

# 歪み量直接測定による残留応力測定技術の開発

Development of a new method for determining residual stress by microscopic measurement of the distance between markers

戸塚 信夫 (Nobuo Totsuka)\* 酒井 俊治 (Shunji Sakai)\*  
中島 宣雄 (Nobuo Nakajima)\* 光田 弘道 (Hiromichi Mitsuda)\*

**要約** 原子炉圧力容器上蓋の管台貫通部の応力腐食割れ (SCC) 発生事例は、我が国では報告された例はないが、海外においては数例の報告がある。本劣化事象研究のためには、SCC発生個所の残留応力を測定することが重要であるが、実機プラントの当該部位に適用できる既存技術はない。このため、前記部位である管台の管内面の残留応力を測定する方法として、ダイヤモンド圧子を有するマーカーを開発し、このマーカーにより、打刻された標点間距離を測定顕微鏡を用いて、測定し直接歪み量を求める方法で、歪みゲージと同等の精度で、残留応力が測定できることを確認し、上記部位に適用できることを検証した。

**キーワード** 原子炉圧力容器上蓋貫通管台, SCC, 残留応力, 歪み量, 歪みゲージ, ダイヤモンド圧子, 4点マーカー, 測定顕微鏡

**Abstract** Abstract: The Stress Corrosion Cracking (SCC) has been observed abroad in several PWRs' control rod drive mechanism nozzles. Although it is considered that the residual stress is the essential cause of SCC, the mechanism is not known yet. For the purpose of measuring residual stress at the portion where the SCC was observed, no suitable conventional technique are available.

In this paper, new technique developed for measuring residual stress around the location of SCC is proposed. The technique consists of the following steps: stamping markers with diamond tips and measuring the distance between two marks using measuring microscope before and after releasing the stress.

The residual stress can be calculated from the value of the strain, i.e. change in the distance.

It has been confirmed that this technique gives the same accuracy as the conventional method using strain gage.

**Keywords** PWR Control Rod Drive Mechanism Nozzle, SCC, Residual stress, Strain gage, diamond tip, 4 point marker, measuring microscope

## 1. はじめに

原子炉圧力容器（以下RVと略す）上蓋の管台貫通部には、海外においていくつかの応力腐食割れ（以下SCCと略す）発生事例が報告<sup>(1)(2)</sup>されている。日本においては、SCC発生事例の報告はないものの予防保全の観点から既に上蓋の交換が行われたり、また、近い将来交換を行う予定のプラントがある。一方においては、当該部材料に関する経年劣化デ

ータは非常に少なく、特にSCC発生の主要因である残留応力、すなわち当該材料にどのような残留応力が作用してSCCの発生が助長されるのかについての知見はほとんど得られていないのが現状である。

この原因は、当該部材（図1に参考図を示す）の残留応力を測定しようとする場合、従来の非破壊的手法では検査に用いる装置が大きすぎて口径の小さな当該部には取り付けができず、破壊を伴う検査法

\*(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

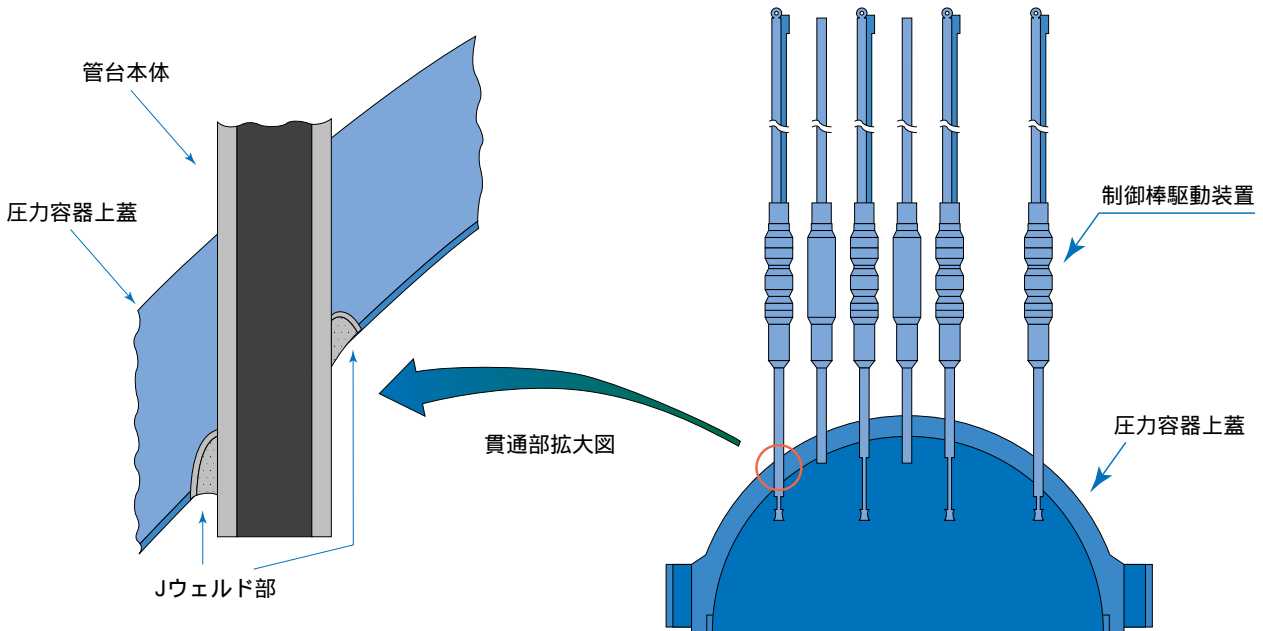


図1 压力容器上蓋貫通部略図

に一般的に用いられる歪みゲージ法では汚染されている当該部に歪みゲージを正確に貼るための作業時間を確保するのが困難なためである。

そこで、当該部に適用できる新しい残留応力測定技術の開発を目的に研究開発を行い、実機に適用できる新技术を開発できたので、本技術並びに本技術の検証結果について報告する。

## 2. R V 上蓋管台貫通部の残留応力測定法への必要条件

R V 上蓋管台貫通部の残留応力測定法は、次の条件を満足するものでなければならない。すなわち

- a. 残留応力測定は、R V 上蓋の交換作業中に、保管廃棄されるまでの短い時間を利用して実施する必要上、および管台部はかなり汚染されているという理由で、作業時間が非常にタイトである。従って、短時間作業が可能な方法であることが要求される。
- b. 当該部材表面の脱脂、洗浄等の前処理が充分にできないので表面の汚れに鈍感な方法であることが必要である。

## 3. 小型化及び精度向上のための予備実験

上記の2条件を満足する方法として大型鋼材、鋼管等で行われている直接歪み測定法に着目した。

この方法は、50mm～100mm以上の標点間距離をポンチでマーキングし、応力開放の前後における評点間距離の変化をダイヤルゲージ等で測定するものである。この方法をR V 上蓋管台の口径の小さい管の内部に適用できるように小型化して評点間距離を短くし、かつ測定精度を向上するために、写真1に示す2点マーカー（評点間距離10mm）を試作して予備実験を行った。試作機のマーキング用ポンチにはマイクロピッカース硬度計の圧子（1辺約300μm程度の正四角錘状ダイヤモンド）2個を用いた。

本測定方法が所期の測定精度をもつことを検証するため、図2に示す形状、表1に示す機械的性質の引張り試験片を用いて以下の試験を行った。

試験は引張り試験機（島津製作所製、25 t オートグラフ）に写真2の様に、あらかじめ平行部に歪みゲージ（共和電業社製、単軸歪みゲージ、ゲージ長5mm、電気抵抗120Ω）を貼付した試験片をセ



写真1 マーカー外観

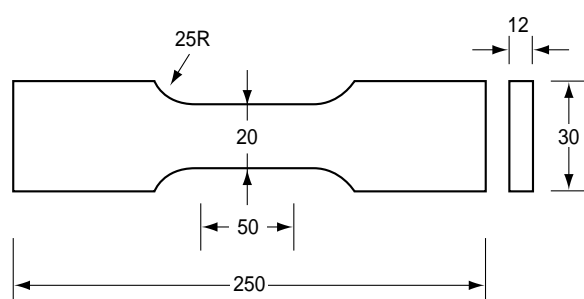


図2 引張試験片形状

表1 供試材の機械的性質

降伏点(kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ(kg/mm <sup>2</sup> )	弾性限伸び(%)	全伸び(%)
78.34	84.31	0.64	26.2

ットした。所定の荷重を负荷した時点で写真3に示すような、手振れ防止ジグにセットした2点マーカーで、歪みゲージを貼付した面とは反対側の平行部にマーキングした。このとき同時に、歪みゲージの抵抗値と試験機の荷重を測定および記録した後、荷重を除き、その前後における刻印間距離の変化、すなわち歪み量を測定した。刻印間距離は写真4に示すような測定顕微鏡を用いて測定した。測定した歪みの値は、試験機および歪みゲージの指示値と比較した。

目標荷重は10, 20, 30, 40kg / mm<sup>2</sup>の4点で、それぞれ3回繰り返して実験を行った。

なお、歪み量から応力を計算するには、試験を単

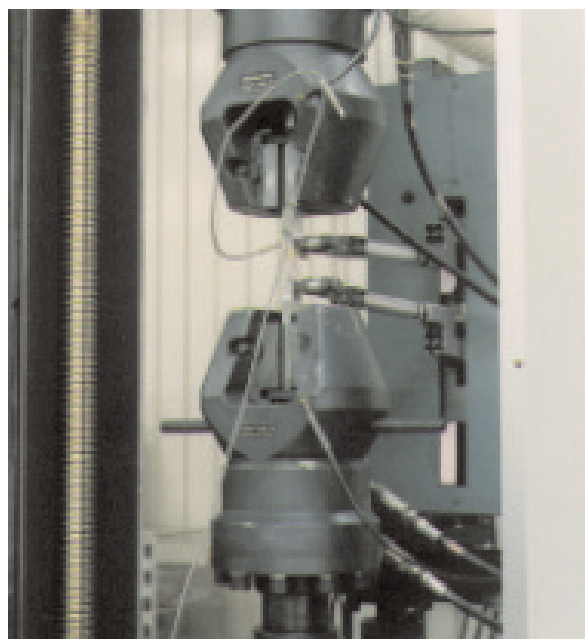


写真2 試験状況

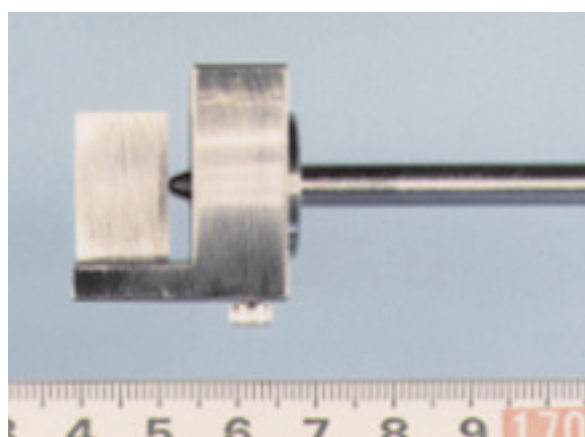


写真3 固定金具付きマーカー

軸引張りと考えて次の式(1)を用いた。

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

σ : 応力      E : ヤング率      ε : 歪み量

試験結果は図3に示したとおりである。なお、本試験では試験機の荷重を実績荷重すなわち真値とし、ヤング率を21000kg / mm<sup>2</sup>として計算した。これらの試験結果から、本測定法は歪みゲージとほぼ同程度の精度をもつものであることが明らかになった。



写真4 圧痕間隔測定状況

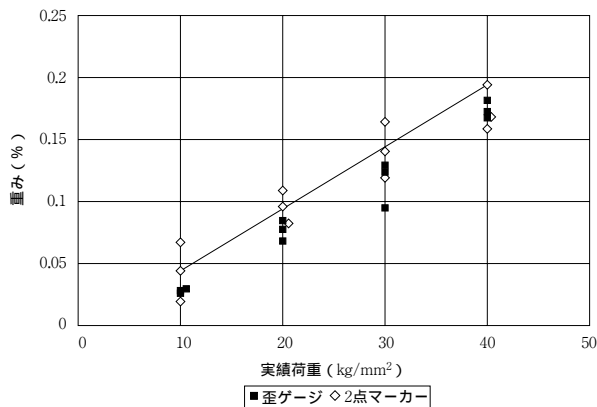


図3 予備的試験結果 (荷重と歪みの関係)

#### 4. 実機適用自動マーキング装置の開発

前述の予備実験により、ダイヤモンド圧子によるマーキングとそれによる標点間距離の測定を測定顕微鏡で行う本方法が、歪みゲージによる方法と同程度の精度が得られることが明らかとなったのでRV上蓋管台の管内面を測定するための自動マーキング装置の開発を行った。

開発した装置は管内面にマーキングするためのダイヤモンド圧子4個を正方形の頂点に配する4点マーカヘッドとこのヘッドに駆動力を伝達するシャフトと駆動力を発生させるモーターおよび制御装置からなっている。

写真5, 6に装置の外観を示し、写真7~10にマーカヘッドの部分を示す。

写真7, 9はマーカ部分が引っ込んだ状態のもので写真8, 10はマーカがマーキングのために飛び出している状態を示している。また写真9, 10はパイプ内にマーカ部分を挿入した状態を示している。

なお、ダイヤモンド圧子を正方形の頂点に4個配したのは管内面の管軸方向と周方向の2軸の応力を測定するためと、マーキング時の圧子間のバランスを取るためである。図4に本装置を用いての管内面残留応力測定作業の概念図と図5にマーカヘッドの略図および残留応力の計算方法を示した。

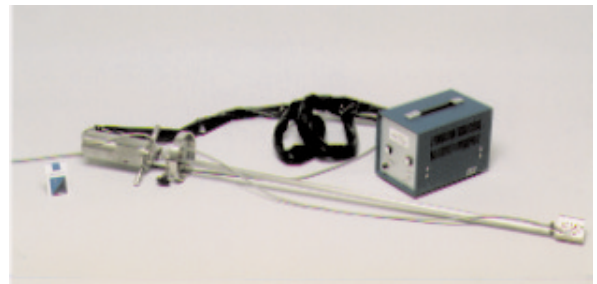


写真5 装置外観

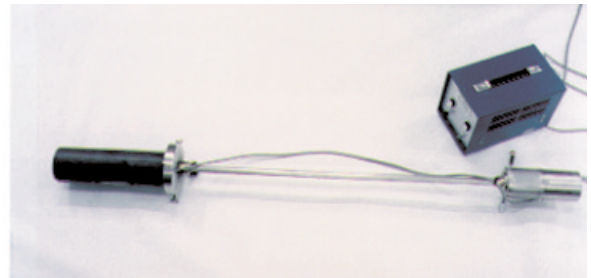


写真6 装置外観 (パイプに装着したところ)

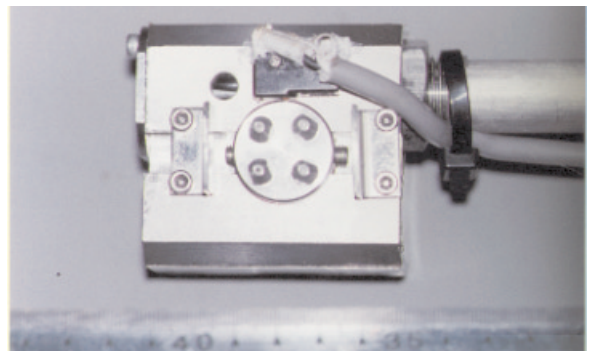


写真7 マーカヘッド外観 (マーカヘッド部押し出し前)



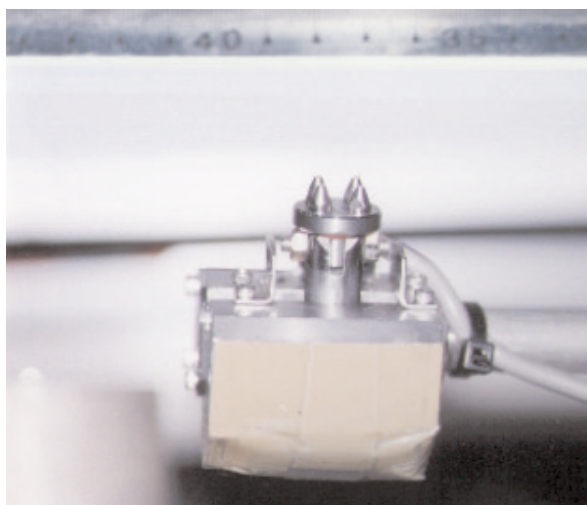


写真8 マーカーヘッド外観 (マーカー部押し出し時)

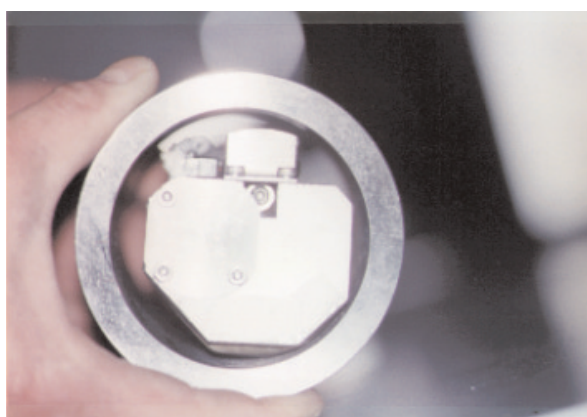


写真9 パイプ挿入時 (マーカー部押し出し前)

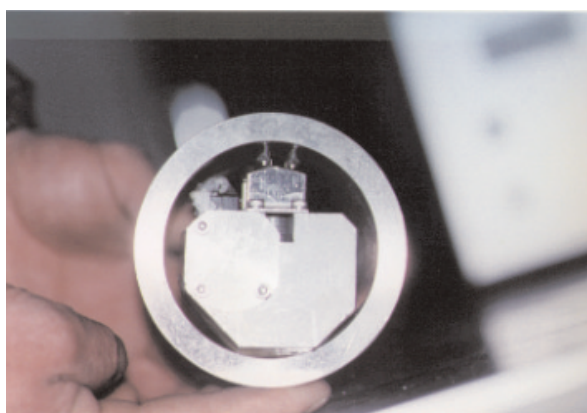


写真10 パイプ挿入時 (マーカー部押し出し時)

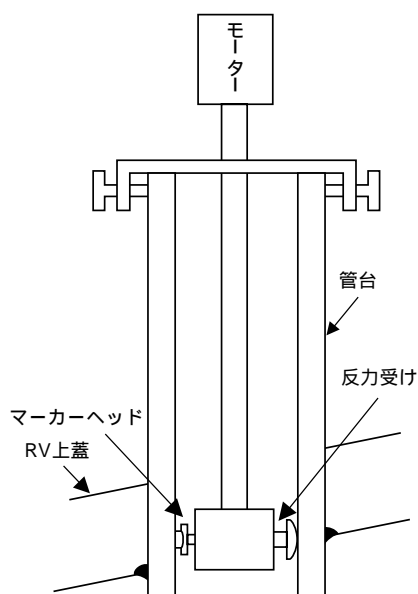
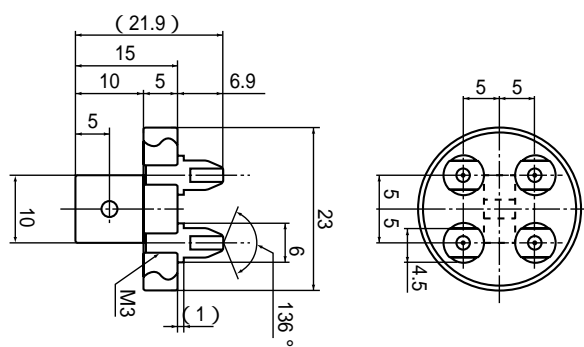
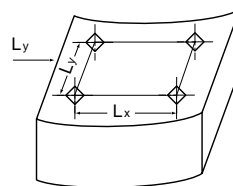


図4 上蓋貫通台部残留応力測定装置概略図



マーカー先端部略図



応力開放後マーク

- $L_x^0$  : x 方向マーカー間オリジナル距離
- $L_x$  : 応力開放後の x 方向マーカー間距離
- $L_y^0$  : y 方向マーカー間オリジナル距離
- $L_y$  : 応力開放後の y 方向マーカー間距離

残留応力計算式 :

$$\begin{aligned}
 \text{x方向応力} \quad \sigma_x &= E \cdot (1 - \nu^2) \cdot (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y) \\
 \text{y方向応力} \quad \sigma_y &= E \cdot (1 - \nu^2) \cdot (\epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x) \\
 \text{x方向歪み} \quad \epsilon_x &= L_x^0 - L_x \quad \text{y方向歪み} \quad \epsilon_y = L_y^0 - L_y \\
 \text{: 応力} \quad E &: \text{ヤング率} \quad \nu : \text{ポアソン比} \quad \epsilon : \text{歪}
 \end{aligned}$$

図5 マーカー先端部略図および残留応力測定法略図

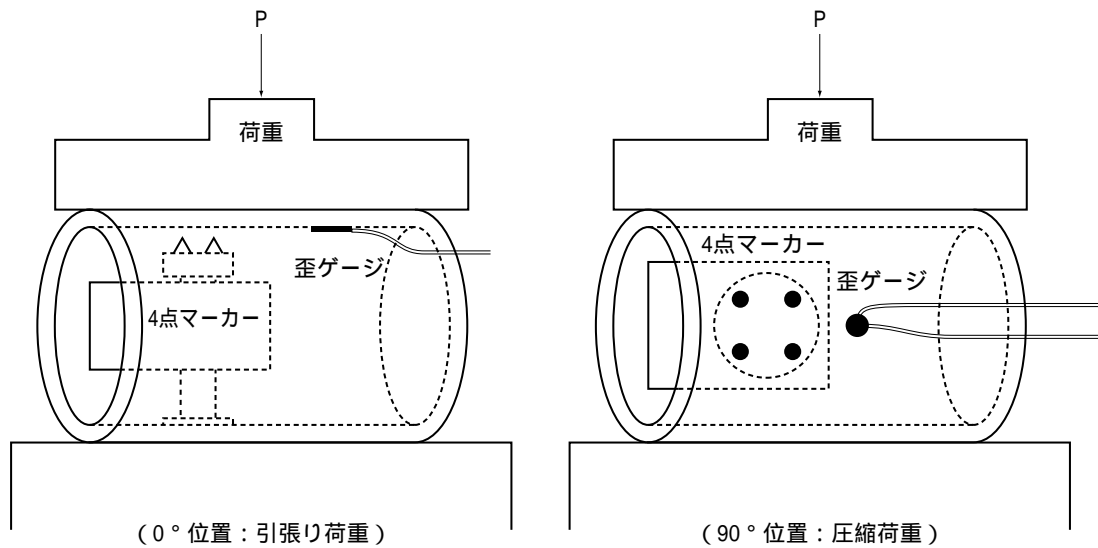


図6 パイプによる4点マーカ-検証試験略図

実際の残留応力の測定は、図4の要領で必要個所にマーキングした後管台部分を切り出してマーキングした部分を図5の様に細断し応力開放した後、測定顕微鏡で評点間距離を測定して図5の計算式により残留応力を計算する。ここで、応力開放前の評点間距離はマーカ-のダイヤモンド圧子間の距離を直接測定した値を用いた。

## 5. 4点自動マーキング装置の検証試験

開発した4点マーキング装置の検証試験を、前述の引張り試験片および引張り試験機による方法とステンレスパイプとアムスラー試験機を用いた二つの方法で行った。

### 5.1 4点自動マーキング装置の検証試験方法

引張り試験片による検証は、あらかじめ歪みゲージを貼付した試験片を写真11のようにセットし、その反対側の面に4点マーカ-をセットして、所定の荷重を負荷した時点でマーキングと歪みゲージの測定を行う、3.と同様の方法で行った。

パイプによる検証は、市販のSUS304ステンレスパイプ(外径76mm、肉厚5mm)を長さ50mmで輪切りにしたものをを用いた。

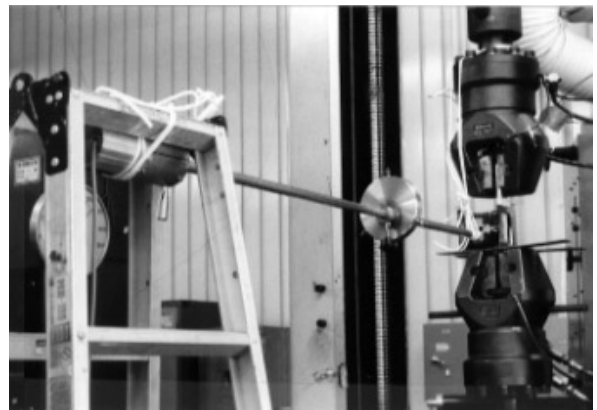


写真11 引張り試験片による検証試験全景

試験は、図6および写真12に示すようにアムスラー試験機に、歪みゲージ(共和電業社製、2軸直交型、ゲージ長2mm、電気抵抗120Ω)をあらかじめ貼付した上記パイプをセットし、4点マーカ-を歪みゲージの直近に配置して行った。所定の圧縮荷重を負荷した時点で、マーキングと歪みゲージの測定を同時に行い、その後荷重を除き、パイプを切断して内面に打刻された刻印間距離を測定顕微鏡で測定した。また、パイプ加工時の残留応力の有無については、歪みゲージで確認したが本実験材では残留応力は検出されなかった。

なお、引張り応力下での検証は図6の0°位置で、圧縮応力下では90°位置で行い、目標荷重は20、

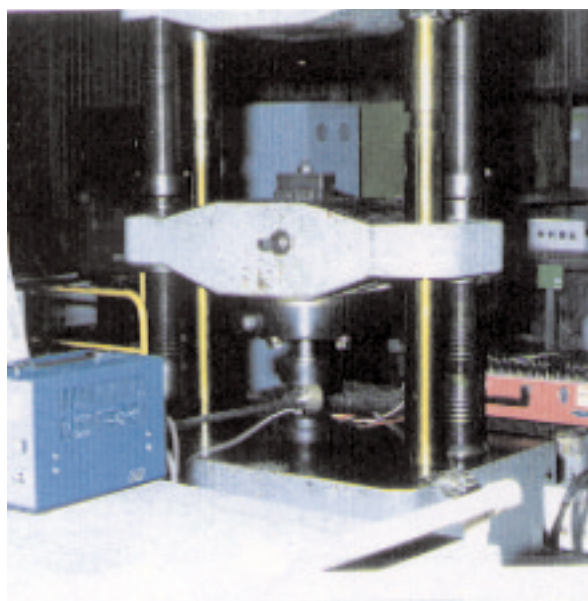


写真12 パイプによる4点マーカース実証試験全景



10, - 10, - 20kg / mm<sup>2</sup>の4点でそれぞれ3回繰り返して実験を行った。

## 5.2 4点自動マーキング装置の検証試験結果

写真13, 14に本装置でマーキングした刻印をしめす。

平板試験片上には正四角錐状に、パイプ内面には底面が菱形の四角錐状に打刻されるがいずれも頂点の位置は1点で示されていることがわかる。

次に、図7に引張り試験片による、図8にパイプによる検証試験結果をそれぞれ示す。

ここで、パイプによる検証試験ではオーステナイトステンレス鋼のヤング率として一般的に用いられている18000kg / mm<sup>2</sup>を用いた。

また、実績荷重すなわち真値は、アムスラーの荷重と、梁曲げ問題として円輪の変形問題を解いた次式<sup>(3)</sup>から計算して求めた。

内面最大応力

$$\sigma = P/(2 \times A) + M \times (Z(K \times (R - Z) - 1)(A \times R))$$

$$K = -1 + R / (2 \times H) \times \ln((R + H) / (R - H))$$

$$M = P \times R \times (-1 / \pi \times (1 + K) + 0.5)$$

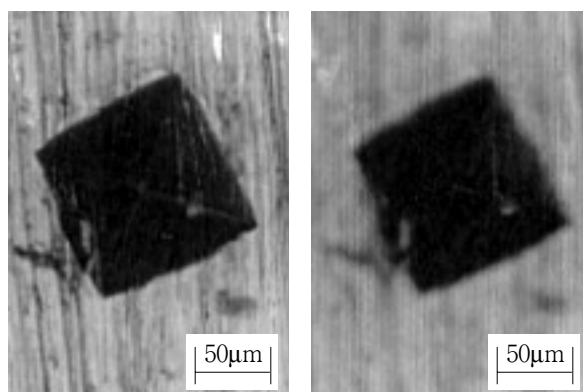


写真13 4点マーカースによる平板試験片上マーク

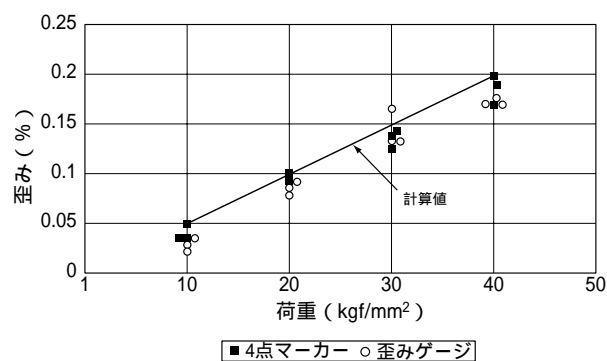


図7 引張り試験片での荷重と歪みの関係

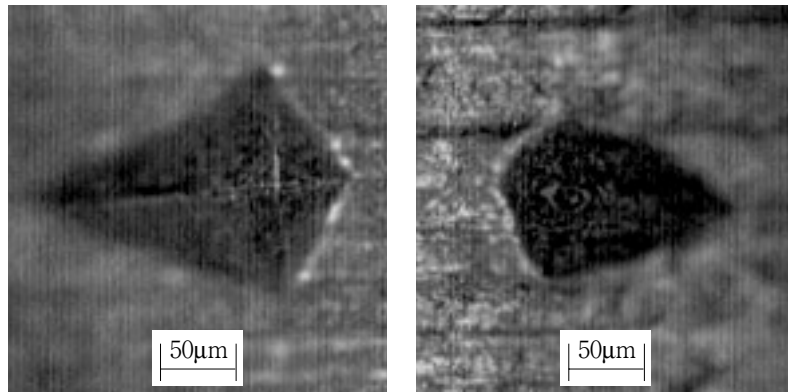


写真14 4点マーカによるパイプ上マーク

$P$  : 荷重,  $R$  : 中立軸半径,  $Z = H = t/2$ ,  
 $t$  : 板厚,  $A = t \times l$ ,  $l$  : パイプ長

以上の結果から、本装置によるマーキングと測定顕微鏡による歪み量の直接測定という新しく開発した残留応力測定法が歪みゲージによる方法と同等の精度を持つ方法であり、圧縮、でも引張りでも有効であることが検証された。

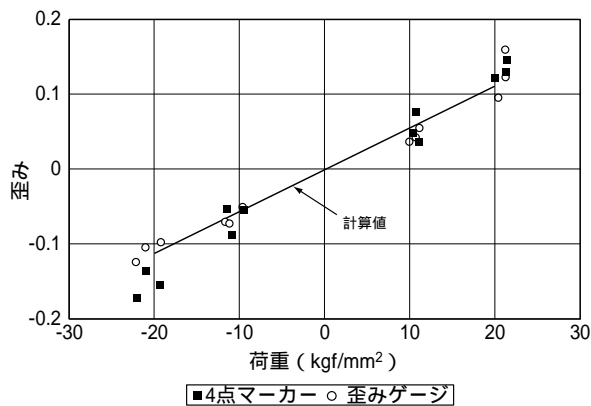


図8 パイプでの荷重と歪みの関係

## 6. まとめ

R V上蓋管台の管内面の残留応力測定法として、従来技術より作業時間が短時間で、かつ材料の表面

状態により鈍感な新手法の開発・検討を行った結果、ダイヤモンド圧子による評点間の正確な打刻と、測定顕微鏡による評点間距離の変化、すなわち歪み量の精密な計測によって歪みゲージによる方法と同等な精度で残留応力の測定が可能であることを明らかにした。

また、本技術をR V上蓋管台部に適用するための装置としてマイクロビッカース硬度計用のダイヤモンド圧子を4個、正方形の頂点に配するマーカヘッドを持ち、このヘッドを遠隔駆動させてマーキングする4点マーカを開発した。

## 7. 謝辞

本装置の試作、開発には、東伸工業(株)殿およびオグラ宝石(株)殿の協力を、本装置、手法の検証には川鉄テクノリサーチ(株)殿の協力を頂いたことを感謝いたします。

## 参考文献

- (1) Assesment of Pressurized Water Reactor Control Rod Drive Mechanism Nozzle Cracking, NUREG/CR-6245, Oct., 1994
- (2) "Vessel Head Penetration Cracks Found at Two U.S. Plants", Nucleonics Week, Nov., 1994
- (3) 中原一郎：材料力学(上巻) p 204 養賢堂出版