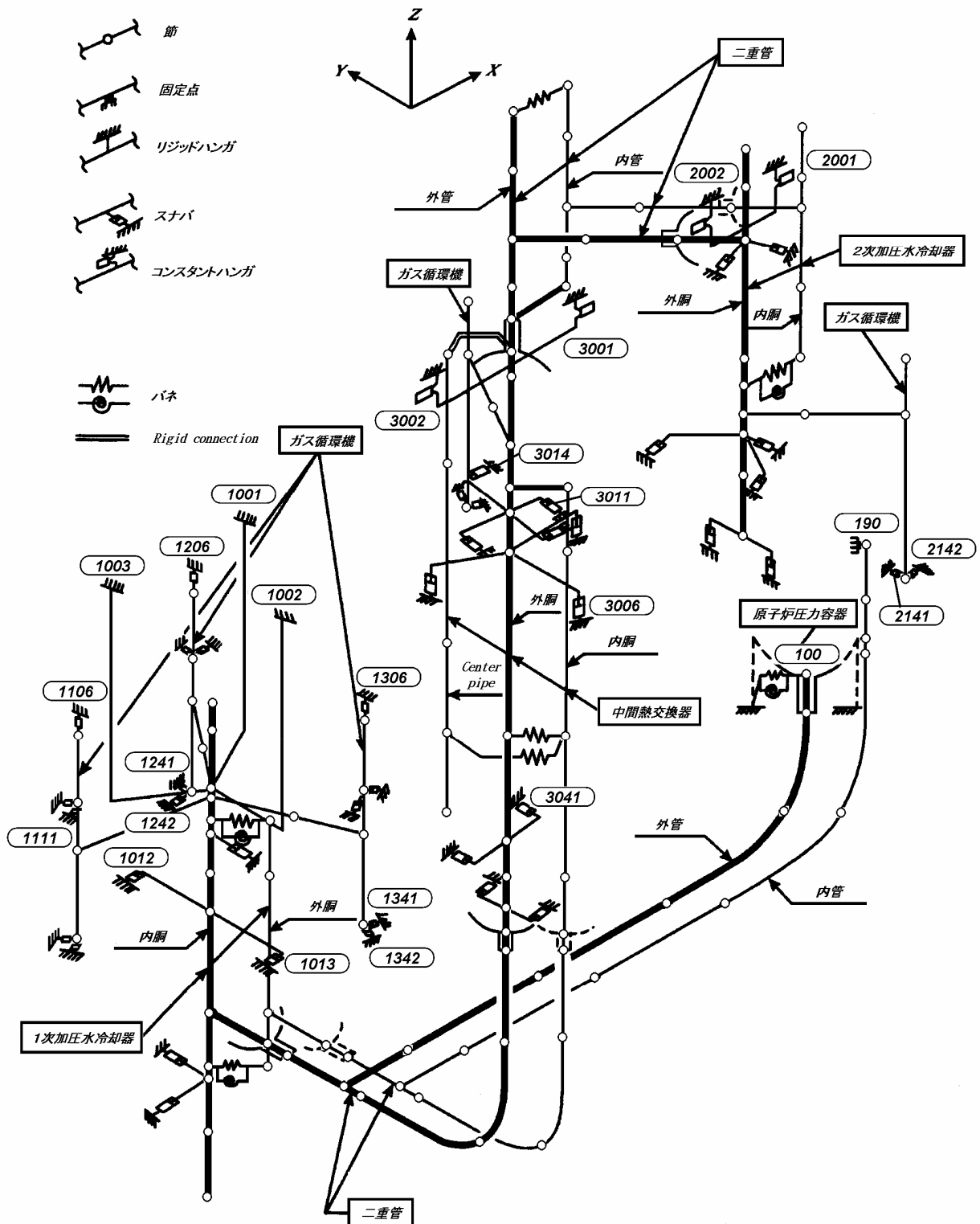
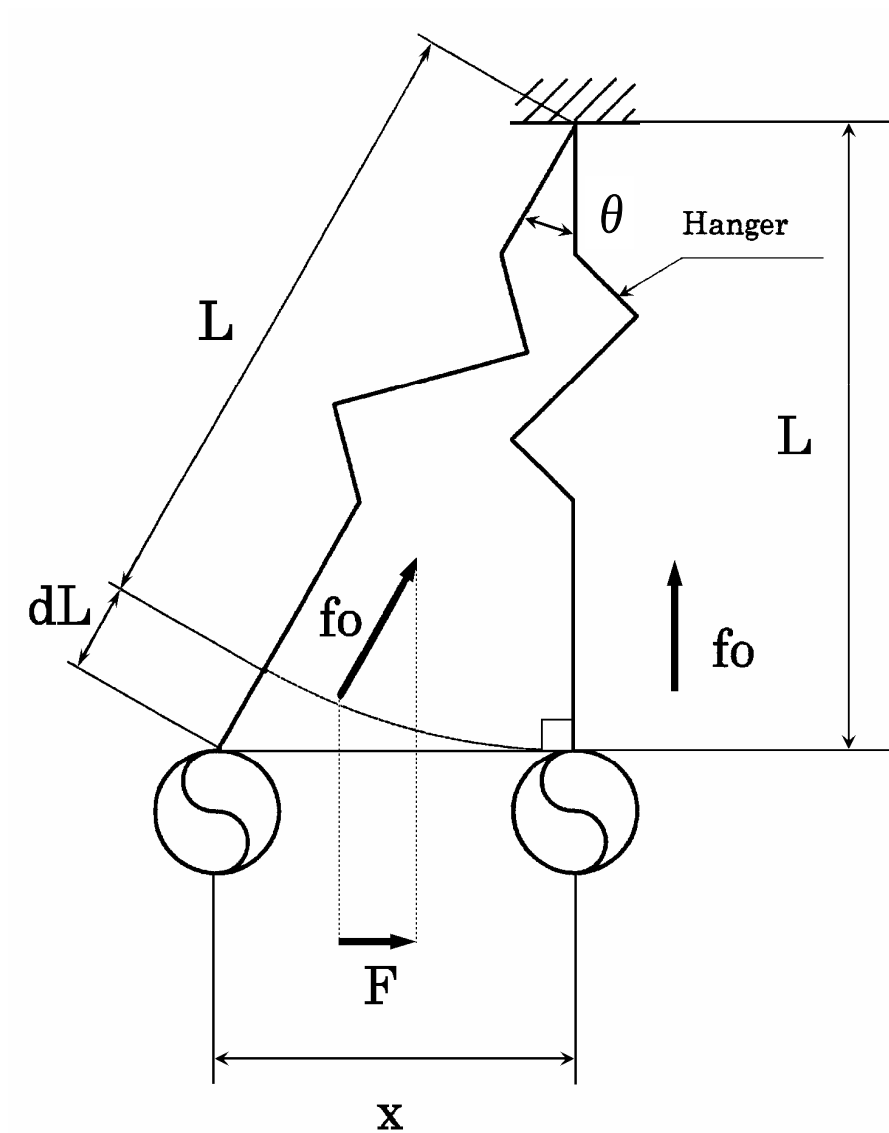


Fig.6.1 FEM 解析モデル



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

$$k = f_0/L$$

k : spring rate of hanger

Fig.6.2 ハンガ類モデル化概念図

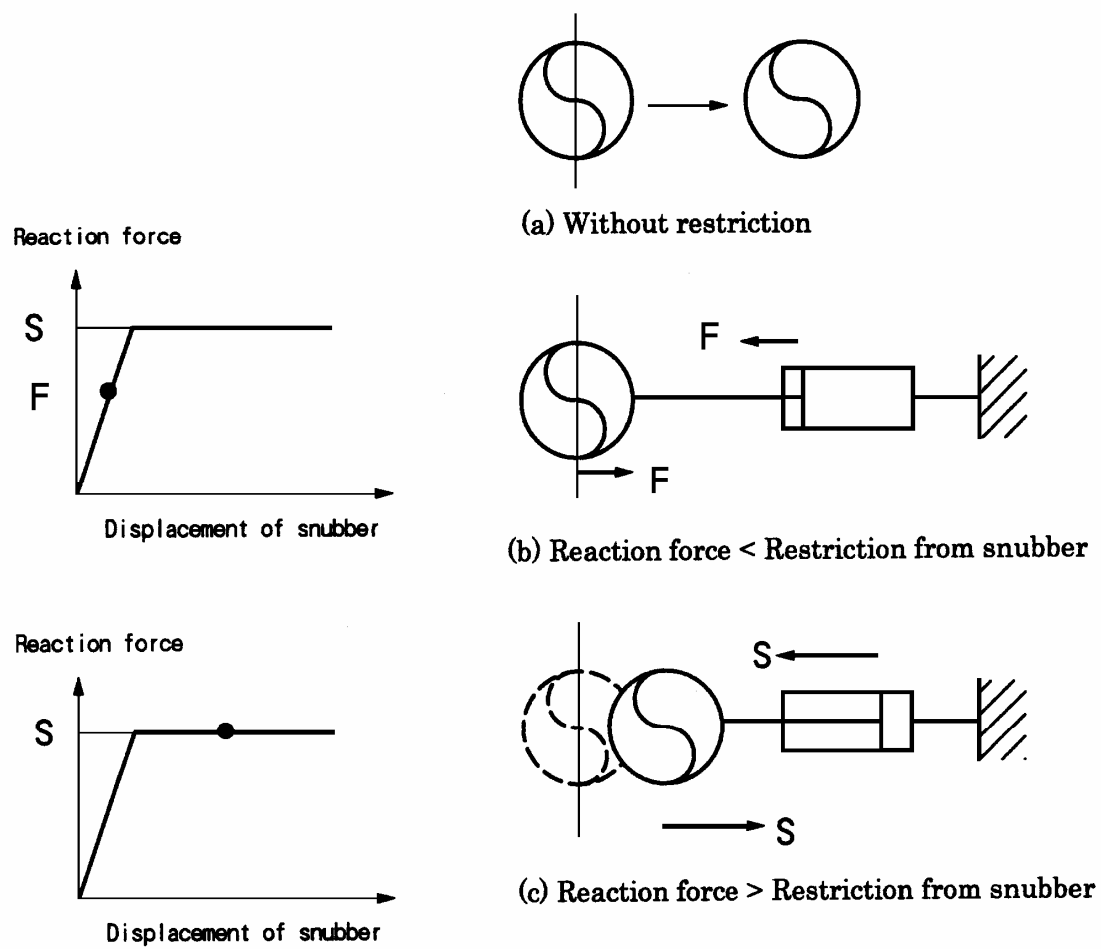


Fig.6.3 オイルスナバモデル化概念図

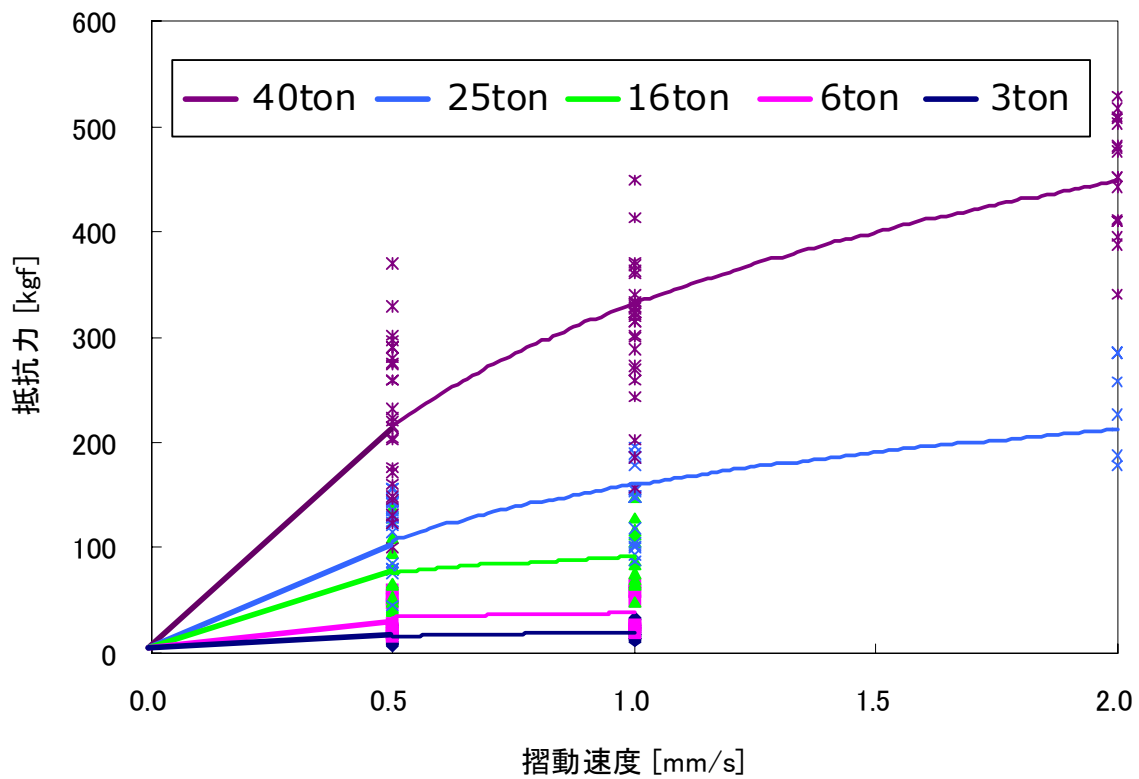


Fig.6.4 オイルスナバの実測撓動抵抗力

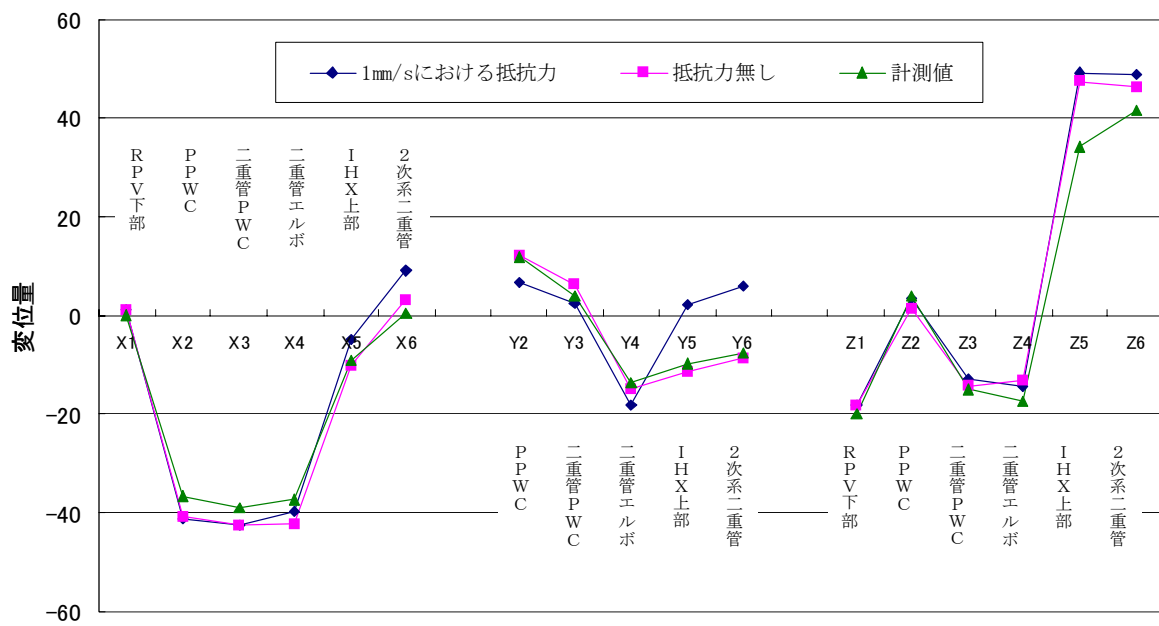


Fig.6.5 変位に及ぼすオイルスナバ抵抗力の影響

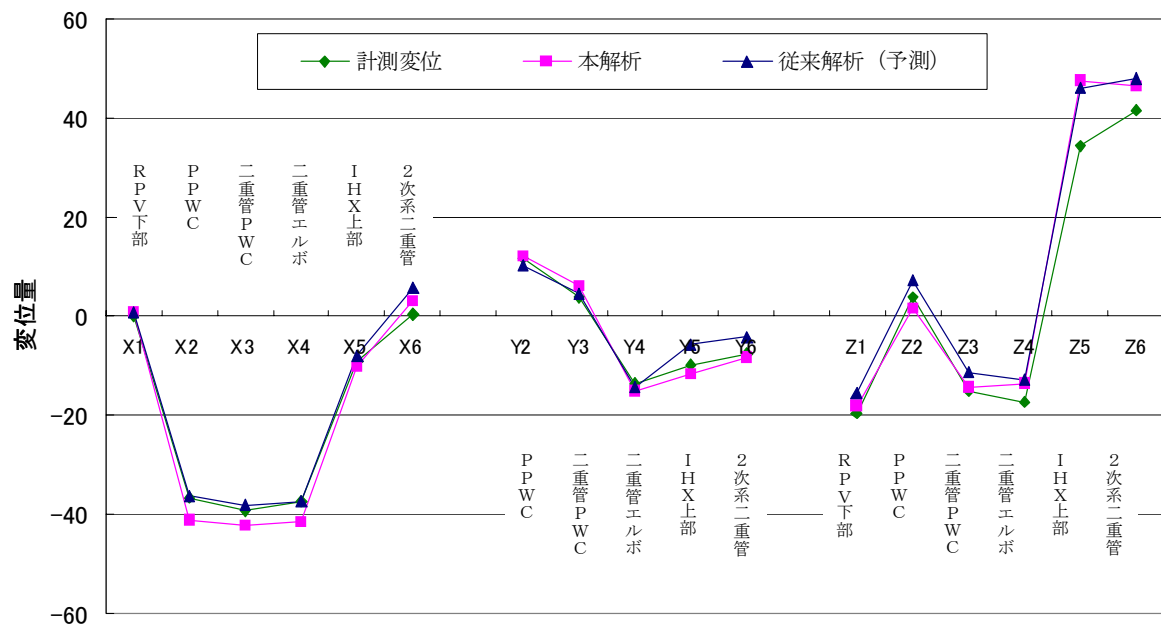


Fig.6.6 定格到達時(RS-5) の計測変位と解析変位

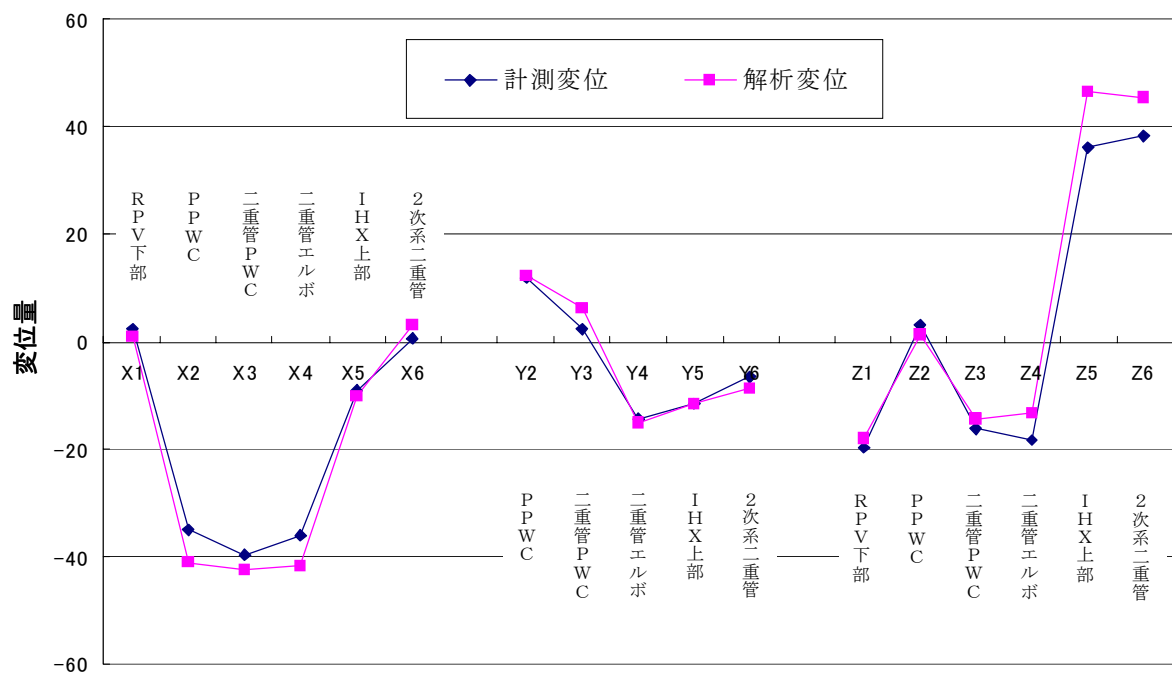


Fig.6.7 定格到達時(RS-9)の計測変位と解析変位

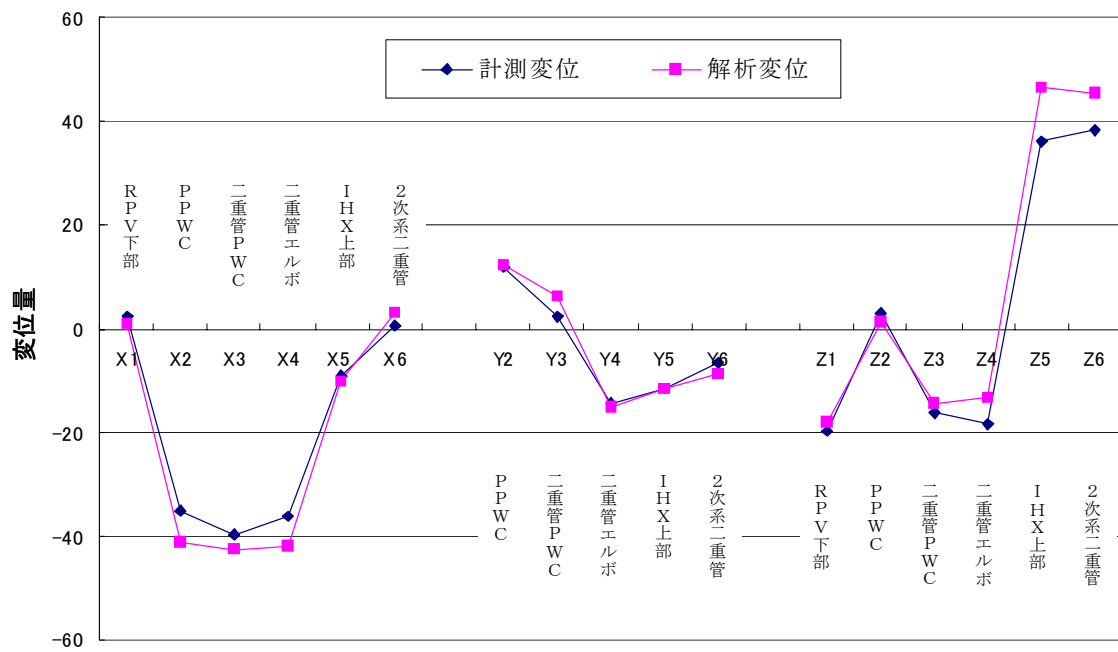


Fig.6.8 定格到達時(PT-5)の計測変位と解析変位

Table 6.1 機器ノズル部変位量

	出力状態		
	30%	50%	100%
RPV ノズル変位量 (100)	-2.26	-3.11	-5.30
RPV ノズル変位量 (190)	2.39	3.29	5.60

本提示値は、Z方向変位量を示す。なお、移動量算出は100%出力時を基準に、各出力時での変位量を温度により換算した。

Table 6.2 解析に使用したバネ定数

ハンガの種類	ハンガ番号	ハンガ重量 (kg)	バネ定数 (kg/mm)
コンスタントハンガ	3001	38400	20.2
	3002	37800	19.9
	2001	18600	23.3
	2002	18600	23.3
リジッドハンガ	1001	17600	5.5
	1002	17600	5.5
	1003	17600	5.5

Table 6.3 オイルスナバの1mm/secにおける実測抵抗カ

オイルスナバ の種類	容量 (kgf)	抵抗カ (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

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量		SI 基本単位	
		名称	記号
面積	平方メートル	積	m ²
体積	立方メートル	積	m ³
速度	メートル毎秒	度	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	度	m/s ²
波数	毎メートル	数	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	密度	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	密度	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	積	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	密度	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	密度	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	濃度	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	濃度	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	度	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)		1
比誘磁率 ^(b)	(数字の)		1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量		SI 組立単位			
		名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	m ⁰
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²	m ² m ⁻²
周期	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	K
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	cd
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	m ⁻² cd
吸収線量, ビエネルギー当分, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	s ⁻¹ mol

- (a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量		SI 組立単位			
		名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘り度	パスカル秒	Pa s		m ⁻¹ kg s ⁻¹	
力のモーメント	ニュートンメートル	N m		m ² kg s ⁻²	
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m		kg s ⁻²	
角速度	ラジアン毎秒	rad/s		m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²		m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²	
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²		kg s ⁻³	
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K		m ² kg s ⁻² K ⁻¹	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)		m ² s ⁻² K ⁻¹	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg		m ² s ⁻²	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)		m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³		m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m		m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³		m ⁻³ sA	
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²		m ⁻² sA	
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²		m ⁻² sA	
誘電率	ファラド毎メートル	F/m		m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²	
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m		m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol		m ² kg s ⁻² mol ⁻¹	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)		m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg		kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s		m ² s ⁻³	
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr		m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)		m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³		m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	タ	Y	デ	シ
10 ²¹	ゼ	タ	Z	セ	ン
10 ¹⁸	エク	サ	E	ミ	リ
10 ¹⁵	ペ	タ	P	マイ	クロ
10 ¹²	テ	ラ	T	ナ	ノ
10 ⁹	ギ	ガ	G	ピ	コ
10 ⁶	メ	ガ	M	フェ	ト
10 ³	キ	ロ	k	ア	ト
10 ²	ヘ	クト	h	ゼ	プト
10 ¹	デ	カ	da	ヨ	クト

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =10 ⁻¹² cm ² =2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エールグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ) 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

