



配管系の弾塑性解析手法の検討(その2)

Investigation on Method of Elasto-Plastic Analysis for Piping System (No.2)

MHI NS エンジ	小島 信之	Nobuyuki KOJIMA	Non-Member
MHI NS エンジ	蒲谷 拓郎	Takuro KABAYA	Non-Member
MHI NS エンジ	荒井 雅史	Masashi ARAI	Non-Member
MHI NS エンジ	廣内 悟	Satoru HIROUCHI	Non-Member
MHI NS エンジ	板東 雅嗣	Masatsugu BANDO	Non-Member

This report describes an elasto-plastic analysis method which can be applied for the actual aseismic design of nuclear stainless steel piping systems. This analysis method follows the one developed by the related JSME tasks. Two models have been examined in this study. For the model 1, an elbow is inserted in, the calculated maximum strain range agreed well with the test result and showed a small conservativeness, when the elasto-plastic characteristics proposed by the draft code case of JSME were used as the material data. However, for the model 2, a tee is inserted in, the maximum strain range calculated with the same material data as for the model 1 showed non conservative results comparing with the test results. It is thought that the cause of the underestimate in the model 2 has the large thickness of an analysis model, and the tee cannot be modeled in sufficient accuracy.

Although there is the subject of modeling of a tee, if the form of the piping element can be modeled with sufficient accuracy, it seems that this analysis technology is applicable also to seismic integrity assessment for the preservation after an earthquake since this elasto-plastic analysis method can grasp the elasto-plastic behavior of austenitic stainless steel piping analytically.

In addition, this paper is based on the content announced at the 15th academic lecture meetings [1].

Keywords: elasto-plastic analysis method, austenitic stainless steel piping, strain range, elbow, tee

1. 緒言

日本では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震以降、耐震設計地震動のレベルが増加し、耐震設計に弾塑性挙動を導入する動きが出てきた。このような背景から、日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 耐震許容応力検討タスクフェーズ2において、ベンチマーク解析による配管系の弾塑性解析手法の検討が2014年から2018年まで実施された。

この論文は、このベンチマーク解析において実施した解析結果、及び日本機械学会で策定した弾塑性解析手法[2][3]についてまとめたものである。

従来の配管の弾塑性解析の研究[4]~[6]は、試験結果の再現性を目的に、材料試験結果および形状計測結果に基づいて解析的な検討が行なわれてきたが、これらの手法は、材料試験データの実力値を用いた解析なので、設計規格の値は使用されていない。

そこで、本検討では、実設計への適用を考慮し、極力規格・基準に規定された数値を使用し、安全側な評価が導き出せる配管系の弾塑性解析手法を検討した。検討はステンレス鋼配管を対象として実施した。

2. 解析対象試験

本検討における解析は、ステンレス配管系の耐震安全性に関する検討の中で実施されたエルボを含む配管系及びティを含む配管系の振動試験[7][8]を対象としている。これらの試験はJAEAにて実施されたものである。二つの振動試験体形状をFig. 1、Fig. 2に示す。試験体1はエルボと直管から構成されており、試験体2はティと直管から構成されている。試験体1と2の仕様を表1と2にそれぞれ示す。

これらの振動試験は、共振によってエルボ部及びティ部を破損させることを目的として実施された。使用した地震動をFig. 3、Fig. 4に示す。

本検討では、実設計への適用を考慮し、極力規格・基準に規定された数値を使用し、安全側な評価が導き出せるよう検討した。

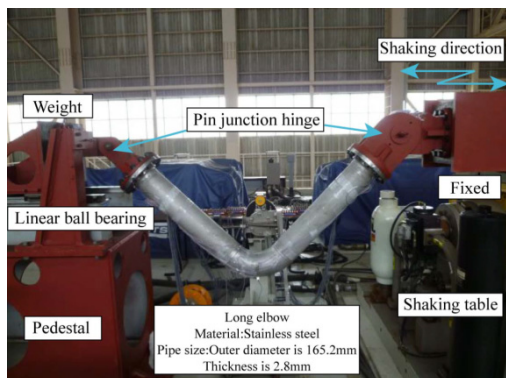


Fig. 1 Piping model 1

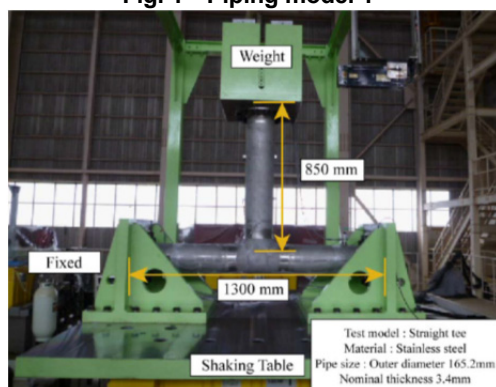


Fig. 2 Piping model 2

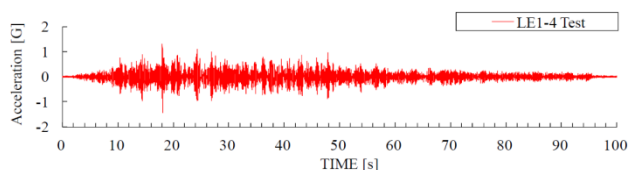


Fig. 3 Seismic wave for model 1

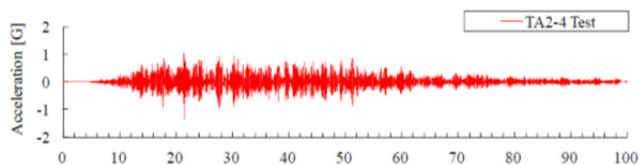


Fig. 4 Seismic wave for model 2

Table 1 Specification of model 1

	Elbow	Straight pipe
Material	SUS304TP (Austenitic stainless steel)	
Size	150A sch5S	
Temperature	20°C	
Internal Pressure	None	
Density	7.93 g/cm ³	

Table 2 Specification of model 2

	Tee	Run pipe	Branch pipe
Material	SUS304TP (Austenitic stainless steel)		
Size	150A sch10S 165.2 mm, 3.4 mm	150A sch20S 165.2 mm, 5.0 mm	150A sch10S 165.2 mm, 3.4 mm
Temperature	20°C		
Internal Pressure	22 kPa		
Density	7.93 g/cm ³		

3. 評価手順

配管の弾塑性解析評価は Fig. 5 に示すように 3 ステップで実行されるが、ステンレス鋼配管においては、炭素鋼配管のように数多くの破壊試験の実施例がないため、疲労曲線の合理化検討が進んでいない。そのため、ステンレス鋼配管の評価は、Step 2 までとした。各ステップの詳細は以降の章に示す。

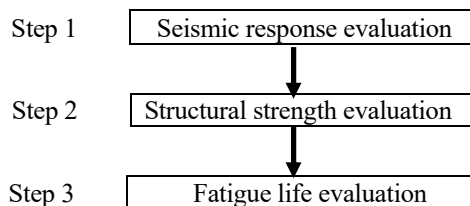


Fig.5 Evaluation flow

4. 地震応答解析

4.1 固有値解析

地震応答解析では、試験体 1 と 2 は、シェル要素でモデル化した。各々のモデル図を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。

解析には、Abaqus6-13-1 を用いた。また、試験体 1 と試験体 2 に使用した要素は、S4R (4 節点一次低減積分要素) である。このモデルの弾性域での固有振動数を算出し、試験結果と比較した。固有振動数の比較を Table 3 及び Table 4 に示す。Table 3 より、試験体 1 は解析結果と試験結果の固有振動数は概ね一致するが、試験体 2 においては試験結果の固有振動数を大きく下回った。この原因は、試験体 1 では試験体の公称肉厚とほぼ同じであったが、試験体 2 では試験体の形状データから試験体の肉厚が公称肉厚より約 40%程度大きいためである。そこで、ティ部の肉厚を 40%厚くした結果、Table 4 のとおり固有振動数は概ね一致した。

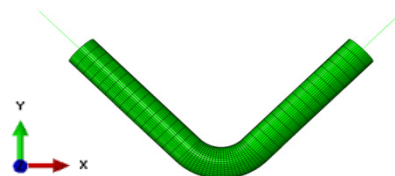


Fig. 6 Analysis model for piping model 1

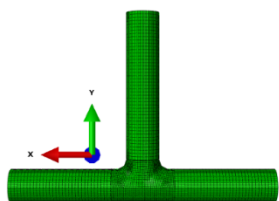


Fig. 7 Analysis model for piping model 2

Table 3 Eigen value comparison of test and analysis

	1 st eigen value	
	model 1	model 2
Analysis	5.9	6.8
Test	5.8	8.1

Table 4 Eigen value comparison of test and reanalysis when adjusting thickness of tee

	1 st eigen value
	model 2
Analysis	8.0
Test	8.1

4.2 弾塑性解析

4.2.1 試験体 1 (エルボ部) に対する弾塑性解析

弾塑性解析を実施するために材料特性として、次の3ケースを検討した。

Case-1: JSME の事例規格案[3]に基づき 2 直線近似で設定したケース (想定ひずみの最大値を 2%として設定)

Case-2: 降伏点を設計降伏点の 1.2 倍とし、二次勾配を縦弾性係数の 1/100 として 2 直線近似したケース

Case-3: Case-2 の二次勾配を縦弾性係数の 1/70 として 2 直線近似したケース

各ケースの諸元を Table 5 に、弾塑性特性の違いを Fig. 8 に示す。また、実設計への適用を考慮し、設計降伏点と縦弾性係数は JSME 材料規格[9]を用いている。

JSME 事例規格案に基づく 2 直線近似の方法の概略を次に示す。

- ・まずは、考慮する最大ひずみ ϵ_{max}^P を設定、
- ・塑性部分の勾配は、Fig. 9 に示すように ϵ_{max}^P の半分のひずみに対応する M 点における公称応力・公称ひずみ曲線の直線の傾きによって定義、
- ・この時、赤色の部分の面積と青色の部分の面積が等しくなるように直線 AB を調整。

Table 5 Material properties and hardening rule of elasto-plastic analyses

	Case-1	Case-2	Case-3
Stress-strain curve	Bi-linear		
Hardening rule	Kinematic hardening rule		
Modulus of elasticity (MPa)	195000	195000	195000
Second Gradient (MPa)	2922	1950 (1/100 of young's modulus)	2786(1/70 of young's modulus)
Yield point (MPa)	252	246 (1.2Sy)	246 (1.2Sy)
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3
Damping	Rayleigh damping (0.5%)		

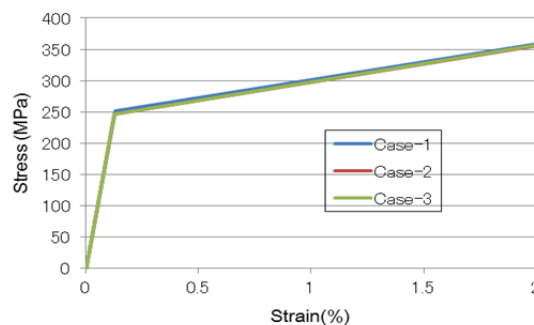


Fig. 8 Stress-strain curves in every case

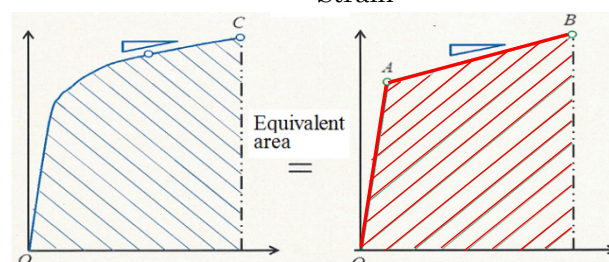
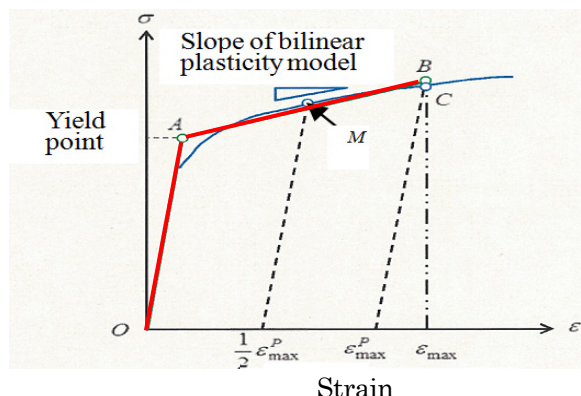


Fig. 9 Outline of bilinear plasticity model proposed by the draft code case of JSME

地震応答解析は、直接積分法 (Newmark β 法) により積分時間 1ms で実施した。各ケースの周方向の相当塑性ひずみの分布を Fig. 10 に示す。試験体に設置されたひずみゲージの位置 (LE1-4: 軸角度 45°、周角度 90°) での周方向 (Y 方向) ひずみの時刻歴

波形を Fig. 11 に示す。また、各ケースの周方向の最大ひずみを Table 6 に示す。

Fig. 10 から各ケースとも最大ひずみの発生箇所は試験結果と同じ位置であることが分かる。また、Fig. 11 及び Table 6 より各ケースとも弾塑性解析のひずみ時刻歴波形及び最大ひずみは、概ね試験結果を再現できた。また、降伏点と第 2 勾配を変化させて実施した弾塑性解析の最大ひずみも同程度であった。これらの結果より、ステンレス鋼の弾塑性解析においても、炭素鋼と同じ弾塑性特性（設計降伏点の 1.2 倍、第 2 剛性はヤング率の 1/100）を用いれば、概ね弾塑性挙動を把握することが可能と考えられる。この弾塑性特性の設定の方法は、事例規格案の方法に比べて簡便なのが特徴であり、有望な設定方法と考えられる。

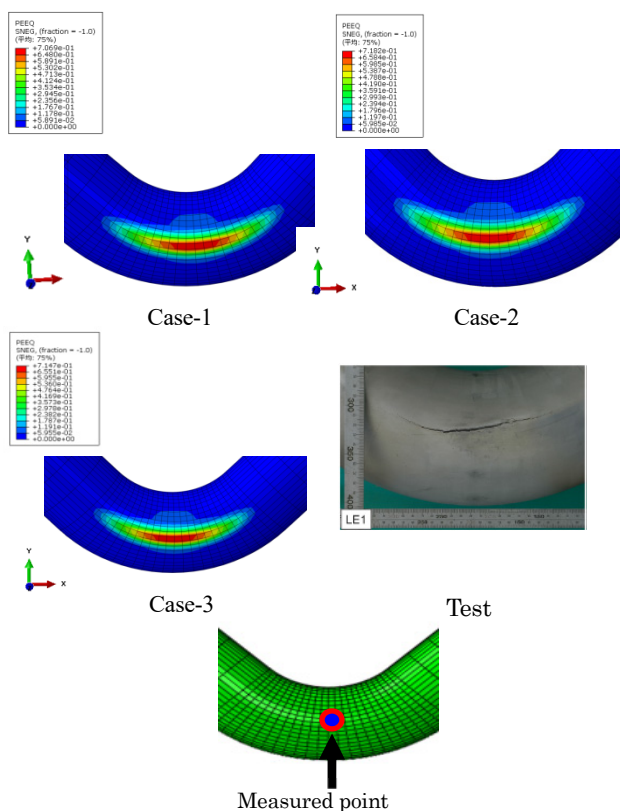


Fig. 10 Equivalent plastic strain in every case

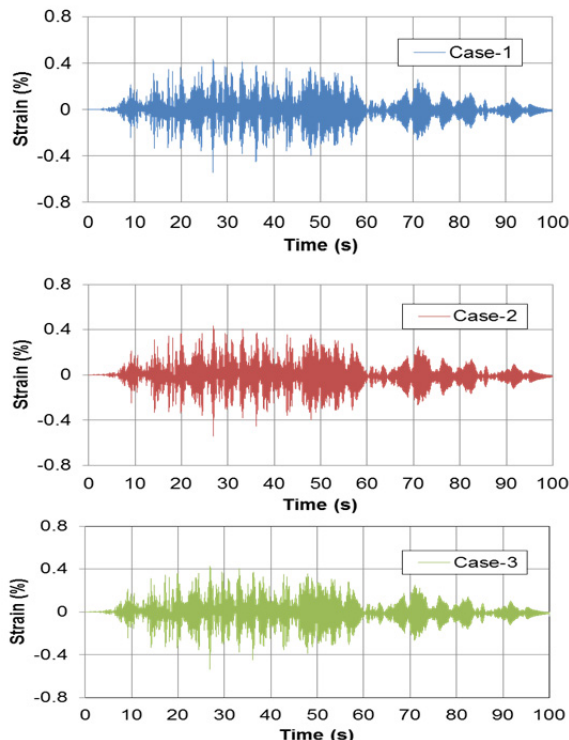
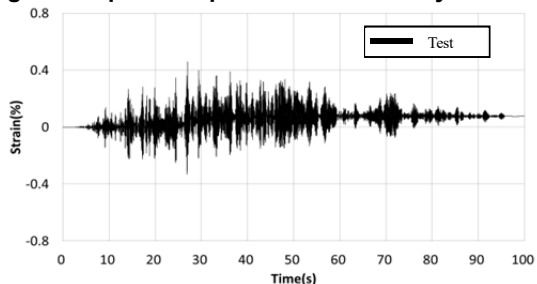


Fig. 11 Strain history of result and analysis

Table 6 Maximum strain in each case

	Test	Case-1	Case-2	Case-3
Maximum strain	0.459	0.543	0.541	0.539
Time(sec)	27.020	26.932	26.932	26.932

4.2.2 試験体2 (ティ部) に対する弾塑性解析

弾塑性解析を実施するために材料特性として、試験体 1 と同様に、次の 2 ケースを検討した。

Case-4 : Case-1 と同様

Case-5 : Case-2 と同様

地震応答解析の結果、各ケースの相当塑性ひずみの分布を Fig. 12 に、ティ分岐部のひずみの時刻歴波形を Fig. 13 に示す。また、各ケースの最大ひずみを Table 7 に示す。

Fig. 12 から各ケースとも最大ひずみの発生箇所は試験で亀裂が発生した箇所とほぼ同じ位置であることが分かる。また、Fig. 13 及び Table 7 より各ケースとも弾塑性解析のひずみ時刻歴波形及び最大ひずみは、試験結果に比べて過小評価であった。この原因は、固有振動数を試験結果の固有振動数に合わせるために、ティ部の肉厚を一樣に増加させたため、試験において最大ひずみが発生した部位の実際の肉厚に比べて、解析モデルの方が厚く、肉厚を精度よくモデル化できていないためと考えられる。ティ部のモデル化の精度を高める必要があるが、どのような方法で精度を上げるかは、今後の課題である。

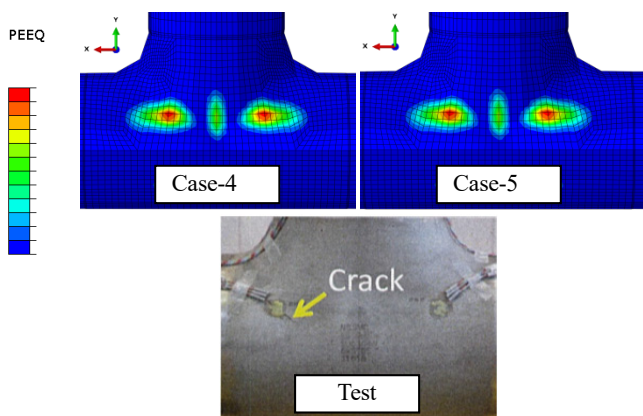


Fig. 12 Equivalent plastic strain in each case

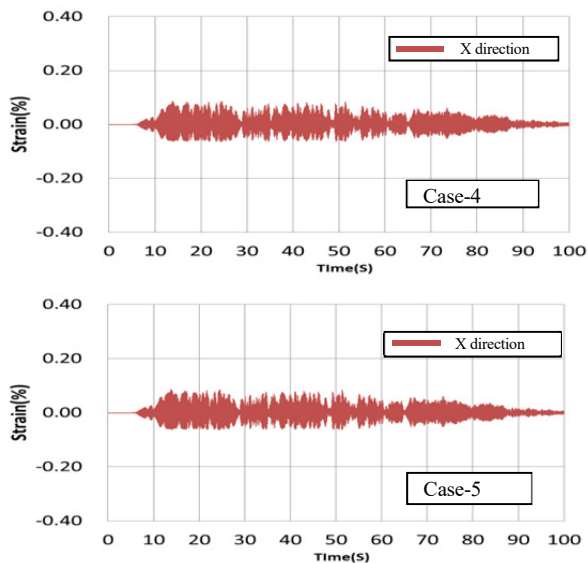


Fig. 13 Strain history of result and analysis

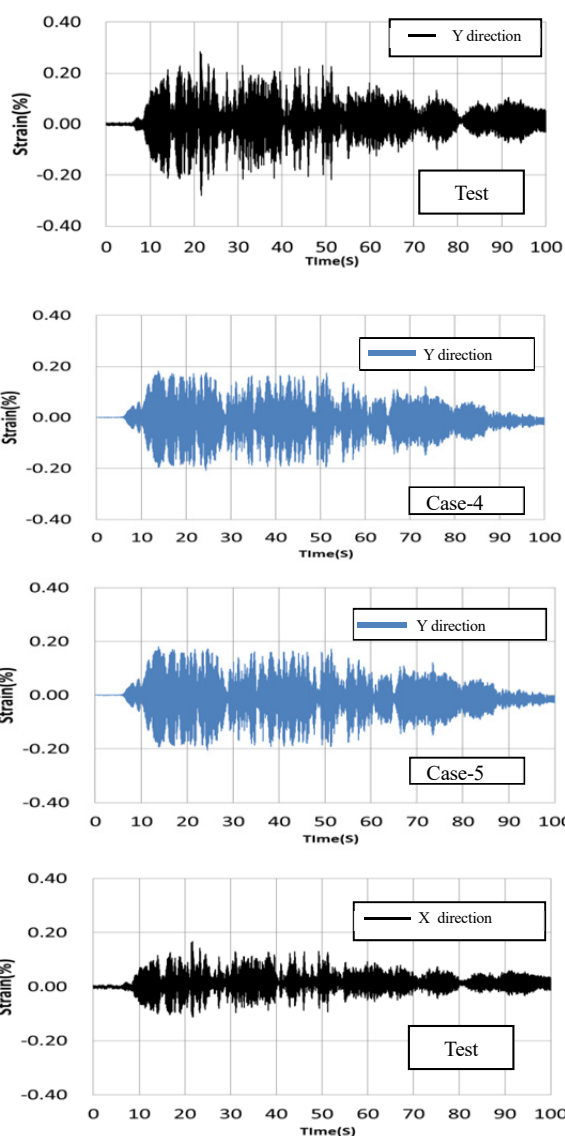


Table 7 Maximum strain in each case

Maximum strain	Test	Case-4	Case-5
Y direction	0.285%	0.208%	0.205%
Time (sec)	21.464	24.480	24.480
X direction	0.168%	0.087%	0.087%
Time (sec)	21.728	13.852	13.852

5. 結言

日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 耐震許容応力検討タスクで策定した配管系の弾塑性解析評価手法は、同タスク フェーズ2で実施したベンチマーク解析による検討により、配管要素の形状を精度良くモデル化出来れば精度良く損傷部位を評価できることが確認された。また、ステンレス鋼の弾塑性解析においても、炭素鋼と同じ弾塑性特性（設計降伏点の1.2倍、第2剛性はヤング率の1/100）を用いれば、概ね弾塑性挙動を把握することが可能であることを確認した。この弾塑性特性の設定の方法は、事例規格案の方法に比べて簡便なのが特徴であり、有望な設定方法と考えられる。今後の課題としては、ティ部のモデル化の精度を高める必要がある。

最後に、本検討(その2)ではステンレス鋼配管、(その1)では炭素鋼配管を対象として弾塑性解析手法を検討したが、今後、配管系に経年変化を想定した場合の耐震安全性評価や、地震後の予防保全にも適用できると期待される。

参考文献

- [1] 板東 雅嗣, 小島 信之, 蒲谷 拓郎, 荒井 雅史, 廣内 悟, 配管系の弾塑性解析手法の検討 (その 2), 日本保全学会 第15回学術講演会 要旨集, P232-236 (2018).
- [2] M. Morishita, A. Otani, T. Watakabe, T. Shibutani and M. Shiratori, “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis PART 1- A Code case for Piping Seismic Evaluation Based on Detailed Inelastic Response Analysis”, PVP2017-65166 (2017).
- [3] A. Otani, T. Shibutani M. Morishita, I. Nakamura, T. Watakabe, and M. Shiratori, “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis PART 2- A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis”, PVP2017-65190 (2017).
- [4] Y. Namita, K. Suzuki, H. Abe, I. Ichihashi, M. Shiratori, K. Tai, K. Iwata and A. Nebu, “Seismic Proving Test of Eroded Piping (Status of Eroded Piping Component and System Test)”, PVP2003-2097, PVP-Vol. 466 (2003).
- [5] S. Tsunoi, A. Mikami, I. Nakamura, A. Otani, M. Shiratori, “Comparison of Failure Modes of Piping Systems with Wall Thinning Subjected to In-plane, Out-of-plane and Mixed Mode Bending under Seismic Load - Computational Approach”, PVP2007-26476 (2007).
- [6] I. Nakamura, A. Otani, M. Shiratori, “Comparison of Failure Modes of Piping Systems with Wall Thinning Subjected to In-plane, Out-of-plane and Mixed Mode Bending under Seismic Load - An Experimental Approach”, PVP2007-26497 (2007).
- [7] T. Watakabe, K. Tsukimori, S. Kitamura, M. Morishita, “Ultimate Strength of a Thin Wall Elbow for Sodium Cooled Fast Reactors Under Seismic Loads,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.138, APRIL 2016.
- [8] T. Watakabe, K. Tsukimori, A. Otani, M. Moriizumi, N. Kaneko, “Study on Strength of Thin-walled Tee Pipe for Fast Breeder Reactors under Seismic Loading”, PVP2014-28619 (2014).
- [9] 日本機械学会：発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S NJ1-2012) , 2012年
(2019年3月29日受理、2019年10月3日採択)