

1.2.1.1 ナトリウム冷却炉 大口径・高速流配管における振動特性試験(1/4)

○ 研究の背景 / 目的

ナトリウム冷却炉では、建設コストを低減する方策の一つとして、主冷却系の構成をもんじゅ等で採用された3ループから2ループに削減してシステムを簡素化している。しかし、ループ数の削減により1ループあたりの冷却材流量がもんじゅの6倍程度まで増加するため、冷却系の配管口径を最大約1.3m(もんじゅの約1.5倍以上)まで大型化する。管内流速も従来設計を大幅に上回る9m/s台(もんじゅの約1.5~3倍近く)に増大し、レイノルズ数は最大 4.2×10^7 に達する。

ナトリウム冷却炉は、軽水炉と比べて冷却系を低圧で設計できることから薄肉配管を採用している。このため、大口径かつ薄肉構造の配管系では、流体の乱れに起因する流動励起振動の発生に対して留意する必要があるが、平均流速9m/sを上回る高流速条件の配管系を対象とした流動励起振動特性に関する知見は限られていた。また、キャビテーション等による配管材料の損傷を回避する観点から、大口径の配管内における流速分布等を把握する必要があった。

このような冷却系ループ数を削減したプラント概念の成立性を見通すため、縮尺水試験装置を用いて、エルボを含む配管系での流動及び振動特性に関する詳細データを取得し、実機配管系の振動評価に反映した。

○ 実施内容

- ・ 本試験では、口径が最大の1次系ホットレグ配管(外径1.27m)を対象とした。試験体のスケールとしては、実機配管の流速条件を実現し、かつ実機レイノルズ数に近い領域でのデータを取得する観点から、1/3縮尺とした。
- ・ 試験装置の概略系統図を図1に示す。振動計測を目的としているため、試験配管系に流体以外の外部振動が加わらないように、同図に示すような試験体支持架台を剛構造となるよう工夫をした。
- ・ 試験体としては、管内流況を可視化できるアクリル管と実機配管の剛性も模擬したステンレス鋼管を製作し、試験体各部の速度分布、圧力変動、振動応答を計測した。
- ・ 試験パラメータは、管内流速と水温であり、実流速9.2m/s、60℃温水条件で実機の約1/5のレイノルズ数(= 8×10^6)を達成できる。

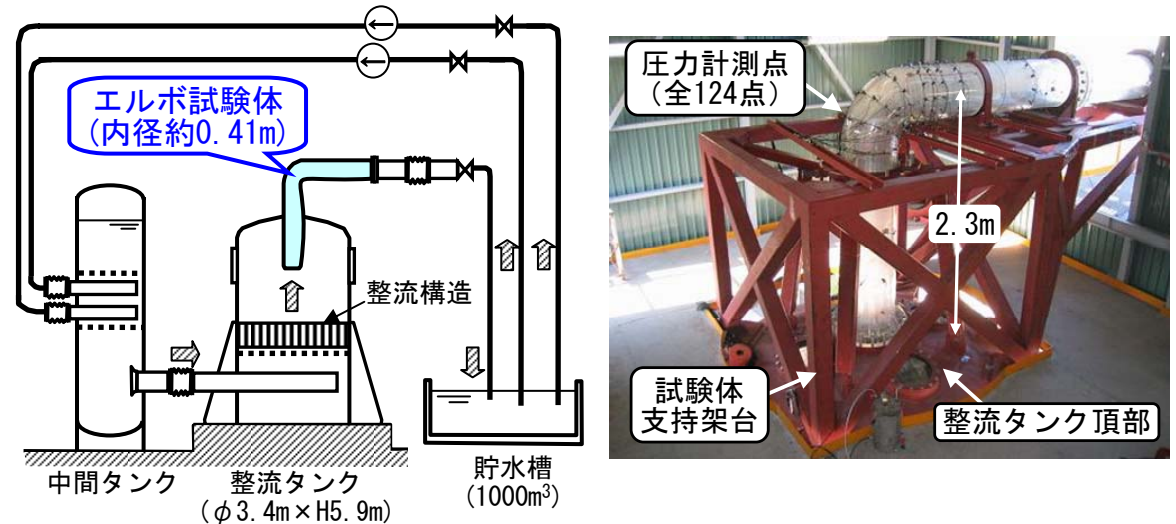


図1 1/3縮尺試験装置の構成

1.2.1.1 ナトリウム冷却炉 大口径・高速流配管における振動特性試験(2/4)

○ フェーズⅡ期間中の研究成果(1)

(a) 配管内の流動特性

平均流速 $U=0.8\sim 9.2\text{m/s}$ 条件で配管内の流況観察及び速度分布計測を実施した。図2に示す剥離域の形成範囲等の全体流況や配管内の速度分布に関しては、レイノルズ数依存性は見られなかった。

なお、剥離域の下流に向かって、周期的に渦が放出されるという剥離流れの特徴を確認した。

また、粒子画像計測法により求めたエルボ部の最大流速(図3)は平均流速の約1.5倍となった。

この最大流速の計測結果に基づいて評価した実機エルボでの局所最低圧力は飽和蒸気圧を上回っており、高流速条件下においてもキャビテーション発生を回避できる見通しを得た。

さらに、エルボでの乱れ強さを評価する観点で、試験体全体での圧力損失係数を求めた(図4)。

本試験は、従来データを1桁以上超える高レイノルズ数領域でのデータを初めて取得したものであり、レイノルズ数が 10^6 を超える超臨界域では圧力損失係数は1.3程度で一定となった。

このように、レイノルズ数が 10^6 以上の領域で圧力損失係数が一定であることから、エルボでの剥離域の大きさ等、流況が大きく変化しないことが推定され、今回取得したデータから実機ホットレグ配管内の流動場とその変動特性、すなわち、エルボでの剥離を伴う流れによる乱れの発生の程度を推定できると考える。

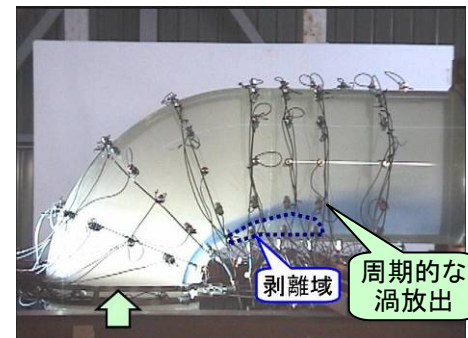
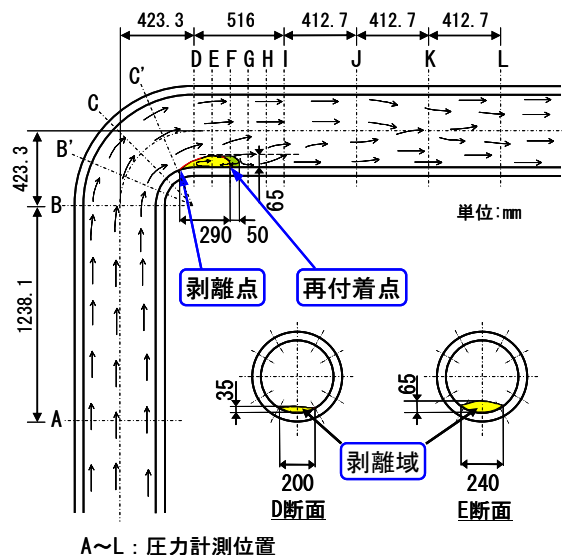


図2 実流速(9.2m/s)条件での流況

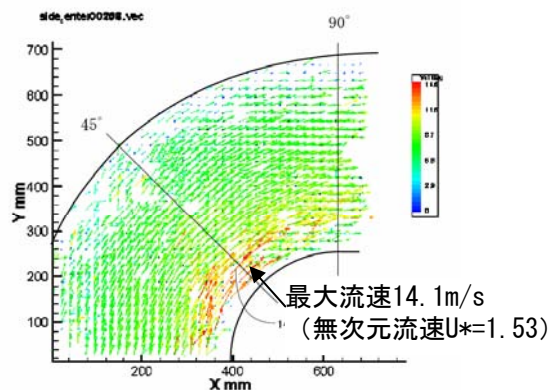


図3 エルボ部の最大流速

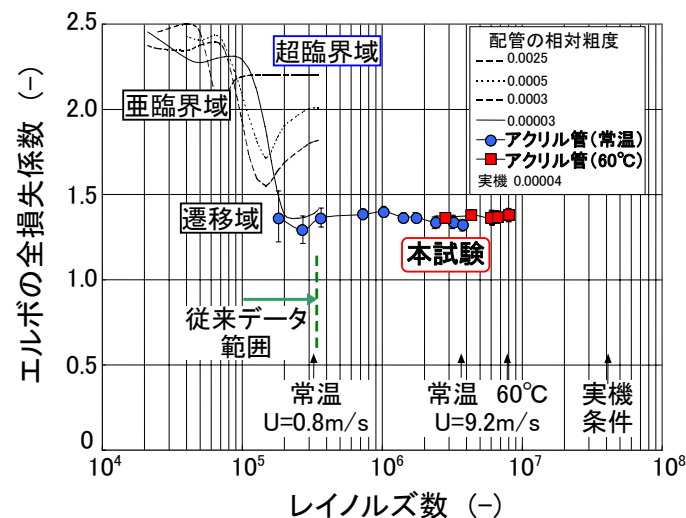


図4 エルボ圧損係数のレイノルズ数依存性

1.2.1.1 ナトリウム冷却炉 大口径・高速流配管における振動特性試験(3/4)

○ フェーズⅡ期間中の研究成果(2)

(b) 圧力変動データの分析

配管への励振源となる管壁上での圧力変動を、試験体に設置した124点の圧力センサで計測した。図5に、実流速9.2m/s条件における試験体各部での無次元圧力変動パワースペクトル密度(PSD) (=圧力変動PSD / ($\rho^2 U^3 D$))、 ρ : 流体密度、 D : 配管内径)を示す。

圧力変動の周波数特性は、エルボでの剥離による乱れの度合いに応じて、流れ方向で領域区分できることがわかり、特に剥離域を含む領域が支配的となった。

また、剥離域での圧力変動には無次元振動数 (= $f D / U$ 、 f : 振動数) 0.45での卓越ピークが現れ、流況観察で見られた剥離域からの渦放出の周期性に対応していることがわかった。

さらに、圧力変動特性のレイノルズ数依存性について検討した。図6は、一例として剥離域を含む断面で計測した圧力変動の振幅値を動圧で規格化した無次元圧力変動係数のレイノルズ数依存性を示す。

水温を変えた場合でも、無次元圧力変動係数はレイノルズ数に対してほぼ一定となっており、各計測点での圧力変動は流速(または動圧)依存の傾向を示すことを確認した。

(c) 振動応答データの分析

ステンレス鋼管を用いて試験体の振動応答や振動モードを計測した。図7は、一例としてエルボ部での振動応力振幅の流速依存性を示す。図中の補助線は、流速の2乗の傾きを示しており、振動応力は流速の2乗(または動圧)に比例する傾向を示している。また、水温を変えた場合でも、応力値はほぼ一致することから、圧力変動特性と同様、振動応答特性にもレイノルズ数に対する依存性がないことを確認した。

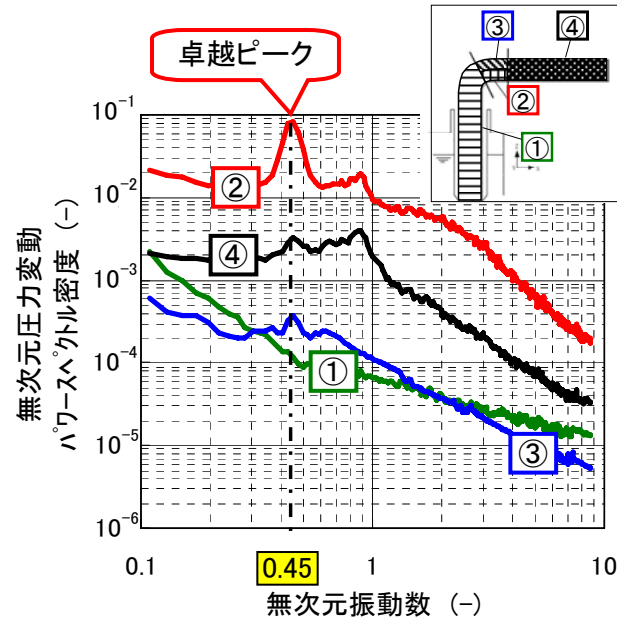


図5 試験体内での無次元圧力変動PSD

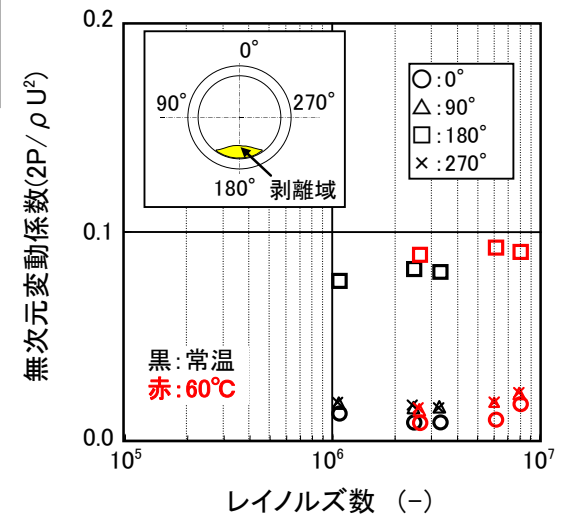


図6 無次元圧力変動係数のレイノルズ数依存性

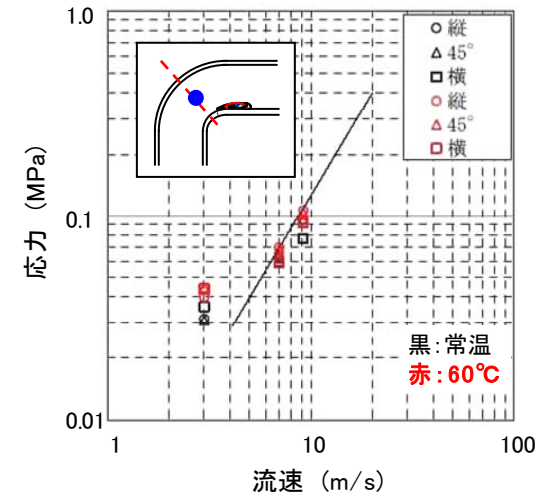


図7 エルボ部振動応力の流速依存性

1.2.1.1 ナトリウム冷却炉 大口径・高速流配管における振動特性試験(4/4)

○ 設計への反映

(a) 実機ホットレグ配管での発生応力

試験結果から、圧力変動特性や振動応答特性は、レイノルズ数依存ではなく、絶対流速依存の傾向を示す。したがって、図5に示した実流速条件での圧力変動特性を、実機とのスケール比、流体の密度比等の相似則を考慮することで、実機薄肉配管の振動応答評価に適用できることが明らかになった。

実機ホットレグ配管を対象に、図8のように、配管への外力として圧力変動を流れ方向に区分して与えた場合の振動応答を評価した。振動による最大応力は、配管材の設計疲労限度(2.25Cr-1Mo鋼での値: 49MPa)を十分に下回っており、配管系の健全性を確保できる見通しを得た。

(b) 振動応答評価手法の検証

振動応答評価手法の検証のため、ステンレス鋼製振動試験体を対象とした解析を行った。試験体の固有振動数に関しては10%以内の精度で評価できるとともに、発生応力は2倍程度の裕度で保守側に評価できる見通しを得た。

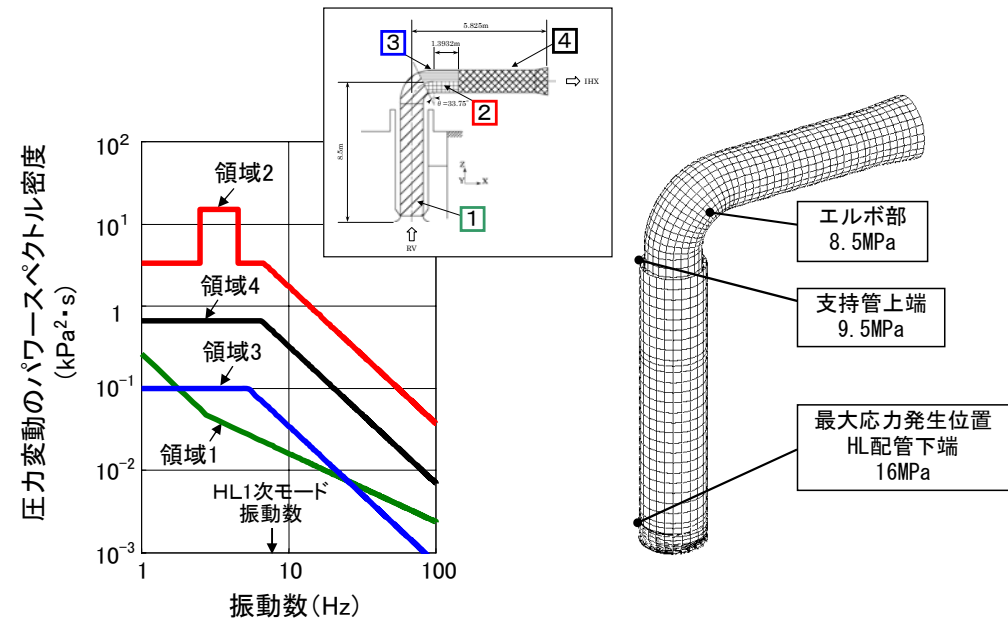


図8 実機ホットレグ配管での発生応力

○ 今後の課題

・ 旋回流の影響確認

実機ホットレグ配管入口部で生じると予想される旋回流が、どの程度配管内の乱れ特性に影響するかを試験により確認する。

・ 多段エルボ体系(コールドレグ配管)での圧力変動特性

上流側エルボでの乱れの影響等を水試験、または詳細流動解析により把握する。

・ 12Cr鋼の疲労データの取得

○ 公開資料

1. 藤井、他: “大口径・高流速配管の流動励起振動試験”、サイクル機構技報、No. 26、JNC TN1340 2004-005 (2005.3)
2. 白石、他: “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)”、日本機械学会 2004年度年次大会講演論文集、Vol. 7、p. 103、(2004)
3. 石谷、他: “大口径エルボ管の流動励起振動に関する研究 (第2報: 励振力分布と相関分析)”、日本機械学会 2004年度年次大会講演論文集、Vol. 7、p. 105、(2004)
4. 藤井、他: “ナトリウム冷却炉に関する設計研究 (2)大口径・高流速配管の流動励起振動試験”、日本原子力学会 2005年春の年会、F10、(2005)
5. T.Fujii, et al.: “Thermal-Hydraulic Design for Reactor Upper Plenum and Large Diameter Piping for An Innovative Sodium-Cooled Fast Reactor”, ICONE13-50210, Beijing, China (2005)
6. T.Nakamura, et al.: “Flow-induced Vibration of a Large-diameter Elbow Piping based on Random Force Measurement caused by Conveying Fluid”, PVP2005-71277, Symposium on Flow-induced Vibration 2005, ASME PVP Conference, Denver, USA (2005)