J1010105

原子力施設の免震技術の開発 渡り配管のフラジリティについて

日置 裕右, 鈴木 優^{*1}, 佐藤 邦彦^{*2},
飯泉 博英^{*3}, 久恒 眞一^{*4}, 尾西 重信^{*5}

Development of an Evaluation Method for Seismic Isolation Systems of Nuclear Power Facilities An Evaluation of Fragility for Crossover Piping System

Hiroaki HIOKI, Yutaka SUZUKI^{*1}, Kunihiro SATO^{*2},

Hirohide IIZUMI^{*3}, Masakazu HISATSUNE^{*4}, and Shigenobu ONISHI^{*5}

^{*1} MHI Nuclear Engineering Company
Minatomirai 3-3-1, Nishi-ku, Yokohama, 220-8401 Japan

This paper focuses on the fragility evaluation of the crossover piping between the seismically isolated reactor building and non-isolated building. From the view point of reactor cooling and confinement, the crossover piping of Sea-Water systems is selected in order to estimate the CDF (Core Damage Frequency) of base-isolated nuclear power plant. The routing design and seismic response spectrum analysis applying Independent Support Motion (ISM) method of the crossover piping are performed. As a result of the parameter study for seismic range of $\alpha \times S_s$ ($\alpha = 1.0 \sim 2.3$) and the evaluation of the fragility curve, we confirm the failure probability of the crossover piping is extremely small.

Key Words : Seismic Isolation Systems, Crossover Piping, Nuclear Power Plant, Multiple Support Excitation, ISM (Independent Support Motion), Failure Probability, Fragility Curve

1. 結 言

本開発では原子力発電施設について免震設計の評価手法を確立して免震設計の導入を図り、地震時における原子力発電施設の安全性高度化に資することを目的としている。

発電用原子力施設に免震装置を採用した場合、免震建屋と非免震建屋間を繋ぐ渡り配管には大きな相対変位が生じるため、これまでに渡り配管の設計手法として多入力解析手法の採用が有効であることを検討してきた。^{(1),(2)}

本論文では、免震型原子力プラントの炉心損傷頻度 (CDF) の算定に資するため、冷却、封じ込め機能に着目して海水管渡り配管を評価対象に選定し、多入力解析手法を適用して、渡り配管のフラジリティ評価を行った。

第2章では、地震 PSA 評価用の基準モデルとして作成した、海水管渡り配管のルート設計及び S_s 地震動の設計値に対する耐震評価結果を示す。第3章では、地震条件・地盤条件・免震装置等を基本パラメータとする各種ばらつきを考慮した建屋地震応答解析から得られる S_s 地震動の中央値の係数倍の入力地震動を用いた配管解析を行い、配管の疲労損傷モードに基づくフラジリティ評価手法を適用して、海水管渡り配管のフラジリティを算定した結果について報告する。

2. 海水管渡り配管の耐震評価

海水管は、海水ポンプ建屋（非免震建屋）内に設置した海水ポンプで取水した冷却用海水を原子炉建屋（免震

^{*1} MHI 原子力エンジニアリング(株) (〒220-8401 横浜市区みなとみらい 3-3-1)

^{*2} 正員, 三菱重工業(株), ^{*3} (株) 東芝, ^{*4} 日立 GE ニュークリア・エナジー(株), ^{*5} 中部電力(株)

E-mail: yutaka1_suzuki@mnec.mhi.co.jp

建屋) 内に引き込む耐震 Ss クラス, 機器クラス 2 の渡り配管であり, 図 1(a) の建屋配置概念図に示すように, 免震建屋 (原子炉建屋) と非免震建屋 (海水管建屋) の建屋配置及び機器配置等の観点から, 配管ルートを長く引廻すことによって, 両建屋間の地震相対変位を吸収する配管ルートを採用する. 海水管渡り配管の解析範囲は, 両建屋にそれぞれ設けるアンカー間とし, 図 1(b) に示す基準モデルを作成した. 海水管の代表的な配管仕様を表 1 に示す. 図 2 に示す建屋解析モデルにおいて, 海水管渡り配管の免震側アンカー点 (節点 1001) で上部基礎盤上の建屋質点, 一方の非免震側アンカー点 (節点 1002) で下部基礎盤 (ベースマツト) 上の建屋質点の地震波を入力し, 多入力応答スペクトル解析 (ISM 法: Independent Support Motion method⁽³⁾) により Ss 地震時 (設計値) の構造健全性を確認した.

Figure 1 Pipe routing of S/W crossover piping

Table 1 Specifications of S/W crossover piping

Material	STPG410
Outer Diameter (mm)	660.4 / 679.4 (26B)*
Thickness (mm)	9.5 / 19.0*
Pressure (MPa)	0.98
Temperature (°C)	50

* Increase thickness at bend part

建屋応答解析において免震装置等のばらつきを中央値とした場合にて得られる上部基礎盤上のアンカー一点での加速度時刻歴データより作成した水平方向応答スペクトル線図を図 3 に示す. また, 中央値における建屋間相対変位は, 水平方向に ± 400 mm である. なお, 海水管には防露保温が設置されるが, 付加減衰の効果は期待できないため, 減衰定数は, 渡り配管に対して原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG4614-2013⁽⁴⁾ にて規定される 0.5% を適用した.

Figure 2 Mass point of seismic input for S/W piping (● for node 1001, ● for node 1002)

Figure 3 Floor response spectra of isolated building for multiplication factor α of Ss seismic input (10% broadening and 0.5% damping ratio)

海水管渡り配管の固有値解析結果を表2に示す。大きな建屋間地震相対変位を吸収するためにサポート間距離を長くとしているため、1次固有振動数が3 Hz程度と低いのが特徴である。図4には1次から4次までの海水管の振動モードを示す。

Table 2 Natural frequencies of S/W crossover piping

Mode	Freq. (Hz)	Participation Factor			Predominant Node, Direction
		X	Y	Z	
1	2.9	0.00	0.00	-0.97	Node 100 [Z]
2	3.1	-1.15	0.41	0.00	Node 625 [X]
3	5.1	-0.44	-1.12	0.00	Node 609 [Y]
4	6.2	0.00	0.00	-0.89	Node 609 [Z]
5	8.2	0.00	0.00	-0.74	Node 628 [Z]
6	9.4	-0.02	0.16	0.00	Node 631 [X]
7	13.9	0.16	-0.11	0.00	Node 605 [Y]
8	17.0	0.00	0.00	0.59	Node 606 [Z]
9	18.7	0.61	0.00	0.00	Node 633 [X]
10	19.6	0.00	0.00	0.21	Node 624 [Z]

Figure 4 Vibration modes of crossover piping

海水管渡り配管の免震側アンカー点（節点 1001）から非免震側アンカー点（節点 1002）までの1次+2次応力振幅を図5に示す。図中の赤線は、1次+2次応力振幅に対する制限値 $2S_y$ ($= 468 \text{ MPa}$) であり、これを超えた箇所については、原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008⁽⁵⁾に規定される簡易弾塑性解析により疲労評価を行った。なお、ISM法において、多点応答の合成方法及び水平と鉛直の方向別発生応力の合成方法は、いずれも絶対和を採用した。また、応答スペクトル解析では1次応力成分のみ算出されるため、地震相対変位による2次応力成分は、別途、静解析により算定し合算している。

S_s 地震動の等価繰り返し回数を現行PWRプラント標準の200回とした場合、図5において $2S_y$ を超えた節点に対して行った簡易弾塑性評価の結果において、疲れ累積係数 UF が大きい10点を表3に示すが、最大でも $UF = 0.23 < 1.0$ となり設計条件を満足することが確認できた。

Figure 5 Primary plus secondary stress intensity range along pipe axis

Table 3 Summary of fatigue evaluation

Node number	SI (MPa)	Usage Factor
1001	360	0.06
600	397	0.08
601	472	0.13
810	577	0.23
602	404	0.09
800	359	0.06
621	324	0.05
634	300	0.04
801	502	0.16
635	379	0.07

3. フラジリティ評価

免震渡り配管の耐震評価では、耐震型原子力プラントと異なり、免震－非免震建屋間に生じる大きな相対変位に伴う2次応力成分が大きく、前章で行ったような疲労評価をベースとした評価手法を適用する。したがって、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の設計疲労曲線と NUPEC による配管材料試験で得られた最適疲労線図⁽⁶⁾を、それぞれ十分な裕度を持つものとした 95% 信頼下限及び中央値相当と想定した疲労曲線のばらつきを考慮したフラジリティ評価手法⁽⁷⁾を採用し、渡り配管のフラジリティを算定する。

前章で作成した海水管渡り配管の基準モデルに対し、 S_s 地震動の係数 α 倍 (但し、 $\alpha = 1.0, 1.5, 2.0, 2.3$) の地震入力に対する建屋解析上のばらつきを中央値としたケースについて、ISM 法によりパラメータスタディを行い、疲労評価を行った。地震時の等価繰返し回数は、多入力時刻歴応答解析を実施し、レインフロー法を用いてひずみ履歴より算出した結果をもとに算定した。これらの結果を疲労線図中にプロットしたものを図6に示す。

フラジリティ評価では、図6の破線で示される耐力の確率密度分布と応力解析結果に基づく応答の確率密度分布から損傷確率を算定する。一例として、 $2.3 \times S_s$ の場合の確率密度分布図を図7に示す。

Figure 6 Fatigue analysis results of S/W crossover piping

Figure 7 An example of probability distribution ($2.3 \times S_s$)

以上より海水管渡り配管のフラジリティを算定した結果、表4に示すように損傷加速度の中央値は6.77 G、対数標準偏差は0.53となった。また、これらの算定値から得られたフラジリティ曲線を図8に示す。これらの結果に示されるように、海水管の損傷確率は非常に小さく、設計裕度は十分に大きいことが確認できた。

Table 4 Fragility calculation results of S/W crossover piping

Middle number (G)	Logarithm standard deviation	PGA (G)			
		0.816	1.22	1.63	1.88
		$1.0 \times S_s$	$1.5 \times S_s$	$2.0 \times S_s$	$2.3 \times S_s$
6.769	0.527	2.22×10^{-6}	4.78×10^{-4}	3.54×10^{-3}	7.45×10^{-3}

Figure 8 Fragility curve of S/W crossover piping

4. 結 語

免震型原子力プラントの炉心損傷頻度（CDF）算定に資するため、冷却、封じ込め機能に着目し、海水管渡り配管を対象配管として選定し、配管のルート設計及び構造健全性の評価を行い、地震 PSA 評価用の基準モデルを作成した。また、免震渡り配管の解析手法として有効な多入力解析手法を適用し、建屋解析上のばらつきを中央値としたケースについて、海水管渡り配管の S_s 地震動の係数 α 倍に対する解析評価を行い、フラジリティ算定を行った結果、損傷確率は非常に小さく、渡り配管の設計裕度は十分に大きいことが確認できた。

なお、本開発は、経済産業省の補助事業「発電用原子炉等安全対策高度化技術開発」の一環として遂行している。

文 献

- (1) 鈴木 優, 他, “原子力施設の免震技術の開発（その 3）渡り配管解析評価”, 日本機械学会平成 24 年度茨城講演会, (2013)
- (2) Y. Suzuki et al., “Development of an Evaluation Method for Seismic Isolation Systems of Nuclear Power Facilities (Part 1), The Work Schedule of Project and a Seismic Design of Crossover Piping System”, ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2014-29035, 2014
- (3) WRC Bulletin 352, “Independent Support Motion (ISM) Method of Modal Spectra Seismic Analysis”, 1990
- (4) 日本電気協会 原子力規格委員会 “原子力発電所免震構造設計技術指針 JEAG 4614-2013” (2013)
- (5) 日本電気協会 原子力規格委員会 “原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC 4601-2008” (2008)
- (6) K. Suzuki, et al., “Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Test Results on Piping Component and Simplified Piping System)”, ASME PVP, Vol.445-1 (2002), pp.99-106.
- (7) 福嶋俊介, 他, “原子力施設の免震技術の開発 渡り配管の確率的破損評価手法について”, 日本機械学会 2014 年度年次大会, J1010104.