

循環水配管の健全性評価

Evaluation of Soundness for Circulating Water Pipes

東京電力株式会社 國友 良浩 Yoshihiro Kunitomo Non-Member
 東京電力株式会社 平田 剛 Tsuyoshi Hirata Non-Member
 東京電力株式会社 寺前 哲夫 Tetsuo Teramae Non-Member

After Niigata-ken Chuetsu-Oki Earthquake happened, some deformations were found at buried parts of circulating water pipes at Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plants. We had evaluated the soundness of deformed pipes, and concluded that the degree of deformations is small enough to use these pipes continuously. In this paper, some results of these evaluations are described.

Keywords: Niigata-ken Chuetsu-Oki Earthquake, Circulating water pipe, Deformation, Evaluation of soundness

1. 緒言

新潟県中越沖地震の影響により、柏崎刈羽原子力発電所1号機から5号機の循環水配管土中埋設部に变形が確認された。当社は变形した循環水配管の継続使用を志向し、その妥当性を判断するため、配管变形部の健全性評価を実施した。本稿では、柏崎刈羽原子力発電所3号機循環水配管放水ライン下部マイタ管を例に取り、变形した管の評価項目および評価結果を示す。

Table 1 Specification of circulating water pipe

配管口径	3300mm
配管板厚	16mm
配管材質	炭素鋼 (SS400)
外面塗装	コールタールエナメル
内面塗装	ポリエステル系ガラスフレイクライニング
内包流体	海水
耐震クラス	Cクラス
備考	土中埋設 (深さ約 30m)

2. 循環水配管の概要

柏崎刈羽原子力発電所3号機の概略図を Fig. 1 に示す。循環水配管は復水器に流入する主タービンを回転させた後の排気蒸気やドレンの冷却を行うための海水 (低熱源) を供給するための配管であり直径3300mmの大径管である。(Table 1 参照)

今回確認された变形は放水ライン下部マイタ管の地中約30mの部位にあり、变形量は最大32mmであった。配管变形部の様子を Fig. 2 に示す。

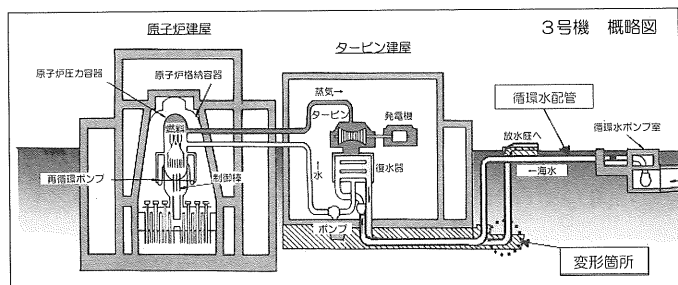
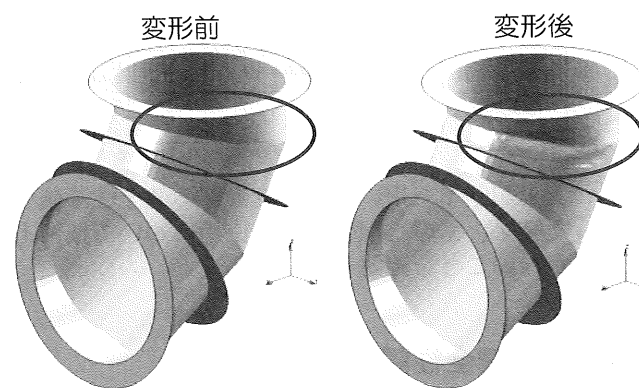


Fig. 1 Schematic diagram of NPP

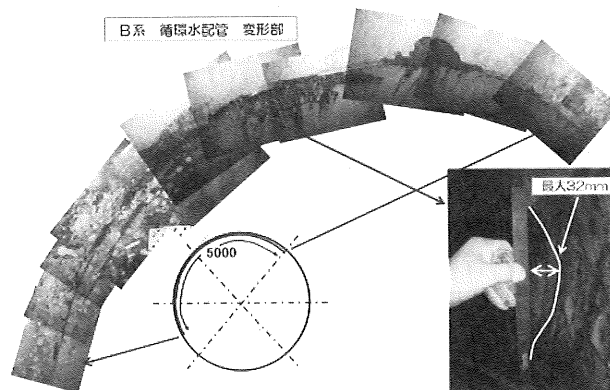


Fig. 2 Deformation of circulating water pipe (Unit 3)

連絡先: 國友良浩, 〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3, 東京電力株式会社 原子力設備管理部 新潟県中越沖地震対策センター 機器耐震技術グループ, 電話: 03-6373-1111 (代表), e-mail: kunitomo.yoshihiro@tepcoco.jp

3. 配管変形部の健全性評価

循環水配管の変形は今回初めて確認された事象であり、新潟県中越沖地震発生以前に同様の事象は確認されていない。また配管の変形（加工）について使用の可否の判断に資する規格や基準は存在しなかった。

そのため、当社は循環水配管の健全性評価を行うため配管に求められる機能を明確にした上で、これらの機能へ影響を及ぼすと考えられる以下の9項目の健全性評価基準を作成した。（Table 2 参照）

また作成した基準について、日本原子力技術協会「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」（JANTI SANE: Structural Integrity Assessment Committee for Nuclear Components damaged by Earthquake）評価基準ワーキンググループにて技術的妥当性を確認していただいた。

Table 2 List of evaluation of soundness for circulating water pipes

評価項目	詳細評価項目	要求機能		評価基準
		送水	バウンダリ	
(1) 変形状態の確認及び評価	a. 変形に伴う有効径の減少	○	—	定格流量を確保できる最小内径を満足すること
	b. 変形部位の欠陥の有無（浸透探傷、超音波探傷）	—	○	各試験結果に有意な異常が無いこと
	c. 変形に伴う板厚の減少	—	○	火技解釈 [※] 第2.3条による最小板厚を満足すること
	d. 変形に伴う機械特性の低下	○	○	変形に対して機械的特性の低下が無いこと
	e. 外面塗装のはく離の有無	—	○	外面塗装のはく離が測定部の面積の5%以上無いこと
(2) 通常運転状態における変形部位の評価	a. 形状に起因する応力集中の影響	○	○	発生応力が火技解釈別表-1にある許容引張応力未満であること
	b. 形状に起因する座屈強度の低下	○	○	水門鉄管技術基準にある座屈安全率以上であること
(3) Cクラス地震における変形部位の評価	a. 地震による変形助長の有無	○	—	Cクラス地震による変形量の有意な増加の無いこと
	b. 地震による疲労評価	—	○	新潟県中越沖地震とCクラス地震による疲労累積係数が1以下であること

※火技解釈「発電用火力設備に関する技術基準の解釈について」

上記基準を用いて配管変形部の健全性評価を行った結果、循環水配管の継続使用について技術上問題がないことを確認した。

4. 健全性評価項目

3. 項にて抽出した9つの健全性評価項目のうち、以下の4つの評価項目について紹介をする。

4.1 変形に伴う機械特性の低下

4.1.1 配管変形部の機械特性

配管変形部の機械特性に著しい変化がないことを確認するため、繰返し予ひずみを与えた材料の引張試験を行い「耐力・降伏点」「引張強さ」及び「伸び」が一般構造用圧延鋼材（JIS G3101）[1]の規定を満足することの確認を行った。

なお、材料には外面塗装の健全性を確認するために掘削した3号機B系の循環水配管から試験体を作成し、5%、10%、15%の予ひずみをそれぞれ

3回ずつ与えたものを用いて評価を行った。

4.1.2 配管変形部の降伏・引張強さ

繰返し予ひずみを与えた材料の「耐力・降伏点」及び「引張強さ」の傾向を Fig. 3 に示すが、いずれもひずみの増加に伴い、上昇傾向が見られている。

このことから、配管変位部の耐力は同様に上昇していると考えられる。

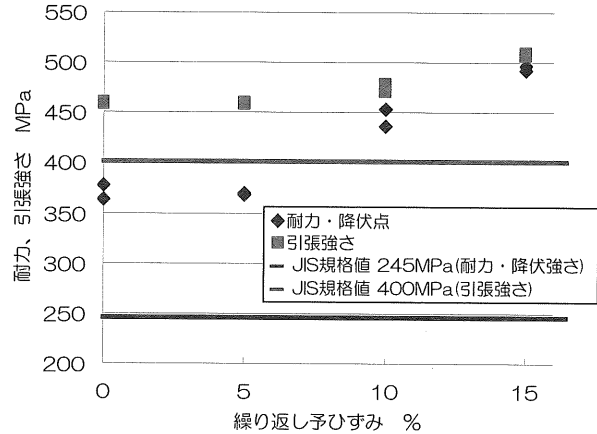


Fig. 3 Relation between tensile strength and strain

4.1.3 配管変形部の伸び

繰返し予ひずみを与えた材料の「伸び」の傾向を Fig. 4 に示すが、ほぼ15%程度の予歪みであれば、一般構造用圧延鋼材（JIS G3101）の規定を満足することを確認した。

変形部の曲率から算定した残ひずみは最大で6%程度であることから配管変形部の延性は充分であると判断した。

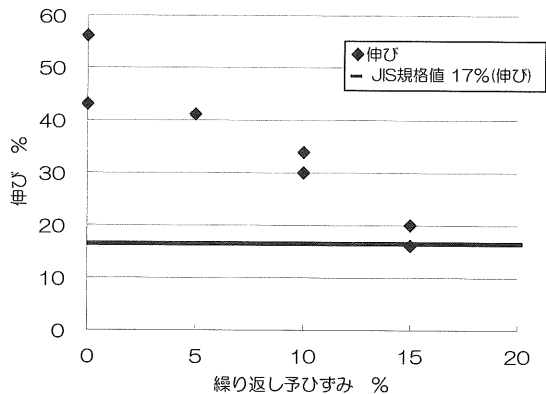


Fig. 4 Relation between tensile elongation and strain

4.2 形状に起因する応力集中の影響

4.2.1 設計内圧作用時の評価

継続使用するにあたり、通常運転時において配管変形部にどのような応力が発生するかを確認するた

めにFEM解析を行った。初期形状はFig. 2で示した変形部を含むマイタ管30度部分を取り出し、変形部の計測結果を用いて形状をモデル化した。また解析条件は以下の値を使用した。(Table 3参照)

Table 3 Specification of FEM analysis model

ヤング率	E	200GPa
ポアソン比	ν	0.3
作用内圧	P	0.58MPa (設計内圧)

4.2.2 解析結果

Fig. 5に配管内外面でのMises応力を示すが、最大値は内面で80MPa、外面で63MPaであった。また、一次一般膜応力は74.8MPaであった。この値は、「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601)」[2]で定められている一次一般膜応力の許容値 (許容引張応力) 100MPa以下であり、1次応力制限を満足している。

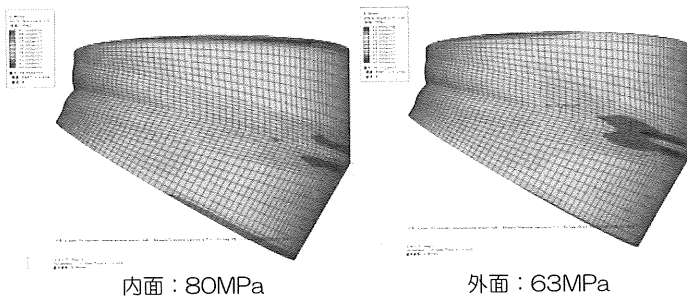


Fig. 5 FEM analysis under design internal pressure

4.3 形状に起因する座屈強度の低下

4.3.1 設計外圧作用時の評価

配管変形部が外圧 (側面土圧、浸透水圧、管内真空圧) に対する強度に影響を及ぼしていないことを確認するために4.2項の耐圧強度評価モデルに外圧を負荷し、崩壊解析を行った。解析に用いた諸条件を以下に示す。(Table 4参照) また変形量の影響を確認するため、変形量を2倍にした場合についても併せて解析を行った。

Table 4 Specification of FEM analysis model

ヤング率	E	200GPa
ポアソン比	ν	0.3
降伏応力	σ_y	245MPa
引っ張り強さ	σ_u	400MPa
一様伸び	ϵ_u	17%
設計外圧	P	0.61MPa
硬化則		等方硬化則

4.3.2 解析結果

Fig. 6に後座屈モードを示す。座屈は地震によって変形した部位とは異なる箇所に見られており、この変形が座屈モードへ及ぼす影響が小さいことを確認した。

あわせてFig. 7に崩壊時の座屈発生点の変位履歴を示すが、分岐座屈発生状況についても変形の大小による差は認められず、分岐座屈圧は降伏応力に達する時点の圧力1.81MPa (塑性座屈圧力) より大きいことを確認した。また変形量32mmの時の座屈圧力は1.91MPa、座屈安全率 (座屈圧力/設計圧力) は3.11である。この値は設計基準である「水門鉄管技術基準」[3]で要求されている安全率1.5を大きく上回っている。なお変形量を2倍にした場合についても、座屈荷重がほとんど低下しないことを確認した。

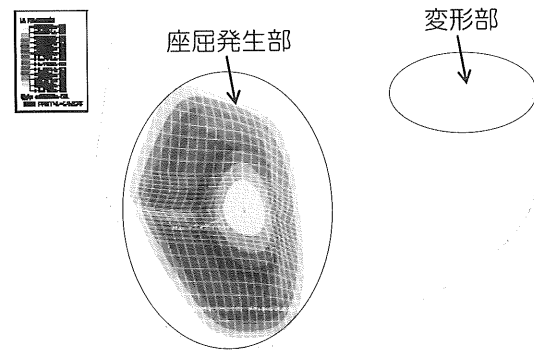


Fig. 6 FEM analysis under design external pressure

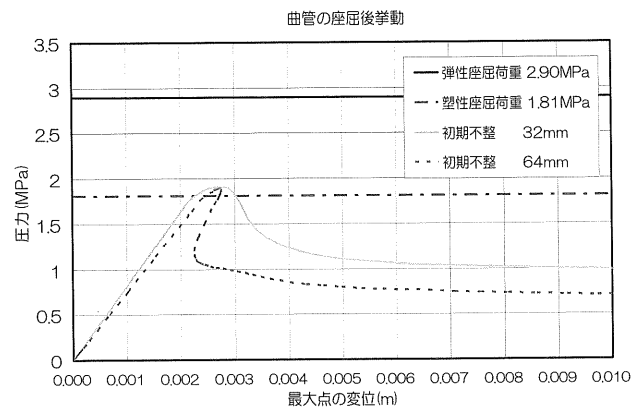


Fig. 7 Pressure - Displacement curve

4.4 地震による疲労評価

4.4.1 耐震Cクラス設備の疲労評価

循環水配管は「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601)」[2]では耐震Cクラスの設備に分類されており、当該指針上における疲労損傷評価の要求は無い。しかし当社が今後継続して配管を継続して運用して行く上で健全性を確認する観点から、配管

変形部の疲労評価を実施した。

4.4.2 評価条件

Fig. 8 に疲労評価解析モデルの概念図を示す。新潟県中越沖地震時の地盤変位を時刻歴解析で求め、各埋設深さ毎に設定した地盤バネを介して本解析モデルへ入力し、配管変形部の疲労累積係数を求めた。

Fig. 9 に低サイクル疲労寿命曲線を示す。日本機械学会誌[4]に掲載されている曲線と3号機B系配管材を用いた試験より求めた曲線を比較し、低サイクル側で厳しい評価となる3号機B系配管材から求めた曲線を今回の評価に使用した。ただし、疲労試験結果のばらつきを考慮し評価が安全側になるよう下限値をとる疲労寿命曲線を本評価に使用した。

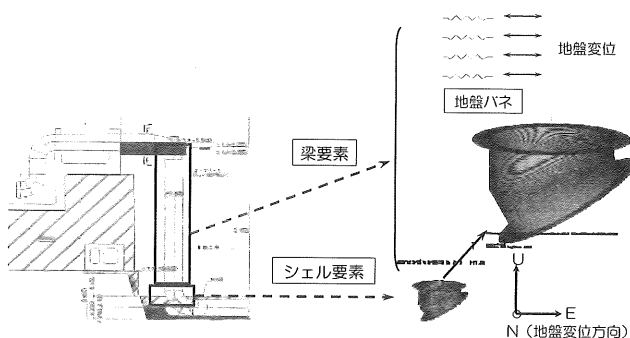


Fig. 8 Schematic diagram of FEM analysis model

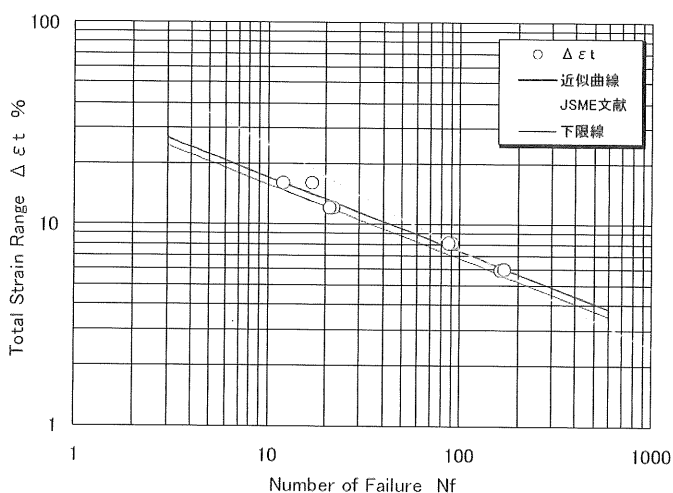


Fig. 9 Low cycle fatigue curve

4.4.3 解析結果

FEM 解析の結果、新潟県中越沖地震によって配管変形部が受けた疲労損傷は7.5%であり、予寿命が充分あることを確認した。

5. 結言

- (1) 新潟県中越沖地震により変形した循環水配管の継続使用を志向し、9項目の健全性評価基準を作成した。
- (2) 配管変形部について各種点検を行った結果、変形以外に有意な損傷は確認されなかった。
- (3) 循環水配管の変形形状を反映した解析を行い、配管変形部が設計時の基準を満足することを確認した。
- (4) 新潟県中越沖地震によって配管変形部が受けた疲労損傷は7.5%であり、予寿命が充分あることを確認した。

謝辞

循環水配管の健全性評価基準の作成にあたって、日本原子力技術協会「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」(JANTI SANE: Structural Integrity Assessment Committee for Nuclear Components damaged by Earthquake) 委員各位のご指導、ご助言を得た。ここに厚く謝意を表す。

参考文献

- [1] 日本工業規格, 「一般構造用圧延鋼材」(JIS G3101)
- [2] (社) 日本電気協会, 「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 (JEAG4601・補 1984)」
- [3] (社) 水門鉄管協会, 「水門鉄管技術基準」
- [4] (社) 日本機械学会, 「金属材料 疲労強度の設計資料 IV 低サイクル疲労強度」