小口径突合せ溶接配管に対する残留応力改善方法の開発* (デルタ T 工法の適用による残留応力の改善)

青池 聡^{*1}, 鶴来 昌樹^{*1}, 大城戸 忍^{*2}, 福田 ゆか^{*2}, 折谷 尚彦^{*2}

Development of the Residual Stress Improvement Method for Small-Diameter Butt-Welding Pipe (Improvement of Residual Stress through Application of Delta-T Process)

Satoru AOIKE^{*1}, Masaki TSURUKI, Shinobu OOKIDO, Yuka FUKUDA and Naohiko ORITANI

^{*1}Hitachi Research Laboratory Hitachi, Ltd.
1-1, Saiwai-cho 3-chome, Hitachi-shi Ibaraki-ken, 317-8511 Japan

To prevent stress corrosion cracking (SCC) initiation at the inner surface of the butt-welding region of a small-diameter pipe, a residual stress improvement method has been developed. In this method, the butt-welding region is heated up to 325 degrees centigrade in air. After heating, a water quenching process is applied to the inner surface of the butt-welding region. During a water quenching process, a large thermal stress is generated by the temperature difference between inner and outer surfaces. When a thermal stress exceeds the yield stress of piping material, a tensile yield is generated at the inner surface of the butt-welding region. Because a tensile yield changes into a compressive residual stress, a compressive residual stress can be introduced at the inner surface of the butt-welding region after application of this method. In this study, residual stresses at the inner surface of the butt-welding region were measured. The measured residual stresses proved this method effectively reduces residual stresses and prevents SCC initiation.

Key Words : Stress Corrosion Cracking, Residual Stress, Small Diameter Pipe, Butt-Welding Region, Thermal Stress, Stress Improvement Method

1. 緒 言

近年、原子力発電プラントの高経年化に伴い、オーステナイト系ステンレス鋼製の高温純水配管溶接部における応力腐食割れ（以下、SCC : Stress Corrosion Cracking）の発生が顕在化している⁽¹⁾。SCC は、高温純水の高酸化環境、溶接部近傍の引張残留応力、熱鋭敏化等の材料劣化が重畳する条件下で発生することが知られており、熱鋭敏化しにくい低炭素ステンレス鋼の場合でも、溶接構造物製造工程の機械加工や表面仕上げにより硬化すると、高温純水中における SCC 発生感受性が高まることが報告されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。このため、再循環系配管等の大口径配管には SCC 発生抑制対策として、高周波誘導加熱応力緩和法⁽⁵⁾（以下、IHSI : Induction Heating Stress Improvement）等の残留応力改善方法が適用されている。IHSI は配管内部に冷却水を流した状態で配管外面を加熱することで配管内外面に定常状態の温度差を付与し、温度差で生じる熱応力により配管内面を引張降伏させて、その後、運転条件で圧縮に転じることにより残留応力を改善する方法である。一方、小口径配管（公称外径 60.5mm 以下、公称厚さ 5.5mm 以下）については、定常状態で配管内外面に高い温度差を付与するのが困難なため、上述の残留応力改善方法は適用されていない。しかしながら、小口径配管であっても、突合せ溶接部近傍内面の残留応力は 300MPa を超える場合があることが報告されている⁽⁶⁾。また、突合せ溶接部近傍の配管内面には機械加工（開先加工）が施されており、機械加工面の硬化によって SCC 発生感受性が高まる可能性が考えられる。このため小口径配管であっても、SCC 発生抑制の観点から残留応力を改善することが望ましい。

* 原稿受付 2012 年 1 月 25 日

^{*1} 正員、(株)日立製作所 日立研究所 (〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1)

^{*2} 日立 GE ニュークリア・エナジー(株) (〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1)

E-mail: satoru.aoike.rg@hitachi.com

小口径配管に対する残留応力の改善方法については、水の凝固に伴う体積増加を利用した局部拡張により配管内面の残留応力を圧縮化するフリージング工法⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾が開発され、当該工法の適用による残留応力改善効果が確認されている。しかしながら、発電プラントにおける小口径配管の敷設ルートは、他の配管や壁面と併設される場合が多く、残留応力の改善対象である突合せ溶接部近傍が狭隘部に位置する場合もある。このため、小口径配管の残留応力改善方法については、適用対象に応じて施工方法を選択できることが望ましい。

そこで本研究では、フリージング工法とは異なる施工方法で小口径配管突合せ溶接部近傍内面の残留応力を改善する方法を開発した。本報では、開発した残留応力改善工法の概要について報告するとともに、当該工法の適用により引張残留応力を低減できることを検証する目的で実施した、残留応力測定結果について報告する。なお、著者らは当該工法をデルタ T 工法 (Delta-T process for residual stress improvement: Delta-T Process) と名付けており、本報でも以下この呼称を使用する。

2. デルタ T 工法の概要および残留応力低減機構

デルタ T 工法の施工概要を図 1 に示す。小口径配管突合せ溶接部に対するデルタ T 工法の施工では、まず適用対象の突合せ溶接部近傍に外面からのヒータ加熱を行い、施工温度まで昇温する。その後、昇温した配管内部に冷却水を供給することで配管内面を急冷して施工を完了する。

デルタ T 工法の残留応力低減機構は、配管内外面の温度差により熱応力を発生させて配管内面を引張方向に塑性変形させるもので、大口径配管で採用されている IHSI と同様である。このため、残留応力を圧縮方向に改善するには、配管内外面の温度差により配管内面で発生する熱応力が配管材の降伏応力を超過することが必要となる。残留応力の改善に必要な配管内外面の温度差については、IHSI のように定常状態の温度差を付与する場合、配管内外面の温度差 ΔT と配管内面で発生する熱応力 σ との間には、次の関係が成立する⁽¹⁰⁾。ここで、 σ_θ は周方向の熱応力、 σ_z は軸方向の熱応力、 r_i は内半径、 r_o は外半径、 α は線膨張率、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比を示す。

$$\sigma_\theta = \sigma_z = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \Delta T \beta_1 \quad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{2r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{1}{\ln(r_o/r_i)} \quad (2)$$

残留応力改善に必要な温度差の具体例として、降伏応力が 300MPa の配管の残留応力を定常状態の温度差を付与して改善する場合について、300℃のステンレス鋼管を想定して、線膨張率を $18.79 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、縦弾性係数を 176 GPa、ポアソン比を 0.3 と仮定して試算する。外径 318.5mm、厚さ 17.4mm の大口径配管の場合、配管内面の残留応力を改善するには 123℃以上の温度差が必要となる。これに対して外径 27.2mm、厚さ 3.9mm の小口径配管の場合、115℃以上の温度差が必要となる。厚さが薄い小口径配管の場合でも残留応力を改善するのに必要な温度差は大きく変化しないため、定常状態の温度差を付与して残留応力を改善する場合、厚さが薄いほど大きな温度勾配が必要となる。具体的には、高出力の熱源と高効率の冷却方法が必要となる。

これに対してデルタ T 工法では、施工温度まで昇温した配管内面を冷却水で急冷することで過渡的な温度差を付与する。デルタ T 工法施工中の配管表面における温度と発生応力の推移を図 2 に示す。配管内面では急冷直後から温度が急速に低下するのに対して、配管外面では厚さ内の熱伝導に要する時間を経ってから温度が低下し始める。これにより急冷中の配管内外面には、過渡的に大きな温度差が生じる。配管内外面の温度差は冷却水の供給条件が同じ場合、配管温度を昇温することで増大できる。このため、厚さが薄い小口径配管でも施工温度の調整により残留応力の改善に必要な温度差を付与することができる。急冷中に発生する熱応力は、相対的に低温となる配管内面では熱膨張量の差により引張方向、配管外面では圧縮方向となる。施工中、配管内外面の温度差が十分に大きく、配管内面で発生する熱応力が配管材の降伏応力を超える場合、配管内面には引張方向の塑性変形が付与される。デルタ T 工法施工後に配管温度が均一となり、熱膨張量の差がなくなると、引張方向の塑性変形が大きくなる配管内面の残留応力は圧縮方向に改善される。

Fig. 1 Schematic of Delta-T Process

Fig. 2 Transition of temperature and stress at the surfaces of small diameter piping during application of Delta-T Process

3. デルタ T 工法施工模擬試験による残留応力低減効果および硬さ分布に及ぼす影響の検証

小口径配管突合せ溶接部へのデルタ T 工法施工模擬試験を行い、デルタ T 工法の適用による残留応力低減効果を検証した。さらに、配管の硬さに及ぼすデルタ T 工法の施工の影響を確認するために、配管断面の硬さ測定を行った。デルタ T 工法施工模擬試験および硬さ測定の詳細を以下に記す。

3・1 供試材および試験体

供試材には、原子炉廻りの高温配管として使用されているオーステナイト系ステンレス鋼（SUS316LTP）を使用した。供試材の化学成分を表 1 に、室温における機械的性質を表 2 に示す。なお、表中には日本工業規格で規定される SUS316LTP の要求値⁽¹¹⁾を示した。試験体には、50A 配管（公称外径 60.5mm、公称厚さ 5.5mm）と突合せ溶接式 90° ロングエルボ（公称曲率半径 76.2mm）で構成される配管系を使用した。配管とエルボは、TIG 溶接による突合せ溶接で接合し、溶接層数は 4 層とした。突合せ溶接部の断面形状を図 3 に示す。突合せ溶接部には管内面を合わせるために内面合わせ加工を施した。試験ループの構成を図 4 に示す。デルタ T 工法施工模擬試験の際には、給水ポンプで貯水タンク内の冷却水を一定流量で循環させた状態（Loop-1）から、三方弁を切替えることで試験体側に冷却水を供給（Loop-2）できる。なお、試験体溶接部の残留応力については W-R1～W-R5 の 5 箇所を測定し、硬さについては W-H1～W-H4 の 4 箇所を測定した。各溶接部に対するデルタ T 工法の施工回数を表 3 に示す。本研究ではデルタ T 工法の施工回数と残留応力低減効果および配管内面の硬さへの影響を明らかにするため、各溶接部に対するデルタ T 工法の施工回数を 0～5 回の範囲で変化させた。

Table 1 Chemical composition of test material

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
JIS G 3459 ⁽¹¹⁾	≤ 0.030	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.030	12.00 ~ 16.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00
Test material	0.011	0.48	1.70	0.025	0.003	12.66	17.38	2.25

(mass %)

Table 2 Mechanical properties of test material at R.T.

	Tensile strength (MPa)	0.2% Proof stress (MPa)	Elongation (%)
JIS G 3459 ⁽¹¹⁾	≥ 480	≥ 175	32
Test material	604	312	54

Table 3 Application number of Delta-T Process

Weld number	Application number of Delta-T Process	Remarks
W-R1	0	Measurement of residual stress
W-R2	1	
W-R3	1	
W-R4	2	
W-R5	5	
W-H1	0	Measurement of Vickers hardness
W-H2	0	
W-H3	1	
W-H4	5	

Fig. 3 Cross-section shape of butt welding zone

Fig. 4 Configuration of mock-up test loops

3・2 デルタ T 工法施工模擬試験方法および結果

デルタ T 工法の施工により配管内面の残留応力を圧縮方向に改善するには、施工中の配管内面で発生する熱応力が施工対象の降伏応力を超過することが必要となる。デルタ T 工法施工模擬試験で使用した試験体の場合、2 章と同様に 300℃のステンレス鋼管を想定して試算すると、突合せ溶接部近傍（外径 60.5mm、厚さ 4.95mm）の残留応力を改善するには、配管内外面に 140℃以上の温度差が必要となる。加熱面から液体への熱伝達は、液体の飽和温度より加熱面が高温の場合、液体のバルク温度が飽和温度より低い場合でもサブクール沸騰が発生し、熱伝達率が著しく増加する⁽¹²⁾。これにより加熱面の接液部は、接液直後に液体の飽和温度に近い温度となる。デルタ T 工法施工模擬試験では、大気圧の環境下で冷却水を供給するため水の飽和温度は約 100℃である。このため、施工温度が 240℃以上の場合には、デルタ T 工法の施工により配管内外面に 140℃以上の温度差を付与できると考えられる。上記を勘案し、本研究のデルタ T 工法施工模擬試験では、施工温度を 325℃と設定した。

デルタ T 工法施工模擬試験における突合せ溶接部近傍の加熱方法を図 5 に示す。突合せ溶接部近傍における配管およびエルボの外面にはクーパヒータと保温材を敷設し、325℃目標で加熱した。配管温度は、配管外面に 90° ピッチで貼り付けた 4 つの熱電対により測定した。デルタ T 工法の施工は、配管温度が 325℃に到達後、クーパヒータによる加熱を停止、試験ループの三方弁を切替えて冷却水を突合せ溶接部に供給することで実施した。デルタ T 工法の施工条件を表 4 に示す。試験ループへのデルタ T 工法の施工は合計 7 回実施した。表中には、

配管外面の各温度測定位置で測定した温度低下速度の平均値に加えて、各施工における貯水タンク内の冷却水温度および流速を示した。なお、配管外面の温度低下速度は、施工時間の経過とともに変化するため、本研究では各温度測定位置における温度低下速度の最大値に着目し、4点の平均値を表中に記載した。表中に示す“—”のシンボルは、デルタT工法を施工せずに冷却水の通水のみであることを示す。なお、1回目の施工では図4に示したW-R2～R4とW-H3を含む3つのエルボを同時に施工した。

本研究で実施したデルタT工法施工模擬試験では、各温度測定位置における温度低下速度は40.4℃/sから44.2℃/s（平均42.6℃/s）であった。管内を流れる流体との熱伝達では、冷却水の流れ状態や水温が冷却速度に影響する。本研究で実施したデルタT工法施工模擬試験では、試験ループ内の位置が施工対象毎に異なるため、冷却水の流れ状態も施工対象毎に異なる。さらに、1回目の施工では3つのエルボを同時に施工しているため、下流の施工位置では冷却水の温度が上昇する。しかしながら、各温度測定位置における温度低下速度は、平均値に対しておよそ±5%以内であり、施工対象毎の冷却速度に大差のない結果となった。本研究のデルタT工法施工模擬試験では、施工温度を冷却水の飽和温度よりも高い325℃と設定したことで、冷却水が配管内面に接液するとサブクール沸騰が発生すると考えられる。配管内面でサブクール沸騰が発生したことで熱伝達率が著しく増加した結果、冷却速度に及ぼす冷却水の流れ状態や水温の影響が相対的に低下したものと考えられる。

デルタT工法施工中の温度変化の例として、W-R2溶接部で測定した配管外面温度の履歴を図6に示す。グラフには90°ピッチ4つの位置で測定した配管外面温度の時間推移をプロットした。約325℃に加熱された配管の温度は、冷却水の供給開始直後から周方向のばらつきなく急速に低下した。なお、本研究では、厚さが薄い小口径配管では、溶接最終パス終端の手前に最大引張応力が、前方に最大圧縮応力が発生する⁽⁶⁾ことを鑑み、個々の溶接部における溶接終端位置を0°と定義した。

Fig. 5 Schematic of heating method at butt welding zone

Table 4 Conditions of Delta-T Process

Run number	Cooling water		Mean decrease rate of the temperature on the outer surface of piping (°C/s)								
	Flow velocity (m/s)	Temperature (°C)	W-R1	W-R2	W-R3	W-R4	W-R5	W-H1	W-H2	W-H3	W-H4
1	2.3	11.4	—	44.2	43.4	43.4	—	—	—	41.8	—
2	2.2	11.6	—	—	—	41.8	—	—	—	—	—
3	2.2	13.1	—	—	—	—	43.6	—	—	—	40.4
4	2.3	13.6	—	—	—	—	43.3	—	—	—	42.1
5	2.3	13.1	—	—	—	—	43.3	—	—	—	41.7
6	2.3	12.7	—	—	—	—	43.1	—	—	—	42.9
7	2.3	12.5	—	—	—	—	43.0	—	—	—	41.3
Application number of Delta-T Process			0	1	1	2	5	0	0	1	5

— : Only the flow of cooling water

Fig. 6 Temperature at the outer surface during Delta-T Process applying (W-R2)

3・3 残留応力測定方法および結果

突合せ溶接部近傍の残留応力測定には、ひずみゲージ切断開放法を適用した。具体的には、溶接部から配管外径の3倍に相当する181.5mm (W-R2のみ100mm) 離れた位置で配管を切断してから、溶接部近傍の配管内面に2軸5連のひずみゲージを貼り付けて初期値を測定した。その後ワイヤー放電切断によりひずみゲージの周囲を切断して開放ひずみを測定、測定した周方向の開放ひずみ ε_θ と軸方向の開放ひずみ ε_z から、配管内面に作用する周方向の残留応力 σ_θ と軸方向の残留応力 σ_z を評価した。なお、本研究で試験に使用したオーステナイト系ステンレス鋼製の50A配管突合せ溶接部の場合、溶接に伴う残留応力の影響範囲は溶接部近傍に限定され、溶接部から外径寸法(60.5mm)以上離れた位置では残留応力の絶対値が小さく、応力分布に大きな変化は見られない⁽⁶⁾。本研究では、初期ひずみの測定前に配管を切断しているが、溶接による残留応力への影響が見られない位置で切断しているため、残留応力測定結果への配管切断の影響は非常に小さい。

各溶接部の配管側における突合せ溶接部近傍の残留応力測定結果を図7から図10に示す。図7に示したように、デルタT工法の施工回数が0回(As Weld)のW-R1溶接部では、0°の位置で周軸方向ともに最大300MPaを超える引張残留応力が発生していた。これに対して、図8に示したデルタT工法の施工回数が1回のW-R2およびW-R3溶接部では、W-R2の0°の位置で50MPaに満たない軸方向の引張残留応力が残存したものの、他の角度については全て圧縮残留応力となった。さらに、図9および図10に示したように、デルタT工法の施工回数が2回のW-R4溶接部および施工回数が5回のW-R5溶接部では、全ての角度で圧縮残留応力となった。

Fig. 7 Residual stress distribution on the inner surface of W-R1 (As Weld)

Fig. 8 Residual stress distribution on the inner surfaces of W-R2 and W-R3 after application Delta-T Process

Fig. 9 Residual stress distribution on the inner surface of W-R4 after twice application Delta-T Process

Fig. 10 Residual stress distribution on the inner surface of W-R5 after fifth application Delta-T Process

デルタ T 工法の施工回数と残留応力改善効果について検討する。残留応力測定結果の最大値とデルタ T 工法施工回数の関係を図 11 に示す。溶接後 (As Weld) の小口径配管突合せ溶接部近傍内面に発生していた最大 300MPa を超える引張残留応力は、デルタ T 工法を 1 回施工することで平均値として圧縮残留応力に改善した。さらに、デルタ T 工法を 2 回以上施工することで、全ての角度が圧縮残留応力に改善した。1 回のデルタ T 工法施工では、局所的に高い引張残留応力となっている溶接最終パス終端近傍に引張残留応力が残存する可能性があるが、2 回以上の施工により、全ての角度で圧縮残留応力に改善できると考えられる。

Fig. 11 Effect of application number of Delta-T Process on maximum residual stress

3・4 硬さ測定方法および結果

デルタ T 工法の施工回数が 0 回 (As Weld) の W-H1 および W-H2 溶接部とデルタ T 工法の施工回数が 1 回の W-H3 溶接部、さらに、デルタ T 工法の施工回数が 5 回の W-H4 溶接部を対象に、小口径配管突合せ溶接部で引張残留応力が高くなる傾向を示す最終溶接パスの終端位置⁽⁶⁾ 近傍 (0° の位置) の硬さ分布を測定した。硬さ測定方法は JIS Z2244 ビッカース硬さ試験—試験方法⁽¹³⁾ に準拠し、試験荷重は 9.8N とした。硬さ測定箇所の概要を図 12 に示す。硬さ分布の測定範囲については、突合せ溶接部を中心とした長手方向配管断面 60mm の範囲とし、デルタ T 工法の適用で配管内面近傍が塑性変形していることを勘案して、配管内面近傍 (配管内面から約 0.5mm 位置) を硬さ測定箇所とした。なお、測定ピッチは 2mm 間隔とした。

配管内面近傍の硬さ測定結果を図 13 に示す。なお、測定位置が溶接金属となった硬さ測定結果については、ソリッドのシンボルとして区別した。各試験体における硬さの分布傾向については、共通して、溶接部および溶接

部近傍（溶接止端から約 10mm の範囲）が硬いこと、エルボ材に比べて配管材が硬いことが確認できる。溶接の影響で硬化していると考えられる溶接止端から約 10mm の範囲を除いた配管材の硬さ測定結果を対象に評価したデルタ T 工法施工回数と硬さの関係を図 14 に示す。デルタ T 工法施工回数の増加に伴い配管材の硬さ平均値は微増するものの、デルタ T 工法を 5 回繰返した場合でも増加量は 5.9Hv と小さい値であった。溶接部および溶接部近傍における硬さ測定結果の最大値は 184Hv（W-H3 溶接部近傍）であり、SUS316L で SCC 発生感受性を有する硬さの閾値として知られる 270Hv⁽³⁾⁽⁴⁾ に比べて十分に低い値である。このため、5 回程度の繰返し施工を仮定した場合でも、SCC 発生感受性に及ぼすデルタ T 工法施工の影響は非常に小さいと判断される。

Fig. 12 Schematic of measurement points of Vickers hardness

Fig. 13 Result of hardness measurements near the inner surface of piping

Fig. 14 Effect of application number of Delta-T Process on the hardness of piping

4. 結 論

小口径配管突合せ溶接部の SCC 発生抑制対策を目的に残留応力改善工法としてデルタ T 工法を開発し、公称外径 60.5mm、公称厚さ 5.5mm の小口径配管突合せ溶接継手を対象に施工温度 325℃のデルタ T 工法施工模擬試験を行い、残留応力測定による残留応力低減効果を確認した。さらに、デルタ T 工法を施工した配管の断面硬さ測定を行い、配管材の硬さに及ぼすデルタ T 工法施工の影響を確認した。本研究の結論を以下に示す。

- (1) 小口径配管突合せ溶接部近傍を大気中でヒータ加熱した後、配管内部に冷却水を供給して配管内外面に過渡的に大きな温度差を与えることにより発生する熱応力を利用して配管内面の引張残留応力を改善するデルタ T 工法を考案した。
- (2) デルタ T 工法施工模擬試験後の残留応力測定により、小口径配管突合せ溶接部（公称外径 60.5mm、公称厚さ 5.5mm）を施工対象とした今回の試験条件（施工温度 325℃）では、デルタ T 工法を施工することで配管内面の残留応力を圧縮方向に改善できること、さらに、2 回以上の施工により残留応力を圧縮化できることを示した。
- (3) デルタ T 工法施工模擬試験後の硬さ測定により、デルタ T 工法の施工回数の増加に伴い配管材の硬さ平均値は微増するものの、デルタ T 工法を 5 回繰返した場合でも増加量は 5.9Hv と軽微であることを示した。
- (4) デルタ T 工法を小口径配管突合せ溶接部に適用することで、配管内面の引張残留応力を圧縮残留応力に改善できることから、SCC の発生および進展を抑制する効果が期待できる。

文 献

- (1) Y. Okamura, A. Sakashita, T. Fukuda, H. Yamashita and T. Futami, “Latest SCC Issues of Core Shroud and Recirculation Piping in Japanese BWRs”, *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, WG01-1, (2003).
- (2) K. Takamori, S. Suzuki, S. Ooki, H. Yamashita, T. Futami, H. Anzai, T. Kato and M. Tsubota, “Effects of Surface Condition on SCC Initiation Susceptibility of L-grade Stainless Steels in High Temperature Water”, *Journal of High Pressure Institute of Japan*, Vol. 44, No.3, (2006), pp.8-20.
- (3) M. Tsubota, Y. Kanazawa and H. Inoue, “Effect of Cold Work on the SCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steels”, *Proceedings of 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System*, Vol.1, (1995), pp.519-527.
- (4) 日本原子力技術協会, “予防保全工法ガイドライン [研磨による応力改善工法]”, JANTI-VIP-10, (2009), p.7.
- (5) T. Shimizu and K. Enomoto, “Study on Integrity Improvement of Stainless Steel Pipe Welds in Nuclear Power Plant by Local Induction Heating Method”, *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 5, No.3, (1987), pp.49-55.
- (6) F. Iwamatsu, S. Aoike, Y. Fukuda and O. Saitou, “SCC test verification of effect of moving heat source on FEM evaluation for weld residual stress of butt-weld pipe”, *Proceedings of PVP2009*, PVP2009-77897, (2009).
- (7) 青池聡, 久恒眞一, “配管突合せ溶接部の残留応力改善手法の開発”, 日本機械学会 茨城講演会講演論文集, (2005), pp.23-24.
- (8) 青池聡, 岩松史則, 福田ゆか, 折谷尚彦, “小口径突合せ溶接配管に対する残留応力改善方法の開発(フリージング工法の適用による残留応力の改善)”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 779, (2011), pp.1144-1155.
- (9) 青池聡, 久恒眞一, 配管の残留応力改善方法及びその装置, 日本国特許第 4448791 号 (2010).
- (10) 日本機械学会編, 機械工学便覧 基礎編 A4 材料力学, 初版 (1984), p.74, 日本機械学会.
- (11) 日本規格協会, “配管用ステンレス鋼管”, JIS G 3459, (2004).
- (12) 日本機械学会編, 機械工学便覧 基礎編 応用編 A6 熱工学, 新版 (1987), pp.134-135, 日本機械学会.
- (13) 日本規格協会, “ビッカース硬さ試験—試験方法”, JIS Z 2244, (1998).