原子炉配管溶接部における残留応力の不確かさ評価に 基づく確率論的構造健全性評価*

勝山 仁哉**, 伊藤 裕人***, 飛田 徹***, 鬼沢 邦雄***

Probabilistic Structural Integrity Assessment Based on Uncertainty of Weld Residual Stress at the Piping Butt-Welds of Nuclear Reactor Components*

by KATSUYAMA Jinya**, ITOH Hiroto***, TOBITA Tohru*** and ONIZAWA Kunio***

Stress corrosion cracking (SCC), which affects the structural integrity of reactor component, has been observed at some piping joints made by austenitic stainless steel in BWR plants. It is well known that the SCC behavior is significantly scattered depending upon the various conditions such as materials, piping geometry, crack growth rate, weld residual stress, and so on. Since probabilistic fracture mechanics (PFM) analysis method treats such scatter and uncertainties in the structural integrity evaluation, it is, therefore, useful to apply the PFM analysis to the evaluation of the piping integrity. In JAEA, the PFM analysis code of PASCAL-SP for aged piping has been developed based on Monte Carlo method as described in our previous paper¹⁾. Among the conditions related to SCC behavior, weld residual stress near the welded joint is one of the most important factors to assess the structural integrity of piping because the tensile residual stress becomes a driving force of a SCC. Welding conditions such as heat input, welding speed and piping geometry affect weld residual stress distribution at the welded joint of piping. Effect of the welding conditions on the weld residual stress distribution has not yet been evaluated quantitatively. Hence, in this study, an effect of uncertainty of welding conditions, such as scatters of heat input and welding speed during welding, on weld residual stress at the piping butt-welds was evaluated using the simulation method by varying the welding conditions. Probabilistic fracture mechanics analysis using PASCAL-SP was also performed to evaluate the effect of uncertainty of weld residual stress on the break probability of piping. It was clarified that the break probability increased with increasing the uncertainties of residual stress.

Key Words: weld residual stress, stress corrosion cracking, structural integrity, probabilistic fracture mechanics, finite element method, thermo-elastic-plastic analysis

1. 緒 言

我が国のいくつかの軽水型原子力発電プラントでは30年を超える運転が行われており、更に40年を超える長期間の運転も検討されている。安全上重要な構造機器に対しては、経年劣化を考慮した上で健全性を確認し、安全の確保を図る必要がある。安全性の評価には確率論的手法が使用されるが、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する原子炉圧力容器や配管のように安全上重要な機器に対しても、健全性評価の技術的根拠として機器の破損確率を定量的に評価しておくことが必要であると考えられる。構造健全性評価においては、合理的に配管の漏えいや破断確率等を評価する手法として確率論的破壊力学（PFM）解析手法が近年用いられ、その有用性が示されている¹⁾。（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）では、重要構造機器の破損に関する合理的な評価を行う一環として、PFM解析に基づく確率論的構

造健全性評価技術の開発・整備を進めている。原子炉冷却材圧力バウンダリ配管溶接部を対象としては、PFM解析コードPASCAL-SP（PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR - Stress Corrosion Cracking at Welded Joints of Piping）を開発している²⁾。PASCAL-SPの開発にあたり、確率論的評価モデルに関する試験データ等の調査を行い、PFM解析に必要な評価モデルとして応力腐食割れ（SCC; Stress Corrosion Cracking）の発生及びその進展速度、供用期間中検査等に対する解析手法を整備している。オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部におけるSCCを対象とする場合、構造健全性評価においてはき裂の発生・成長を支配する材料・環境・力学因子の取り扱いが重要である。力学的観点からは、配管内表面及び肉厚内の残留応力分布がSCCの発生とその後の進展速度や方向に大きな影響を及ぼすため、これを精度よく評価する必要がある。ただし、残留応力は、溶接施工時の溶接条件や最終仕上げ等の不確かさに伴うばらつきを有しているため、残留応力の分布及びそのばらつきを把握することは、構造健全性評価の観点から重要な課題の1つである。そこで本研究では、PASCAL-SPにおいて使用する確率論的な溶接残留応力評価モデルを作成するため、配管突合せ溶接部を対象として、溶接施工時における入熱量や溶接速度等の溶接条件データを取得するとともに、取得したデータに基づき溶接条件を変化させ

*受付日 平成22年2月17日 受理日 平成22年5月25日 平成21年度溶接構造シンポジウムで発表

**正 員 （独）日本原子力研究開発機構 Member, Japan Atomic Energy Agency

*** （独）日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

た有限要素法（FEM）による熱弾塑性解析を実施し、それらの不確かさが溶接残留応力に及ぼす影響を評価した。また、作成した溶接残留応力評価モデルを PASCAL-SP に導入し、溶接残留応力に関わる不確かさが配管の破断確率に及ぼす影響に関する検討を行った。

2. 配管溶接部における残留応力評価及び構造健全性評価

2.1 配管溶接部試験体製作及び残留応力測定

溶接施工時において、同一の溶接条件を設定した場合における溶接条件の不確かさを把握するため、下向き自動 TIG 溶接により 10 体の 250 A sch80 管の突合せ溶接部試験体（5 層 8 パス）を製作した。製作した試験体の形状及び開先形状を Fig. 1 に示す。溶接部試験体の管材料及び溶接材料は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 である。また、

溶接条件として、入熱条件は 18 kJ/cm 以下、パス間温度は 150℃ 以下に設定した。溶接条件のばらつきを評価するため、すべての試験体製作時に、溶接施工中の電流、電圧及び溶接速度を測定した。また、伝熱解析の精度を検証するため、溶接部近傍の内表面及び外表面において、熱電対により温度履歴を測定した。さらに、熱弾塑性解析による溶接残留応力シミュレーションの精度を検証するため、X 線回折法及び応力解放法により、製作した配管溶接部試験体の内表面及び外表面における残留応力測定を行った。

2.2 残留応力解析

入熱量や溶接速度等の溶接条件の不確かさが残留応力分布に及ぼす影響について評価するため、2.1 で述べた配管溶接部試験体に対応した FEM 解析用のモデルを作成し、熱弾塑性解析による溶接シミュレーションを行った。ここで、

Fig. 1 Shapes of weld specimen and groove (Unit: mm).

Fig. 2 Three-dimensional and axisymmetric analytical models for butt welding of 250A piping.

溶接シミュレーションは、汎用 FEM 解析コード Abaqus³⁾を用いた非定常伝熱解析及び大変形非線形熱弾塑性解析から構成される。本研究において作成した三次元及び軸対称モデルの要素分割を Fig. 2 に示す。軸対称モデルは、三次元モデルの断面と同じ形状である。製作した試験体の溶接条件に合わせて、図に示すとおり 5 層 8 パスの溶接をモデル化した。Fig. 3 に示すような溶接熱源（二重楕円モデル (Goldak モデル)⁴⁾）を、溶接開始とともに 0° 位置から移動を開始させ、時間とともに周方向に移動させた後、開始点と同一位置にて停止させた。軸対称モデルでは、熱源を FEM モデルに対して垂直方向に通過させた。両モデルとも、溶接熱源の通過と同時に溶接金属となる要素を追加することにより、溶接金属の付着を模擬している。Fig. 3 の熱源形状パラメータは、溶融池の形状から自動的に決定できる。 a_f 及び a_r はそれぞれ熱源中心より前方及び後方の溶融池の長さに依存し、実際の熱源を考慮すると $a_f : a_r = 1 : 1.5 \sim 2$ 程度になる。 b 及び c は熱源の進行方向に垂直な楕円の長軸及び短軸に相当し、溶接部の断面をマクロ観察して得られた溶け込み形状により決定した。また、入熱量パラメータ ($Q = Q_f + Q_r$) は、本研究では電圧×電流に熱効率を乗じたものとして定義し、その平均値及び標準偏差は、断熱条件により伝熱解析から求められる入熱量が、実測により得られた入熱量 (入熱量 = (電圧×電流)/溶接速度) に等しくなるように、溶接パスごとに決定した。ここで、 $Q_f : Q_r = 2 : 1$ が常に成り立つものとした。これにより、実施工で生じる溶接条件の不確かさが溶接残留応力に及ぼす影響を評価可能となる。溶接後の冷却時間は、溶接部試験体を製作した際の温度履歴データに基づき決定した。材料物性値には、試験体材料であるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 のデータを使用し、すべての物性値 (伝熱解析に用いた熱伝導率、比熱及び密度、並びに熱弾塑性解析に用いたヤング率、降伏応力、加工硬化係数及び線膨張係数) について温度依存性を考慮した。なお、母材と溶接金属の材料物性は同じものとした。また、材料の溶融温度に関しては、 1400°C 以上となった要素の背応力及び塑性歪はゼロになるものとした。

溶接条件が残留応力に及ぼす影響を詳細に評価するため、まず溶接部試験体製作時に取得した溶接条件に基づく溶接残留応力解析を行い、三次元及び軸対称モデルにおける本

解析手法の妥当性を確認する。PFM 解析に用いる確率論的な残留応力評価モデルを作成するためには、溶接条件のばらつきに関する膨大なケースの解析を要する。このため、解析に長時間要する三次元モデルについては、数ケースの解析により、溶接条件の不確かさが残留応力のばらつきに及ぼす影響についての基本的な知見を得る。その結果を踏まえ、軸対称モデルを用いて効率的にパラメトリック解析を行い、PFM 解析に供する確率論的な残留応力評価モデルを構築する。溶接条件の不確かさについては、入熱パラメータと溶接速度に着目し、これら溶接条件の変化が溶接残留応力分布に及ぼす影響について評価する。ここで、入熱量パラメータ Q は、前述のとおり電圧×電流に熱効率を乗じたものであるため、溶接速度とは独立のパラメータとして取り扱う。

2.3 PFM 解析

PASCAL-SP は、配管の溶接残留応力分布とそのばらつきに加え、SCC の進展及び合体、地震荷重等を考慮して破損確率等を評価することが可能である。本研究では、前述の溶接残留応力解析結果を基に作成した残留応力評価モデルを PASCAL-SP に導入して、配管の破損確率に関する PFM 解析を実施した。SCC によるき裂進展や破断判定等は、原子力安全・保安院の報告書⁵⁾及び日本機械学会の維持規格⁶⁾に準拠している。Fig. 4 に PASCAL-SP における破損確率解析のフローチャートを示す。解析条件として幾何形状や運転荷重等を設定した後、SCC によるき裂進展・合体、供用期間中検査、地震荷重によるき裂進展等を模擬する。破断判定は破断クライテリアとして極限荷重評価法を用いた。破断や漏えいに至る確率は、各種の確率変数を乱数を用いてサンプリングし、プラントの長期運転を模擬して SCC のき裂進展解析と破断の可能性を判定するという一連の健全性評価を繰り返す、いわゆるモンテカルロ法によって評価する。

250 A 配管を対象として実施した PFM 解析の主な解析条件を Table 1 に示す。FEM 解析に基づく残留応力評価モデルを用いて残留応力の不確かさが破断確率に及ぼす影響について評価を行う。なお、本研究では、残留応力の不確かさに着目するため、Table 2 に記すパラメータにのみ確率分布を与え、その他の条件は一定値を与えた。

Fig. 3 Heat source model⁴⁾.

Fig. 4 Flowchart of probabilistic fracture mechanics analysis in PASCAL-SP.

Table 1 Analytical conditions of PFM analysis for 250A piping.

Piping Geometry	250A ($\phi 267.4$ mm, thickness 15.1 mm) (Type 316L)
Material	Type 316L stainless steel
Residual Stress Distribution	Probabilistic model described in 3.3
Crack Initiation	Pre-existing one crack (depth 0.7mm, length 15.5mm)
Crack Growth Rate by SCC	Based on the experimental data in the annex of JSME Rules on Fitness-for-Service
Mechanical failure Judgment	Net section collapse criteria in JSME Rules on Fitness-for-Service

Table 2 Probabilistic variables in PFM analyses by PASCAL-SP.

Category	Probabilistic Variable	Distribution
SCC	Crack Initiation Position at Inner Surface of Piping	Normal Distribution
	Crack Growth Rate	Log-normal Distribution
Stress	Through-thickness Distribution of Residual Stress	Normal Distribution
Material Property	Flow Stress	Weibull Distribution

Fig. 5 Average and standard deviation of welding conditions for each welding pass.

3. 結果及び考察

3.1 溶接条件の測定結果

溶接部試験体を製作した際に取得した入熱量と溶接速度の平均及びその標準偏差を Fig. 5 に示す。この図は、製作した10体の試験体に対して、パス間ごとの入熱量及び溶接速度のばらつきを示している。入熱量が大きいと溶接速度

が遅くなるなどの相関が見られる。解析では両者の影響を独立に評価するため、入熱量を単位時間で割った値からモデルに与える入熱量パラメータ Q を求めた。なお、1 パスの溶接を施す間、すなわち1パスごとの溶接開始から終了までの電流、電圧及び溶接速度の変動は、溶接試験体ごとのばらつきに比べて無視できるほど小さいことを別途確認している。溶接条件のばらつきは、配管口径、開先形状や

製造メーカー等により異なると考えられるため、今後データを拡張して取得する予定である。

3.2 残留応力解析結果

3.2.1 解析手法の妥当性検討

溶接条件の測定結果に基づく入熱量、溶接速度等の溶接条件を用いて実施した非定常伝熱解析から得られた温度履歴を実測値と比較して Fig. 6 に示す。ここで比較している温度は、溶接線中央から 15 mm 及び 25 mm の位置における外表面の値である。また図中の右上には、分かりやすさの

ためスケールを拡大した図も示している。三次元及び軸対称モデルを用いて求めた温度履歴は、最高到達温度及び冷却速度ともに実測値とほぼ一致している。この結果から、本研究で用いた伝熱解析は、溶接を十分な精度で再現できていることが確認できた。

この温度履歴を用いた熱弾塑性解析により求めた溶接残留応力の精度を確かめるため、配管内表面及び外表面を対象として、三次元及び軸対称モデルによる残留応力解析結果を実測値と比較して Fig. 7 に示す。残留応力の実測値は、内表面は応力解放法、外表面は応力解放法と X 線回折法に

Fig. 6 Temperature history recorded at the outer surface near the weld.

Fig. 7 Comparison between analytical results and X-ray diffraction and stress relief measurements in residual stress distribution at the inner and outer surfaces.

Fig. 8 Comparison of weld residual stress distributions near the welded zone between three dimensional and axisymmetric analyses.

より得られた結果である．三次元モデルの解析結果については，溶接始末端を 0° として， 90° ， 180° 及び 270° の位置における残留応力分布を示している．測定方法や測定精度等に伴う実測値のばらつきに比べて，実測値と三次元モデルによる解析結果の差は同等か，それよりも小さいと考えられることから，両者はよく一致していると言える．すなわち，溶接部近傍の周方向残留応力は，内表面及び外表面ともに引張応力である．また，軸方向残留応力は，内表面に引張応力，外表面に圧縮応力が発生しており，これらはよく知られる分布⁷⁻¹¹⁾と同様の分布である．また，三次元解析の結果において， 90° から 270° の範囲の残留応力は，ほぼ等しい値となっていることが分かる．さらに，この図を基に三次元モデルと軸対称モデルを比較すると，三次元モデルの 90° から 270° の範囲の解析結果と軸対称モデルによる解析結果は，要素の大きさの違いや，軸対称モデルにおいて面外変形を考慮していないことに伴う違いはあるものの，両者ともよく一致することが確認できた．

なお，三次元解析において，溶接始末端付近の残留応力分布は溶接定常部と明らかに異なり，溶接終端付近の 330° から 355° 付近に高い引張応力が発生し，溶接始端前方の 5° から 15° 付近に圧縮応力が発生していた．この結果は，Katsuyamaら¹²⁾やIwamatsuら¹³⁾による報告とも一致しており，本解析手法の妥当性及び精度は確かめられたと考えられる．

3.2.2 軸対称モデルによる板厚内残留応力分布

軸対称モデルによる解析の妥当性について，板厚内の残留応力を三次元モデルの結果と比較することにより検討する．三次元モデルと同じ溶接条件で解析した場合の溶接部

Fig. 9 Comparison of through-thickness distributions of residual stress at the weld center between three dimensional and axisymmetric analyses.

(a) Inner surface

(b) Outer surface

Fig. 10 Effect of heat input of last welding pass on weld residual stress at the inner and outer surfaces.

近傍の周方向及び軸方向の残留応力分布を Fig. 8 に示す。また、溶接線中央断面における内表面から外表面への応力分布を Fig. 9 に示す。これらの図から明らかなように、同一の溶接条件による三次元モデルと軸対称モデルによる解析結果を比較すると、溶接残留応力分布の傾向はよく一致している。残留応力の値について詳細に比較すると、両者はほぼ一致するものの、場所によっては 50 MPa 程度の差が見られる。文献14において、両者で求められた残留応力分布を用いて SCC 進展解析を行った場合、軸対称モデルによる SCC 進展速度は、三次元モデルと同等か、あるいは速いため、保守的に評価可能であることが示されている。したがって、軸対称モデルによる溶接残留応力シミュレーションは、溶接条件に関するパラメトリック解析を通して、溶接残留応力評価モデルの作成に有用である。

3.2.3 溶接条件が残留応力に及ぼす影響

溶接条件のばらつきが残留応力分布に及ぼす影響を把握するため、軸対称モデルを用いて、試験体製作時に取得した溶接条件（入熱量及び溶接速度）を基に、溶接条件を変

(a) Weld center

(b) Cross section at the maximum stress, $\sigma_z^{\max}$

Fig. 11 Effect of heat input of last welding pass on through-thickness distribution of axial residual stress at the weld center and cross sections at maximum axial stress.

化させて 108 ケースのパラメトリック解析を行った。ここで、オーステナイト系ステンレス鋼管突合せ溶接部において顕在化している SCC のほとんどは周方向き裂であり、軸方向応力がその発生及び進展に影響を及ぼすため、以降は軸方向応力に着目して解析結果を述べる。なお、1 パス目（初層）の溶接条件を変化させた場合、溶融池の溶け込み深さ、塑性歪分布や内表面の半径方向の収縮変形は多少異なるものの、最終的な残留応力分布はほとんど変化しなかった。このため、250 A 配管のような比較的薄肉の配管においては、初層における溶接条件変化の影響は、2 パス目以降の溶接により低減し、ほとんど残らないことが確認できた。最終パスの 8 パス目における入熱量を変化させた場合の内外面の溶接残留応力分布を Fig. 10 に示す。ここで、8 パス目以外に入熱量と溶接速度は平均値で固定している。入熱量が増加するほど、引張応力が生じる領域が広くなるとともに、内表面における軸方向の引張応力は増加し、外表面の圧縮応力も増加する。同様に板厚内の溶接残留応力分布を Fig. 11 に示す。同図の (a) は溶接中央断面、及び (b) は

Fig. 12 Effect of welding speed of last welding pass on weld residual stress at the inner and outer surfaces.

内表面において軸方向応力が最大 ($\sigma_z^{\max}$ と称する) となる断面の軸方向応力分布を示している。溶接金属の余盛や溶接変形のため肉厚の違いが見られるものの、両断面とも、内表面付近の引張応力は入熱量が増加するとともに増加し、外表面付近の圧縮応力も増加することが分かる。

一方、溶接速度の影響について、8 パス目の溶接速度のみを変化させて解析を行った場合の、内外表面における残留応力分布及び断面内の軸方向応力分布をそれぞれ Fig. 12 及び Fig. 13 に示す。これらの図から明らかなように、溶接速度が速くなるに従い、引張応力が生じる領域が狭くなるとともに、内表面付近の引張応力が減少し、外表面付近の圧縮応力も減少する。なお、軸対称モデルの場合、全周にわたって溶接による入熱が同時に与えられることとなるが、三次元モデルにより溶接熱源の移動を考慮した解析を行った場合でも、同様の結果が得られた。すなわち、溶接速度の影響は、入熱量のそれとほぼ反比例の関係にあることが確認された。これは、溶接速度が速くなるほど単位時間当たりの入熱量が減少するためと考えられる。

Fig. 13 Effect of welding speed of last welding pass on through-thickness distribution of axial residual stress at the weld center and cross section at maximum axial stress.

以上の知見を踏まえ、溶接パスごとに溶接条件を変化させたパラメトリック解析の結果を取りまとめてデータベースを作成した。データベースには、各位置における残留応力のばらつきが正規分布に従うと仮定して統計処理により求めた各位置の残留応力の平均値、標準偏差、及び近隣座標同士の相関係数を格納した。

3.3 PFM 解析結果

PFM 解析において用いる溶接残留応力分布は、前節で作成したデータベースから次のように決定する。まず、各位置の残留応力を、近隣座標の相関を加味した正規分布に従うと仮定して、ある値に決定する。次に、決定した各位置の残留応力を用いて、板厚方向の分布を最小自乗法により 4 次多項式に近似する。この 4 次多項式は、SCC 進展評価の際に影響関数法により応力拡大係数を算出するためのものである。このようにデータベースから 4 次多項式の残留応力分布を求める手続きを、乱数を発生させて何度も繰り返すことにより、確率論的に残留応力分布のばらつきを模

Fig. 14 Simulated residual stress distribution and the scatter of residual stress at the cross section of 1.63 mm away from fusion boundary where the SCCs were observed most frequently⁵⁾.

Fig. 15 PFM analysis results for the effect of uncertainties in residual stress distribution on break probabilities of piping.

擬することとした。

SCCの実測データ³⁾に基づき、き裂発生確率が最も高い断面を求め、その断面における残留応力分布のばらつきを模擬した例をFig. 14に示す。図中のエラーバーはパラメトリック解析の結果から得られた各位置の標準偏差である。この図から分かるように、溶接残留応力のばらつきは位置ごとに異なり、本研究で対象とした250 A配管溶接部では、内表面の標準偏差が大きくなる一方、板厚内の標準偏差は小さい傾向が見られた。溶接条件のばらつきが変化する場合、この標準偏差に及ぼす影響も位置ごとに異なると考えられるが、本研究では基本的な影響確認を行うため、すべての位置の標準偏差を2倍、3倍と変化させてPFM解析を行い、溶接残留応力分布のばらつきが破断確率に及ぼす影響を評価した。得られた破断確率の解析結果をFig. 15に示す。残留応力のばらつきが大きくなるほど、配管が破断に至る確率は増加している。特に、運転年数が短く、破断確率の低い場合にそのばらつきの影響が大きいことが分かる。これは、残留応力のばらつきが大きくなるほど、進展速度

が速く、破断に至りやすいSCCが多く現れてくるためであると考えられる。文献14における決定論的評価においても、入熱量が大きくなるほど、あるいは溶接速度が遅くなるほど、内表面及び板厚内における軸方向の引張応力が増加することにより、配管が破断に至る時間が短縮されることが示されている。Fig. 15に示した破断確率の変化は、残留応力のばらつきが大きくなることにより、この傾向が顕著に現れているものと考えられる。

4. 結 言

- (1) 配管溶接部試験体(SUS316 250 A sch 80 管)を10体製作し、入熱量や溶接条件等の溶接条件のばらつきを把握するとともに、各試験体の残留応力分布を実測により評価した。
- (2) 配管溶接部試験体に対して三次元及び軸対称モデルによる溶接シミュレーションを行い、実測値と比較することにより解析手法の妥当性を確認した。また、溶接残留応力分布のばらつき評価に関して、軸対称モデルによる溶接残留応力解析が有用であることを確認した。
- (3) 溶接条件を変化させた解析により、溶接残留応力に及ぼす入熱量及び溶接速度の影響を評価した。その結果、今回対象とした250 A配管のように比較的薄肉の配管では、最終溶接パスの溶接条件が残留応力分布に及ぼす影響が大きいことを示した。
- (4) 軸対称モデルによるパラメトリック解析の結果に基づく残留応力評価モデルを用いてPFM解析を実施し、残留応力のばらつきが大きくなるほど、配管が破断に至る確率は増加することを定量的に示した。

謝 辞

本報告は、平成18年度及び平成19年度に(独)日本原子力研究開発機構が経済産業省原子力安全・保安院から「確率論的構造健全性評価調査」として受託した事業における成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) G. Yagawa, Y. Kanto, S. Yoshimura, et al.: "Probabilistic Fracture Mechanics Analysis of Nuclear Structural Components: A Review of Recent Japanese Activities," Nuclear Engineering and Design, 207 (2001), pp. 269-286.
- 2) H. Itoh, J. Katsuyama and K. Onizawa: "A Probabilistic Evaluation Model for Welding Residual Stress Distribution at Piping Joint in Probabilistic Fracture Mechanics Analysis," Proceedings of the 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Chicago, U.S.A., PVP2008-61421 (2008).
- 3) Dassault Systemes Simulia Corp.: ABAQUS user's manual, version 6.7 (2007).
- 4) J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby: "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," Metallurgical Transactions B, 15B (1984), pp. 299-305.

- 5) Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA): "Report on Evaluation Method for Structural Integrity of Primary Loop Recirculation System," (2004). (in Japanese)
- 6) Japan Society of Mechanical Engineers (JSME): "Codes for Nuclear Power Generation Facilities - Rules on Fitness-for-Service for Nuclear Power Plants -," JSME S NA1-2004, (2004). (in Japanese)
- 7) E. F. Rybicki, P. A. McGuire, E. Merrick and J. Wert: "The Effect of Pipe Thickness on Residual Stresses due to Girth Welds," Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 104 (1982), pp. 204-209.
- 8) S. Fricke, E. Keim and J. Schmidt: "Numerical Weld Modeling - A Method for Calculating Weld Induced Residual Stresses," Nuclear Engineering and Design 206 (2001) pp. 139-150.
- 9) R. Bradford: "Through-thickness Distributions of Welding Residual Stresses in Austenitic Stainless Steel Cylindrical Butt Welds," Proceedings of Residual Stresses-ICRS (2000).
- 10) J. Katsuyama, M. Mochizuki, R. Higuchi and M. Toyoda: "Parametric FEM Evaluation of Residual Stress by Circumferential Welding for Austenitic Stainless Steel," Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2005-71440 (2005).
- 11) M. Mochizuki, J. Katsuyama and M. Toyoda: "Effect of Geometrical and Welding Conditions on Through-Thickness Residual Stress," Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2006-ICPVT11-93489 (2006).
- 12) J. Katsuyama, M. Mochizuki, R. Higuchi and M. Toyoda: "Numerical Analysis of Residual Stress at Unsteady Region of Piping Butt-Welding and Repair-Welding," Proceedings of Japan Welding Society, Vol. 77 (2005), pp. 446-467.
- 13) F. Iwamatsu, S. Aoike, Y. Fukuta 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 the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2009-77897 (2009).
- 14) J. Katsuyama, T. Tobita, H. Itoh and K. Onizawa: "Effect of Welding Conditions on Residual Stress and SCC Behavior at Butt-Welding Joints of Recirculation Pipes," Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2008-61430 (2008).