

LDIによる局部減肉を考慮した配管系の耐震安全性評価（その3） —配管試験による耐震性への影響の把握—

Seismic safety evaluation of piping systems with locally wall thinning by LDI (Part3)
-Seismic performance effects of elbow pipes by loading tests-

電力中央研究所	酒井 理哉	Michiya SAKAI	Non Member
電力中央研究所	松浦 真一	Shinichi MATSUURA	Non Member
電力中央研究所	森田 良	Ryo MORITA	Non Member
電力中央研究所	稲田 文夫	Fumio INADA	Non Member
中部電力	尾西 重信	Shigenobu ONISHI	Member
中部電力	釘本 三男	Mitsuo KUGIMOTO	Member

In order to evaluate seismic safety of piping systems with locally wall thinning by LDI, hybrid tests have been conducted incorporating a numerical analysis of whole system with a loading test of elbow model. Seismic performance effects of wall thinning elbow were clarified by comparing three cases of different thickness elbow models such as no defect, 50% thinning and 75% thinning. By these results, the almost same hystereses of the non-linear load displacement relations were obtained and the damages of elbow specimen were not found out by penetrate tests. The static finite element analyses under cyclic loadings were also carried out to consider above results.

Keywords: Liquid Droplet Impingement Erosion (LDI), Wall Thinning, Seismic Evaluation, Hybrid Testing

1. はじめに

運開後 30 年を経過したプラントでは、10 年毎に高経年化評価を行うことが義務付けられており、その中で減肉した配管の耐震性評価を行う必要がある。減肉配管の耐震評価研究についてはこれまで、旧原子力発電技術機構(NUPEC)や防災科学研究所で実験的な研究と数値解析による検討が行われてきた^{[1][2][3]}。これらの既往の検討では、エルボなどの要素モデルによる繰り返し載荷実験、小口径の配管系モデルによる振動台加振試験、および数値シミュレーション解析を組み合わせた耐震評価が行われ、地震時の挙動解明が進められてきた。

上記検討において、配管に生じる減肉現象のモデル化については、全周一樣減肉と局部減肉を対象としてきているが、減肉メカニズムに基づく減肉の発生部位・減肉形状は考慮されておらず、一般的な減肉形状と減肉量を扱うのみであった。このため、保守的にかつ強度的に厳しい条件で設定した耐震評価としての位置づけとなっており、減肉配管の耐震挙動を合理的に評価するためには、実際に生じる減肉現象を評価の対象として考慮する必要がある。

以上の状況を鑑み、中部電力と電力中央研究所は、実際のプラントに生じる液滴衝撃エロージョン(LDI)による減肉現象に着目し、プラント内の減

肉管理の条件を整理し、流動評価に基づく LDI による減肉形状の予測を行い、標準的な減肉形状の配管モデルを提案し、配管の強度実験・解析による配管系の耐震安全性に関する評価の合理化研究に着手した。本報告では、減肉した配管模型を用いた載荷実験により耐震強度への影響の評価を試みる。

2. 局所減肉した配管系の耐震評価方法

配管系の地震応答挙動を評価するためには、実際の配管系の模型を作成し、振動台の上で加振実験を行うことにより実証的な評価が可能である。しかしながら、プラント内の配管系の模型は規模が大きく振動台上に設置することは困難であり、振動台の加振レベルに限界があるため損傷が生じるまでの終局的な評価は難しい。さらに、縮小模型による振動実験では、モデル化の制約上、損傷モードを正確に再現できないことなど、耐震評価上の課題が存在した。

これらの問題を解決するため、当所では、数値解析と力学実験を融合させたハイブリッド実験手法の開発^{[4][5]}を行ってきており、本論では当該手法を用いて耐震評価を行った。

2.1 ハイブリッド地震応答実験方法

本論では、構造系全体応答を数値モデルとして扱い、局所的に変形や損傷が集中する部位のみを実物を模擬した模型を使用した載荷実験を行い、両者の連携によるハイブリッド地震応答実験を適用した。当所で開発したハイブリッド実験システムの詳細については、文献[4],[5]を参照されたい。

ハイブリッド実験においては、蒸気系の配管を想

連絡先: 酒井理哉, 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646, 電力中央研究所, 電話: 04-7182-1181, E-mail: m-sakai@criepi.denken.or.jp

定した数値モデルを作成し、この中で減肉が生じたエルボを試験部分として扱った。本ハイブリッド実験により、地震力が作用した条件で、減肉したエルボ部位について、荷重変位関係、損傷モード、限界状態でのひずみ履歴などのデータを取得する。

2.2 配管系のモデル化と入力地震動

ハイブリッド実験でモデル化した配管系を Fig. 1 に示す。同図には最大応力が発生する着目エルボを点線で囲んで示している。対象とした配管系は、450ASch20 (外径 457.2mm, 板厚 12.7mm) のクロモリブデン鋼 (STPA23) の配管で、配管系の全長は約 60m、配管の両端はアンカーとノズルにより固定され、9 か所でサポートにより支持されている。上記の配管系を 3 次元はり要素でモデル化し、固有値解析より得られた配管系の 1 次～4 次の固有振動数は 3.5Hz～7.7Hz である。

評価に用いた入力地震動について、加速度振幅 1.0m/s^2 に正規化した時刻歴波形と加速度応答スペクトルを Fig.2 に示す。JEAG4601 で設定されている評価式に基づき、当該配管系の着目エルボの発生応力値が許容値 (降伏応力) に至る入力地震動レベル (評価用基準レベル) を求め、その 5 倍・10 倍のレベルの地震力 (最大加速度 17G, 34G) を作用させた。

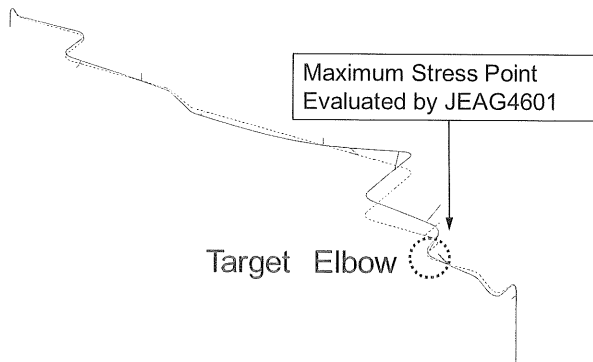


Fig.1 Numerical Model of Piping System

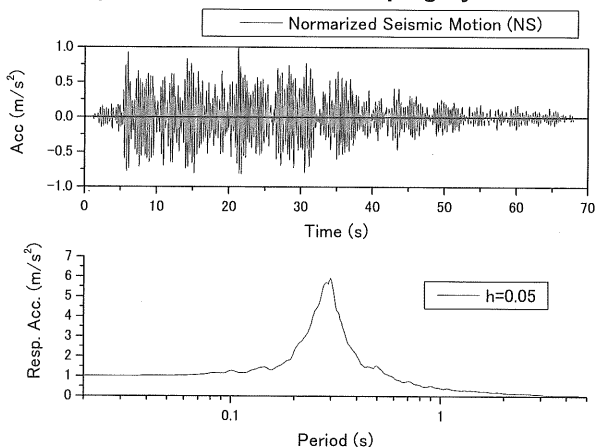


Fig.2 Input Seismic Motion

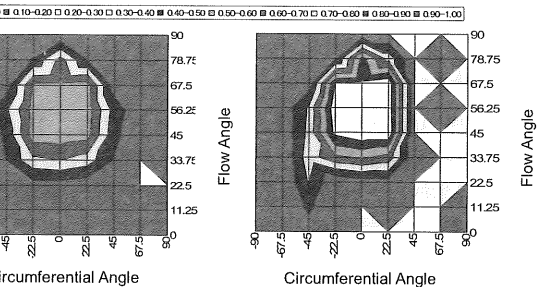
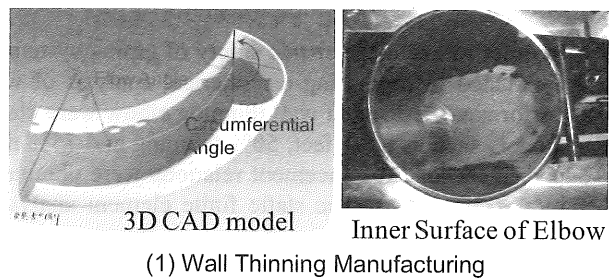
2.3 減肉エルボモデルの作成

減肉エルボモデルは、荷重装置の荷重とストロークの制限から 200A 配管 (外径 216.3mm, 板厚 5.8mm) を使用して、1/2.114 の縮尺モデルで設計した。前報

で定めた減肉形状を正確にモデル化するため、NC 機械加工により、減肉エルボモデルを作成した。エルボは個体差があるため、加工前に 3 次元計測して実物の形状データを作り、CAD システムに減肉加工用の数値データを設定して機械加工した。試験ケースは、Table1 に示すように、健全管、50%減肉、75%減肉の 3 ケースとした。減肉エルボの加工状況と、作成したエルボ試験体の板厚を超音波板厚計で測定し、正規化表示した板厚分布を Fig.3 に示す。

Table1 Test Cases

Case	Wall Thinning	Condition
H01	No Defect	Reference Case
H02	50% Thinning	Worse Condition
H03	75% Thinning	Severe Condition



(2) Distribution of Wall Thickness of Elbow
Fig.3 Elbow Specimen

2.4 荷重装置

荷重装置は、Fig. 4 に示すように、エルボ試験体の片端を架台に固定し、もう片端を荷重治具に結合し、加振機 3 本により平面内 3 自由度の変位制御による荷重を行う。荷重治具は、3 本の加振機と荷重用梁から構成され、装置全体を床面に水平にセットした。荷重用梁は、鏡面仕上げした低摩擦の台座の上に設置して、加振機の駆動により台上の平面内で、並進 2 方向 (縦・横)、回転方向に自由に可動し、梁の中央部の荷重点に対し、数値モデルで計算された目標変位への加振を行う。

配管要素試験体は密封構造とし、内部は加圧用に注水し、蒸気系配管のプラント条件の 1.87MPa の内圧をポンプで作用させた。温度条件は室温とした。

なお、本ハイブリッド実験においては、試験体に 1/2.114 の縮尺モデルを利用しており、全体応答を計算する数値モデルと、力学実験部分の間で、目標変位を 0.473 倍、応答荷重を 4.468 倍した相似則換算により、荷重と変位を作用させた。

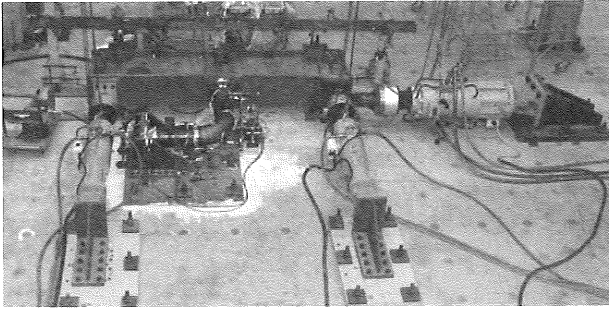


Fig. 4 Three Axial Loading Test Apparatus

3. ハイブリッド地震応答実験結果

本章ではハイブリッド地震応答実験より得られた結果についてまとめて示す。

3.1 線形剛性

地震入力に先立ち、試験体の線形剛性を評価した結果を Fig.5 に示す。同図には後述するシェル要素でモデル化した数値解析による結果も合わせて示している。基準ケースの健全管の剛性で正規化して整理しており、局部減肉については75%減肉しても5%程度の剛性低下を生じるのみであるのに対し、全周一様減肉では剛性が半分以下に低下している。

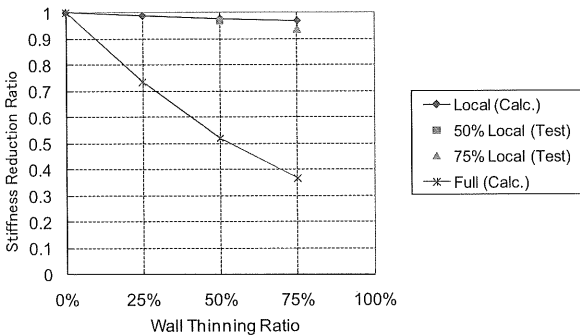


Fig. 5 Stiffness Reduction Ratio

3.2 荷重変位関係

実験より得られた代表的荷重変位関係として、加振機2のロードセルと内臓変位計より得られた結果を Fig.6 に示す。履歴挙動は弾塑性応答による紡錘型の履歴が得られており、健全管、50%減肉、75%減肉ともにほぼ同等の荷重変位履歴であることが把握できる。最大荷重値は健全管に対し1%以内の差であるのに対し、最大変位は15%~20%大きい値となった。

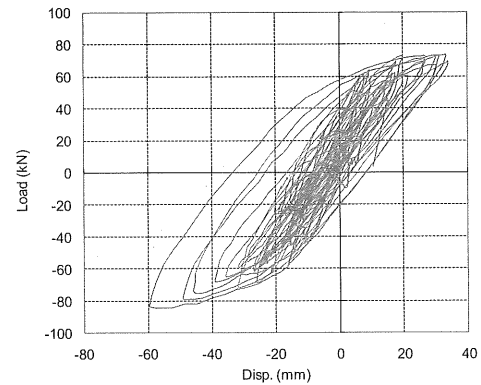
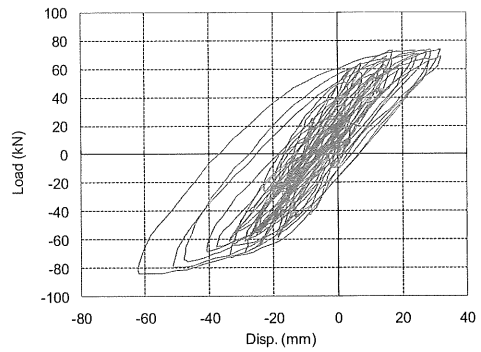
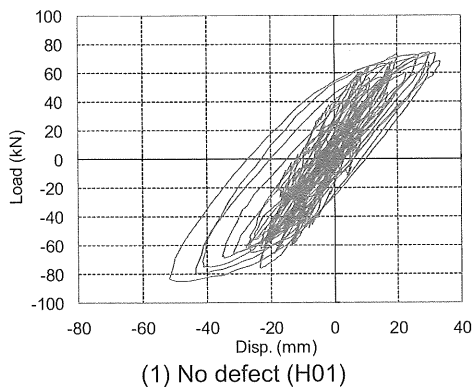
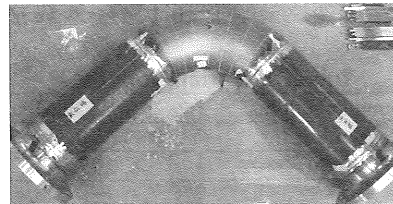


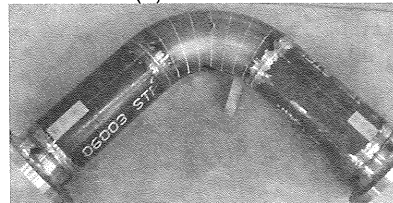
Fig.6 Load Displacement Relations

3.3 試験後試験体と浸透探傷検査

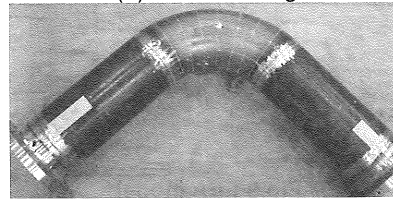
加振実験終了後の試験体外観を撮影した状況を Fig.7 に示す。健全管および減肉加工した試験体で目立った変形状況の違いは見られず、損傷状況は把握できなかった。



(1) No Defect



(2) 50% Thinning



(3) 75% Thinning

Fig.7 Elbow Specimens after Loading Tests

エルボに面内曲げ荷重が作用する場合、管の断面には楕円化が生じ、その繰り返しの繰り返しによりエルボ横腹部にき裂が進展することが報告されている^[6]。このため、エルボ内面に生じる疲労き裂の発生状況を確認

認するために、エルボ部を切断して浸透探傷検査を行った。浸透探傷検査の結果を Fig.8 に示す。エルボ横腹部の内表面においてもき裂などの損傷は確認されなかった。(なお同図において、溶接箇所に着色部位が見られるが、表面の凹凸によるもので損傷は生じていない。)



(1) No Defect (2) 50% Thinning (3) 75% Thinning
Fig.8 Penetrate Testing Results of Elbow Specimens

4. FEM 解析による考察

実験結果の考察のために、減肉をモデル化したエルボ単体の有限要素解析を行い、損傷に関して評価した。

4.1 解析モデル

汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いて弾塑性大変形解析を行った。8 節点次数低減積分のシェル要素を用いてモデル化を行い、直管およびエルボを、周方向 30 分割、軸方向 30 分割で要素分割した。材料物性値は、クロムモリブデン鋼の JIS による規格値を用いて、Table2 に示すような数値を適用した。非線形材料特性は 2 直線近似とし、降伏点から 1/200 の勾配で設定した。載荷方法は、健全管の単調載荷時に得られた線形剛性の半分の割線が交わる点を崩壊点とし、その変位振幅で 10 サイクル繰り返し載荷した。

Table2 Material Properties

Young's modulus	191520 MPa
Poisson's ratio	0.3
Proof Stress	205 MPa

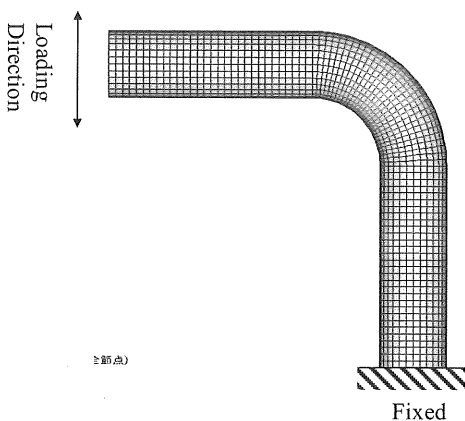


Fig.9 FEA model

4.2 解析結果

解析結果で得られた荷重変位関係を Fig.10 に示す。荷重変位関係は、健全管のケースで荷重が最大となり、局部減肉のケースは 5%程度低下し、全周一樣減肉のケースでは、半分以下の最大荷重での履歴の

結果となった。減肉量に対する荷重低下率について健全管の最大値で整理した結果を Fig.11 に示す。局部減肉は 5%の荷重低下しか見られないものの、全周一樣減肉では 43%まで低下した結果となった。この結果は、現行の全周減肉によるモデル化の耐震評価はかなり保守性を含んでおり、局部減肉を適切に評価することで、合理化が可能であることを示している。

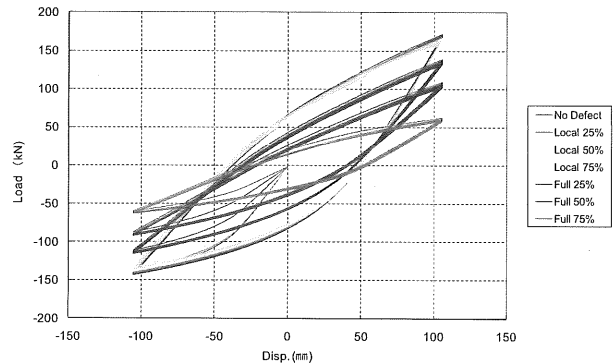


Fig.10 Load Displacement Relations

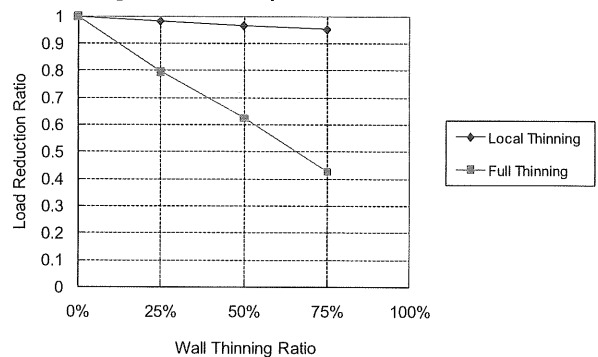


Fig.11 Reduction Ratio of Maximum Load

4.3 応力・ひずみ分布による考察

健全管、75%局部減肉、75%全周減肉の 3 ケースについて、Mises 応力分布、相当塑性ひずみ分布についてカラーコンター図で比較した結果を Fig.12、13 にそれぞれ示す。

Mises 応力の分布は、健全管と 75%局部減肉のケースでは、減肉させたエルボの背側に応力分布の違いがみられるが、概ね一致した結果を示しているのに対し、75%全周減肉のケースでは、板厚が変化しているエルボと直管の付け根および、エルボ横腹に応力の集中部位が見られる。

相当塑性ひずみ分布図の比較では、健全管と 75%局部減肉のケースでは塑性化した部位がほぼ一致しているのに対し、全周一樣減肉のケースでは、塑性化部位が異なっている状況が分かる。

エルボの面内曲げについては、断面の楕円化の影響で、エルボ横腹部にひずみが集中し、当該部位の強度が全体の曲げ強度へ支配的である。今回考慮した局部減肉はエルボの背側に当たるため、面内曲げ方向については影響が小さいと言える。全周一樣減肉については、板厚の変化部にひずみが集中する結果となり、局部減肉をモデル化する方法としては

適切でない結果となった。

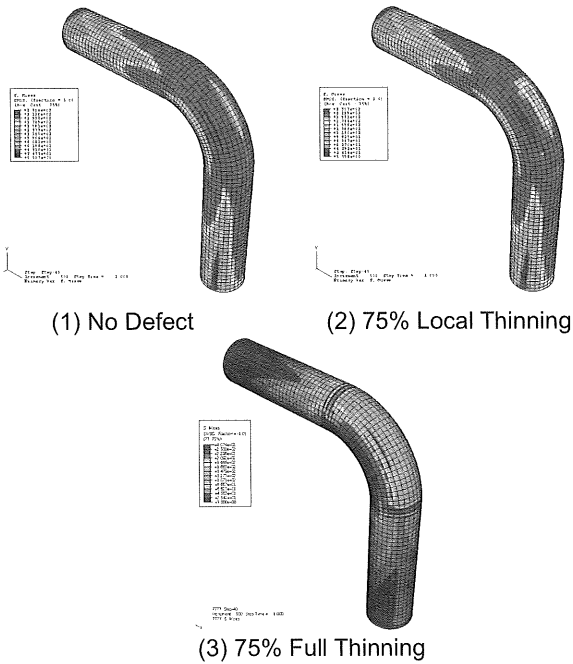


Fig.12 Mises Stress Distribution

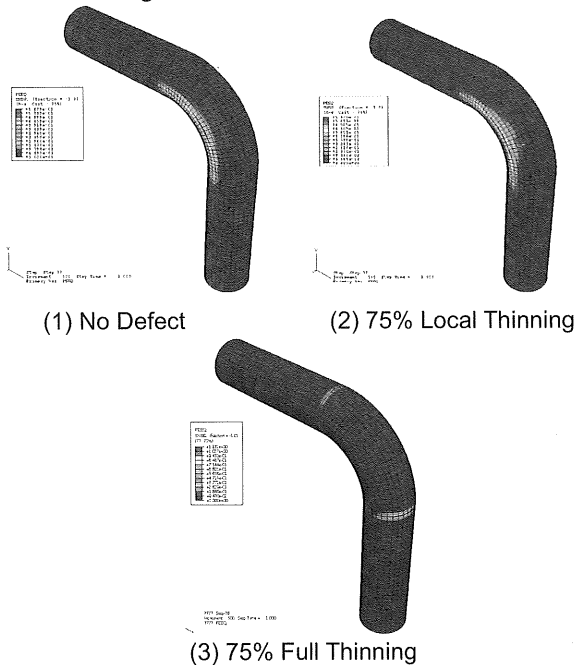


Fig.13 Plastic Strain Distribution

5. まとめ

LDI による局部減肉を対象に、減肉の影響を評価するためにエルボ配管模型を用いたハイブリッド地震応答実験を適用し、地震時の応答挙動、損傷に関するデータを得た。75%まで減肉を模擬した模型に対しても健全管と同等の荷重変位挙動を保持する結果となった。载荷実験後の試験体には損傷は見られず、発生応力が一部塑性域に達する地震波の10倍の入力地震動に対しても、十分な耐震裕度を有していることを確認した。結果を考察するために、局部減肉・全周様減肉を考慮した有限要素解析を実施し、基本的な荷重変位関係、応力・ひずみの分布状況を把握した。エルボの面内方向曲げの強度については、今回想定した LDI による局部減肉の影響は小さく、現行の耐震評価でモデル化している全周様減肉は非常に保守的な条件であることが明らかになった。

今後は、実験結果で得られたひずみのデータなどを整理し、実験を模擬した数値シミュレーション解析を実施して両者の比較により適用精度を確認するとともに、耐震評価上重要な疲労評価を行う。面外方向曲げについて実験および数値解析を行い、耐震安全性の検討を行う。

参考文献

- [1] 日本原子力研究所, “配管信頼性実証試験技術報告書”, JAERI-M93-076, (1983)
- [2] (財)原子力発電技術機構, “平成14年度原子力発電設備耐震信頼性実証に関する報告書 その2” (2003)
- [3] 中村いずみ, 大谷章仁, 白鳥正樹, “地震荷重を受ける減肉配管の破壊過程に関する研究報告書”, 防災科学技術研究所研究資料, 第306号, (2007.3).
- [4] M. Sakai, et.al, “Visual and Versatile Hybrid Seismic Testing System Incorporated With Non-Linear Finite Element Analysis”, ASME, PVP2005-71446, (2005.7).
- [5] M. Dozono, et.al, “Verification Test for Hybrid Seismic Experimental Method Using Nonlinear Finite Element Method”, ASME, PVP2005-71228, (2005.7).
- [6] 酒井理哉, 他, “減肉した配管エルボの地震応答評価法”, 日本機械学会 M&M2009 カンファレンス, OS1423, (2009.7).

