ナトリウム冷却高速炉 1 次系ホットレグ配管の1/3縮尺試験による流動状況と 圧力変動特性*

佐郷 ひろみ^{*1}, 白石 直^{*2}, 渡壁 壽人^{*3}
徐 陽^{*4}, 相澤 康介^{*5}, 山野 秀将^{*5}

Flow Pattern and Pressure Fluctuation Characteristics on the 1/3 Scale Hot-Leg Piping Experiments of a Primary Circuit Hot-Leg Piping in a Sodium-Cooled Fast Reactor

Hiromi SAGO^{*1}, Tadashi SHIRAISHI, Hisato WATAKABE,
Yang XU, Kousuke AIZAWA and Hidemasa YAMANO

^{*1} Nuclear Energy Systems, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
1-1 Wadasaki-cho, 1-chome, Hyogo-ku, Kobe, 652-8585 Japan

A conceptual design study of the Japan Sodium-cooled Fast Reactor (JSFR) is in progress in “the Fast Reactor Cycle Technology Development (FaCT) project”. In this project, a two-loop primary system is adopted in order to economize the plant construction cost. The reduction of the number of loops for the primary cooling system increases the primary coolant flow rate per loop. The mean sodium velocity in the pipes increases to over 9 m/s and Reynolds number in the hot-leg pipes is about 4×10^7 . In the JSFR the pipe thickness is designed to be considerably thinner than that of a light water reactor, because the fast reactor is operated at low pressure and high temperature. One of the issues for the piping design is to understand the behavior of flow-induced vibration that is derived from the hydraulic characteristics under high Reynolds number conditions. We made a flow-induced vibration test facility that simulates the hot-leg piping with a 1/3-scale model. Flow-induced vibration experiments were performed using this facility to evaluate and confirm the integrity of piping against the flow-induced vibration. In these tests, we investigate flow patterns and fluctuating pressures on the pipe wall. This paper describes a summary of the 1/3-scale experimental results under the rectified-flow, swirl-flow and deflected-flow conditions at the inlet of the hot-leg piping.

Key Words : Japan Sodium-Cooled Fast Reactor, Short-Radius Elbow Pipe, Pressure Fluctuation, Flow Induced Vibration, Flow Separation

1. 緒 言

FBR サイクル実用化研究開発 (FaCT) では, ナトリウム冷却大型炉 JSFR (Japan Sodium-Cooled Fast Reactor) (電気出力 150 万 kWe) の研究開発を進めている. この設計概念は, 合理化の観点で 2 ループ化を採用することで, 従来設計に比べ薄肉構造の 1 次系配管が大口径化し, かつ管内平均流速も 9m/s 台に増大する. このような配管系を設計する上で, エルボ周辺での流体の乱れに起因する流力振動 (ランダム振動) に対する配管の健全性の確認が必要となり, 大口径配管内流動特性の把握及び配管の流力振動に関する評価手法の開発のための研究を実施している⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾. 本報では, 1 次系ホットレグ (HL) 配管を対象に 1/3 縮尺試験装置を製作し, 配管内の流力振動特性の把握を目的に実施した水流動試験で得られた流動状況や圧力変動特性について報告する.

* 原稿受付 2012 年 2 月 9 日

^{*1} 正員, 三菱重工業 (株) (〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

^{*2} 正員

^{*3} MHI ソリューションテクノロジーズ (株)

^{*4} 三菱 FBR システムズ (株)

^{*5} 正員, (独) 日本原子力研究開発機構

E-mail: hiromi_sago@mhi.co.jp

2. 試験

2・1 試験装置の概要

試験装置は、図 1 の(a)に示すようにエルボを有した配管の供試体の上流にポンプによる脈動を消すために液面を有した中間タンクと配管供試体の入口条件を設定するための整流タンクを、下流側には HL 配管の流れを放水するためのプールを配した構成とした⁽¹⁾。JSFR の 1 次系ホットレグ配管を 1/3 縮尺した配管内径 0.41m の配管試験体(HL 配管供試体)を用いた。HL 配管供試体は、内部流況が可視化できるようなアクリル製の試験体と振動応答を計測するステンレス鋼製の振動試験体の 2 種類について取り替えて試験できる構造とした。ここでは、可視化試験について報告する。可視化試験は、インクをトレーサとして流況を観察するとともに、配管表面での圧力変動が計測できるように圧力計を設置した⁽¹⁾。可視化試験体には、合計で 124 点の圧力計を設置して圧力変動分布を計測した。また、レーザ流速計を用いて主要断面の速度分布を計測した。

2・2 試験条件

2・1 節に示す試験装置を用いて、まず HL 配管の入口条件が整流条件とした試験を実施した。一方、本試験の目的は JSFR 一次系ホットレグ配管のランダム振動評価に資するデータを取得することである。そのため HL 配管の入口条件をできるだけ実機条件に近づけるために旋回流条件及び偏流条件の試験を実施した。旋回流条件及び偏流条件は、実機の流動解析結果を参考に実機条件に内挿できるように設定した。

旋回流試験では、HL 配管に入る大きな旋回流がエルボで生じる剥離域に与える影響が大きいと予測されるため、実機流動解析結果を参考に HL 配管に吸い込まれる流体の循環を求め、それに基づいて旋回強さを試験のパラメータとして設定した。旋回強さは、図 1 の(b)に示す旋回羽根を用いて旋回羽根の角度を調節することで強さを变化させた。旋回条件は、HL 配管入口から約 1140mm 下流位置で配管内壁より 20mm 入った断面上で周方向 4 箇所計測した周方向成分と軸方向成分の比を旋回速度割合と定義して求めた。旋回速度割合は、計画時に流動解析の結果を基に 3.5%から 20%の範囲を目標としたが、本試験では、5%、6.7%、11.6%、14.7%の 4 条件で試験を実施した。

偏流試験では、同様に実機流動解析により HL 配管入口部の偏流発生の直接的な原因が炉心上部構造物(UIS)の体系から生じる横流れであることが確認された。そこで、試験へ UIS の体系から生じる横流れを考慮するため、図 1 の(c)に示すように UIS 構造の#3BP (BP:バッフル板のこと)以下の範囲をモデル化した偏流発生装置を整流タンクに組み込んだ。偏流発生には、#1BP の影響が強いことから、#1BP の開孔率をパラメータとし、実機相当の 18%と無垢板の 0%、取り外した 100%の 3 条件とした。

Fig.1 Facility for making the inlet conditions

3. 試験結果及び考察

3・1 流動状況及び考察

整流条件, 旋回流条件, 偏流条件での流動状況の結果をもとに剥離域の状態について確認した結果を以下に示す.

剥離域は, 図 2 に示すように剥離点から再付着点までの領域を剥離域とした. 剥離点, 再付着点は, 図 2 に示すように可視化により判断した. 剥離域の長さ, 高さ, 再付着点の変動は図 2 に示すように定義した. 参考に入口条件が整流条件の時の流況観察結果を示す. 図 3 は入口条件を整流条件, 旋回流条件, 偏流条件としたときの剥離域の状態を示すために剥離点と再付着点の変動範囲を示したものである. 黒丸は再付着点, 白丸が剥離点を示しており, 上下のラインはその変動範囲を示している. 図 3 に示すように剥離点は整流条件や旋回流条件では変動幅がほとんどないことより安定していることがわかるが, 偏流条件では, 管軸方向に $\pm 5\text{mm}$ から $\pm 10\text{mm}$ 程度の変動が見られた. これは, 剥離域に不安定性が現れたことを示している. 再付着点は整流条件でも変動しているが, 旋回流が加わると変動幅が少し大きくなり, 偏流条件においては, 開孔率が小さくなると更に大きくなった. 図 4 は剥離域の状態を示すために剥離域の高さや長さ及びその変動範囲を示したものである. 白丸が剥離域の長さを黒丸と三角は剥離域の高さを, また, 上下のラインはその変動範囲を示している. 図 4 に示すように剥離域は, 旋回流が強いと高さが高く, 偏流条件 (18%) でも高さが高くなった. ただし, 開孔率が 0% では小さくなる傾向が見られた. 旋回流が強い場合, 剥離域の高さは高くなるが, 剥離域の長さは短くなった. これは, 旋回流が剥離域の横からの流れを伴うために, 流れが管軸に対して傾き, エルボ内壁の流線方向の曲率半径が大きくなるため剥離域の長さを短くしたと考えられる. 旋回流条件では剥離域中心が旋回方向に曲げられていることが確認できた. 偏流条件では, 剥離域の高さとともに剥離域の長さも変化するが, 剥離域の幅は偏流の影響をあまり受けないことが分かった. また, 剥離域の左右の対称性は良いことが確認できた.

Fig.2 Flow condition around the flow separation region

Fig.3 Range of the flow separation region

Fig.4 Length and height of the flow separation region

3・2 圧力変動計測結果及び考察

整流条件, 旋回流条件, 偏流条件下における配管内で圧力変動を把握するために, ランダム振動評価用圧力変動分だけを取り出し, 圧力変動パワースペクトル密度 (圧力変動 PSD) としたものを図 5 及び図 6 に示す. 図 5 は整流条件下と旋回流条件下で, 図 6 は整流条件下と偏流条件下の剥離域近傍の圧力変動 PSD である. D 断面の位置は剥離開始点近傍, F 断面の位置は再付着点近傍である.

図 6 に示すように旋回流条件下では, 整流条件に比べて圧力変動データには, 大きな差は見られなかった. 偏流条件下では, 整流条件に比べて圧力変動 PSD が大きくなった. 但し, 整流条件下での圧力変動 PSD に比べて約 10Hz で見られたピークが小さくなった. 図 5 に示すように入口条件を整流条件から偏流条件にすることで圧力変動 PSD の大きさ, 周波数に対する分布が変わることが確認できた. 配管のランダム振動評価に向けて, 整流条件, 旋回流条件, 偏流条件の結果をもとに実機評価用の圧力変動を設定していく.

Fig.5 PSDs of pressure fluctuation under rectified flow and swirl flow conditions

Fig.6 PSDs of pressure fluctuation under rectified flow and deflected flow conditions

4. 結 論

1 次系 HL 配管を対象に 1/3 縮尺試験装置を製作し、配管内の流況振動特性の把握を目的に配管入口条件を整流条件、旋回流条件、偏流条件と変えて水流動試験を実施し、流況や圧力変動特性を取得した。その結果、旋回流条件が加わることで、整流条件の時に比べて剥離域は曲げられるが、旋回流が剥離域の大きさに与える影響は小さいことが確認された。また、偏流が加わることで、整流条件の時に比べて剥離点は移動し、剥離域の長さは長く、高さは高くなった。圧力変動 PSD は、整流条件に旋回流が加わっても大きな変化は見られなかったが、偏流が加わることで、圧力変動 PSD に差が見られた。偏流条件は、より実機に近い流動状況の試験となっており、これらの結果を踏まえて配管のランダム振動評価に向けて荷重の設定を行っていく予定である。

文 献

- (1) 白石直, 渡壁寿人, 佐郷ひろみ, 中村友道, 石谷嘉英, 此村守, 山口章, 藤井正 “大口径エルボ管の流動励起振動に関する研究, 第 1 報: 流動状況と圧力変動特性”, 年次大会論文集 (2004), pp.103-104
- (2) Shiraishi, T., Watakabe, H., Sago, H., Kotake, S. and Yamano, H.: “Pressure Fluctuation Characteristics of the Short-Radius Elbow Pipe for FBR in the Postcritical Reynolds Regime”, ICJWSF(2008), p.11
- (3) 白石直, 佐郷ひろみ, 渡壁寿人, 山野秀将, 小竹庄司 “Na 冷却高速炉における大口径配管の流況振動評価に関する研究 (2) ホットレグ 1/3 縮尺試験における超臨界 Re 数領域での圧力変動特性と流動状況”, 原子力学会 2008 年春の大会予稿集(2008), p.M02
- (4) 白石直, 佐郷ひろみ, 渡壁寿人, 徐陽, 相澤康介, 山野秀将 “Na 冷却高速炉における大口径配管の流況振動評価に関する研究 (17) ホットレグ 1/3 縮尺試験における圧力変動への入口旋回流の影響”, 原子力学会 2009 年秋の大会予稿集 (2009), p.C24
- (5) 佐郷ひろみ, 白石直, 渡壁寿人, 徐陽, 相澤康介, 山野秀将 “Na 冷却高速炉における大口径配管の流況振動評価に関する研究 (28) ホットレグ 1/3 縮尺試験における圧力変動への入口旋回流の影響”, 原子力学会 2011 年春の大会予稿集 (2011), p.L03
- (6) Sago, H., Shiraishi, T., Watakabe, H., Xu, Y., Aizawa, K., and Yamano, H., “Study on Flow Induced Vibration Evaluation for a Large Scale JSFR Piping: (3) Pressure Fluctuation Characteristics in 1/3 Scale Hot-Leg Piping Experiments under Deflected Inflow Conditions Due to UIS Structures,” Proceedings of ICONE19 (2011), ICONE19-43712.