

# 小口径配管の残留応力改善手法の開発

## DEVELOPMENT OF STRESS REDUCTION METHOD IN THE SMALL-BORE PIPE

日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	福田 ゆか	Yuka FUKUDA	Nonmember
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	折谷 尚彦	Naohiko ORITANI	Nonmember
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	大城戸 忍	Shinobu OKIDO	Nonmember

### Abstract

It is well understood that the reduction of the residual tensile stress in the welded zone is effective as inhibitor of occurrence and growth of SCC in low-carbon stainless steel. Therefore, some stress reduction methods for the pipe welded zone have already been developed. However, stress reduction method for small-bore, thin-wall pipes which nominal outside diameter are 60.5mm and below, have not been established. In this study, residual tensile stress reduction method that is applicable to small-bore pipe has been developed.

The stress reduction method of this study can reduce residual tensile stress by using thermal stress which is generated by transitive large temperature difference between inner and outer surface of the pipe wall by heating the pipe wall with an external heating device and rapidly quenching inner surface of the pipe with cooling water. And the effectiveness of this method is shown by mock-up tests.

**Keywords:** Stress Corrosion Cracking, Piping, Residual Stress, Heating, Cooling, Thermal Stress

## 1. 緒言

沸騰水型軽水炉に採用されていたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 製の配管では、1970 年代後半頃から溶接熱影響部で、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : SCC) が発生した。SCC は 3 要因が重畳したときに発生することが知られている [1]。1 つは溶接による溶接部近傍の Cr 欠乏による材料劣化、次に高温純水中の腐食環境、そして溶接部の引張残留応力である。オーステナイト系ステンレス鋼製配管での SCC 対策としては、材料要因の改善として耐鋭敏化特性に優れた低炭素系ステンレス鋼 (SUS316L および SUS316NG) が耐 SCC 材料として開発され、実機に採用された。

また近年では、製造時の材料表面の強加工による硬化層が低炭素系ステンレス鋼の SCC の発生に影響すると考えられていることから [2]、2006 年には経済産業省 原子力安全・保安院により省令の解釈の一部が改正され [3]、製作時の機械加工や溶接等において SCC 発生の可能性が高くなるような施工方法を避けるよう考慮し、高い残留応力がある場合には

必要に応じて材料表面の応力改善を行うこと等が要求されている [4]。

配管溶接部の引張残留応力の低減方法については、これまでに多くの研究が開発されている。代表的なものが熱ひずみを利用した高周波誘導加熱応力改善法 (Induction Heating Stress Improvement : IHSI) [5][6] や水冷溶接 (Heat Sink Welding : HSW) [7][8] である。これらの工法は SCC の事例が確認されている大口径配管を中心に適用されている。一方、公称外径 60.5mm 以下の小口径配管は板厚が薄いため、これらの工法では板厚内に温度勾配を発生させるのが困難であり、十分な効果が得られない。さらに原子力プラントの小口径配管は、狭隘なルートで敷設されていることが多く、大規模な装置を使用することが難しい。従って、小口径配管に対する残留応力改善工法は現状確立されていない。

本研究では、公称外径 60.5mm 以下の小口径配管の溶接部に適用可能な引張残留応力改善手法として、溶接部近傍の配管外表面を強制的に加熱した後、配管内表面を冷却水にて急冷し、配管の内外面に大きな温度差を与えて発生する熱応力により、残留応力を改善する手法を開発した。以後、デルタ T 工法と称す。試験によりデルタ T 工法の効果を確認した。

連絡先: 福田ゆか, 〒317-0073 茨城県日立市幸町  
3 丁目 1 番 1 号, 日立 GE ニュークリア・エナジー(株), 電話:  
0294-55-4614, E-mail: yuka.fukuda.ja@hitachi.com

## 2. 小口径配管溶接部の残留応力改善手法

デルタT工法は、配管溶接後に溶接部近傍の配管外表面を強制的に加熱した後、配管内表面を冷却水にて急冷することで、配管内外面に過渡的に大きな温度差が発生し、その時に生じる高い熱応力により内面を引張降伏させ、残留応力を改善する手法である。加熱温度の調整により温度差、即ち、熱応力を調整することが可能であるため、板厚が薄い小口径配管でも、容易に残留応力の改善が可能である。デルタT工法の施工概要図を図1に示す。

図2には、デルタT工法中における一連の配管外表面と内表面の応力・ひずみ履歴を模式的に示す。デルタT工法中の応力ひずみ変化は、加熱、冷却、定常の3つの工程に分類される。加熱中は、加熱温度に起因する熱膨張分伸び、この段階では、配管内外面関係なく均一に伸びる。配管内面に冷却水を通水すると、外表面は高温、内表面は低温になり配管の板厚方向に温度勾配が発生する。配管外面では高温状態が維持されるため伸びたままであるが、配管内面が縮むため圧縮方向の熱応力が発生し降伏する。一方、配管内面では冷却水により冷却されるため縮もうとするが、配管外面が伸びた状態であるため引張り方向の熱応力が発生し降伏する。冷却水を流し続け配管内外面の温度差がなくなると、冷却時に発生した降伏のスプリングバックにより、外面では引張り、内面では圧縮の応力が発生する。

デルタT工法により配管内面で塑性変形が発生するのに十分な配管内外面の温度差について検討する。内半径  $a$ 、外半径  $b$  の中空円筒に  $\Delta T$  の温度勾配が存在するときの配管内表面に発生する周 ( $\sigma_\theta$ )、軸 ( $\sigma_a$ ) 方向応力は以下の式で求められる[9]。

$$\sigma_\theta = \sigma_a = \frac{\alpha \cdot E}{2(1-\nu)} \Delta T \cdot \beta_1 \dots (1)$$

ここで、 $\alpha$  は線膨張率、 $E$  は縦弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $\beta_1$  は以下の式で表される。

$$\beta_1 = \frac{2b^2}{b^2 - a^2} - \frac{1}{\ln(b/a)} \dots (2)$$

図3は、50A sch80 配管 ( $a$  : 24.75 mm,  $b$  : 30.25 mm) を例に(1)式を解いた結果を示す。ここでは  $\alpha$  は  $15.14 \times 10^{-6}$  mm/mm°C,  $E$  は 195 GPa,  $\nu$  は 0.3 とした。図3より、配管内外面に板厚方向の温度差  $\Delta T$  を与えた場合、周軸方向に熱応力が付与され、配管内面に塑性変形を与え、溶接部近傍の引張残留応力を圧縮方向に改善することが可能である。

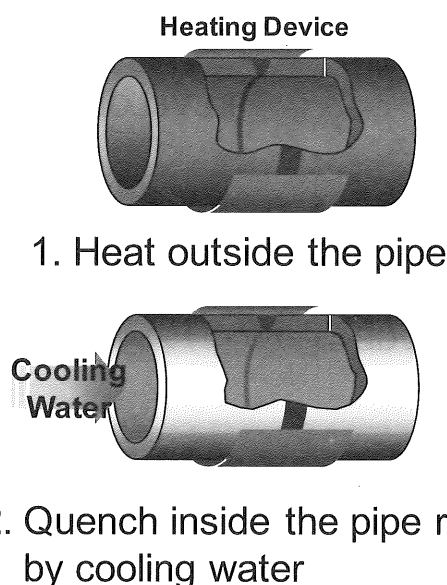


Fig. 1 Outline of Delta-T Method

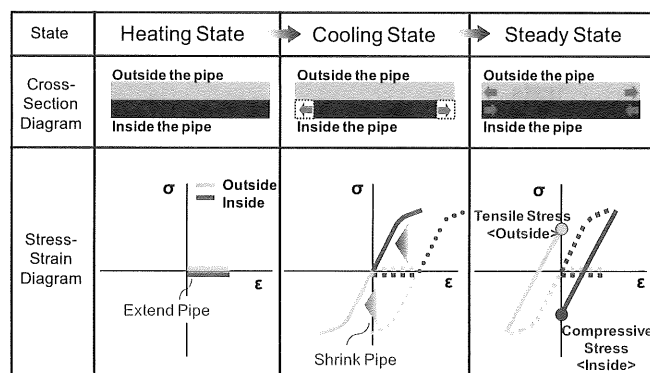


Fig. 2 Mechanism of Stress Reduction Method by Delta-T Method

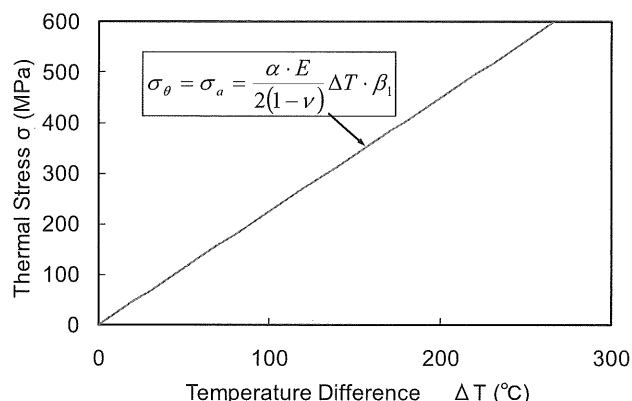


Fig. 3 Thermal Stress due to Temperature Difference in Wall Thickness (50A PIPE)

### 3. 実機模擬試験による施工効果の検証

デルタT工法による残留応力改善効果について、溶接部にデルタT工法を施工した配管試験体について、残留応力測定を行い、溶接ままの試験体との残留応力の比較を行い、検証を行った。

#### 3.1 試験方法

試験ケースおよび試験体一覧を表1に示す。試験体は、公称外径 60.5mm、公称板厚 5.5mm の小口径配管を選定した。また継手形状は原子力プラントのSCC対策範囲の配管溶接部として最も多い直管同士の突合せ溶接部、およびエルボと直管の突合せ溶接部とした。試験体の材質は SUS304TP とした。

試験方法としては、TP-1, TP-2 の試験体に加熱ヒータを用いて溶接部近傍の配管外表面を規定加熱温度まで加熱後、冷却水を配管内に通水し急冷させた。

デルタT工法の応力低減効果の確認として、デルタT施工後の試験体についてひずみゲージを用いた切断法による溶接部近傍の残留応力測定を行い、溶接ままの試験体の結果と比較した。残留応力測定要領について以下に示す。

- (1) 各試験体を、溶接止端から 3D 離れた位置で切断する。(ここでDは配管外径寸法)
- (2) 配管溶接部近傍の内外面にひずみゲージを取付ける
- (3) 初期値のひずみを測定する。
- (4) ひずみゲージを中心に配管を細断する
- (5) 切断後のひずみ測定を行い、測定した周方向の開放ひずみ  $\varepsilon_\theta$  と軸方向の開放ひずみ  $\varepsilon_z$  から、周方向の残留応力  $\sigma_\theta$  と軸方向の残留応力  $\sigma_z$  を式 (3) と式 (4) により求める。

$$\sigma_\theta = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta - \nu\varepsilon_z) \dots (3)$$

$$\sigma_z = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_z - \nu\varepsilon_\theta) \dots (4)$$

#### 3.2 試験結果

デルタT工法を施工した 50A 直管-直管 (TP-1) 溶接試験体の配管内面の残留応力測定結果を図4に示す。なお図中には、施工効果の比較として溶接まま(As-Weld)の試験体の残留応力測定結果も記載した。デルタT工法未施工の溶接試験体では溶接部近傍では周軸ともに引張残留応力であるのに対して、デルタT工法を施工した試験体においては溶接部近傍でも周軸方向ともに圧縮方向に改善されており、圧縮応力となっている。

また 50A 直管-エルボ試験体(TP-2)の残留応力測定結果を図5に示す。エルボ試験体においては、軸方向で若干引張残留応力が残る結果となったが、溶接ままの試験体と比較すると、周軸方向ともに圧縮方

向に改善されている。従って、デルタT工法を施工することにより、溶接部の引張残留応力は、周軸方向ともに圧縮方向に改善できることが確認できた。

Table. 1 The Cases of Experiment and Specimens

Test Piece No.	Type	Outside Diameter	Wall Thickness
TP-1	Pipe-Pipe	60.5mm (50A)	5.5mm
TP-2	Elbow-Pipe	60.5mm (50A)	5.5mm

	0°	90°	180°	270°
50A PIPE (TP-1)	●	■	▲	◆
As-Weld	○	△	▽	◇

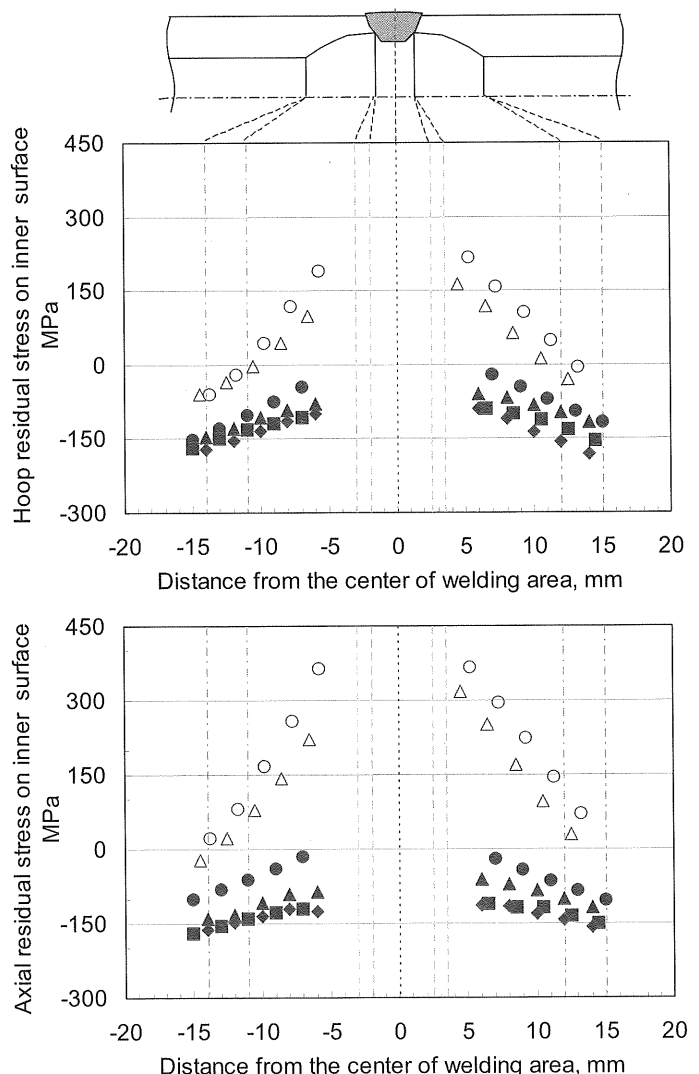


Fig. 4 Distribution of Residual Stress 50A PIPES (TP-1)

	0°	90°	180°	270°
50A ELBOW (TP-2)	●	■	▲	◆
As-Weld	○	□	△	◇

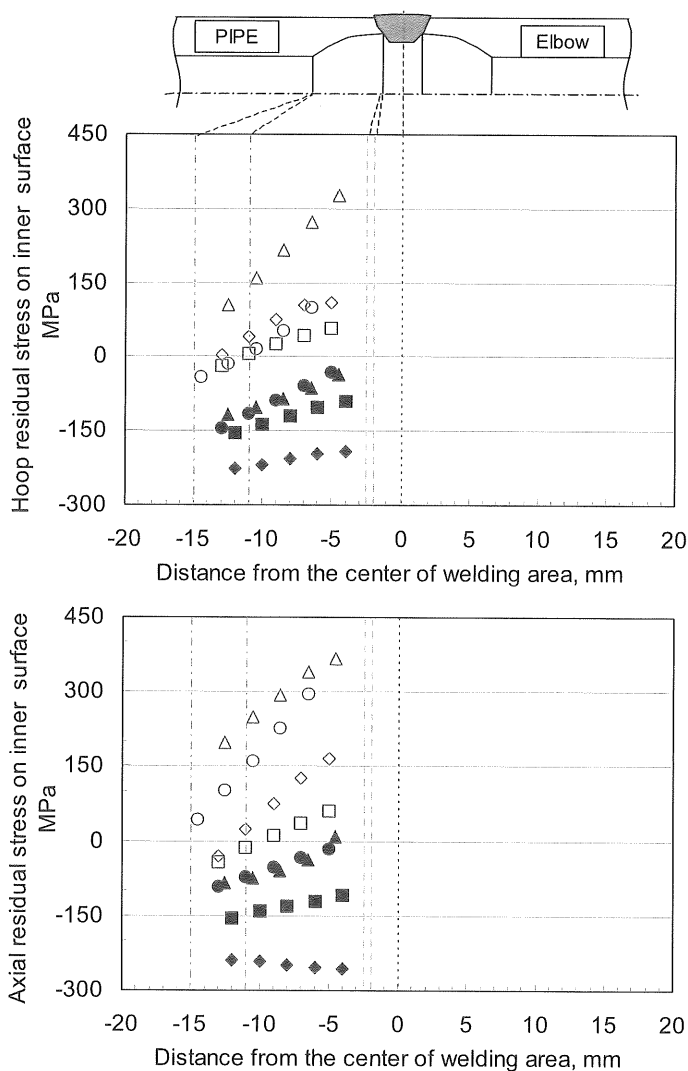


Fig. 5 Distribution of Residual Stress 50A ELBOW and PIPE (TP-2)

#### 4. 結 言

本研究では、デルタT工法という新たな残留応力改善手法を開発した。本研究における成果を以下にまとめる。

- ・ デルタT工法を、小口径配管の直管およびエルボの突合せ溶接部に適用することで、溶接部の引張残留応力を圧縮方向に低減できる。
- ・ 本工法により残留応力を低減できることから、本工法の適用により、SCCの発生および進展を抑制する効果が期待できる。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省原子力安全・保安院, “炉心シュラウドおよび再循環系配管の健全性評価について—検討結果の整理—(案)” 原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会(第10回)配布資料, 資料10-3 (2004)
- [2] M.Tsubota, Y.Kanazawa, H.Inoue, “The Effect of Cold Work on SCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steel” *Proceeding of the Seventh International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, Vol.1, p519-528 (1995)
- [3] 経済産業省原子力安全・保安院, “発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令の解釈の一部改正について” NISA-322c-06-5, (2006)
- [4] 日本機械学会, “「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(JSME S NC1-2001) 及び (JSME S NC1-2005) 【事例規格】 発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」” NC-CC-002, (2005)
- [5] 清水翼, 榎本邦夫, “原子力プラントにおけるステンレス鋼配管溶接部の局所高周波加熱による健全性向上に関する研究” *溶接学会論文集*, Vol.5 [No.3], p335-341 (1987)
- [6] 日本機械学会, “「発電用原子力設備規格 維持規格 (2004年版)」” JSME S NAI-2004, RB-2420, (2004)
- [7] 桐原誠信ら, “複管内水冷溶接による SUS 304 鋼管溶接部の残留応力および鋭敏化軽減法” *溶接学会論文集*, Vol.48 [No.10], p756-762 (1979).
- [8] 日本機械学会, “「発電用原子力設備規格 維持規格 (2004年版)」” JSME S NAI-2004, RB-2440, (2004)
- [9] 日本機械学会, “機械工学便覧 材料力学基礎編” (1994).