高低温水合流部の高サイクル熱疲労設計評価基準策定 (全体概要と考え方)

Establishment of a JSME Code for the Evaluation of High-Cycle Thermal Fatigue for Thermal Striping in Mixing Tees with Hot and Cold Water (The Outlines of Series Presentations and the Proposed JSME Code)

○正 守屋祥一（電中研）， 正 福田俊彦（東電）， 正 南 安彦（関電），

MORIYA Shoichi

FUKUDA Toshihiko

MINAMI Yasuhiko

正 小倉健志（東芝），

正 椎名孝次（日立），

正 谷本浩一（三菱重工）

OGURA Kenji

SHIINA Kouji

TANIMOTO Kouichi

This paper reports current efforts to establish a JSME code for the evaluation of high-cycle thermal fatigue for thermal striping in mixing tees with hot and cold water. The proposed design evaluation method has four steps to screen the design parameters one-by-one from the viewpoint of the severity of the thermal load predicted from design conditions. Five charts were produced by thermal striping tests for broad operating conditions of actual LWR power plants and a thermal stress model considering the effects of boundary layer attenuation for fluid temperature fluctuation, in order to realize the design evaluation method.

Key Words : Thermo Striping, High-Cycle Thermal Fatigue, Mixing Tee, JSME Code

1. 緒言

原子力発電や火力発電などの工業プラントにおいて、高・低温水が合流する T 字管部には、局部的に大きな温度ゆらぎが発生する可能性があり、高サイクル熱疲労による配管の損傷が懸念されている。軽水炉プラントでは、国内外のトラブル事例に基づき、電力会社の独自の判断による点検検査を行い、プラントの構造健全性を維持してきている。しかし、設計信頼性をさらに向上させるため、高サイクル熱疲労に関する具体的な評価手法を整備していくことが望まれている。そのため、日本機械学会では、配管の高サイクル熱疲労評価フロー開発の第一ステップとして、「高低温水合流部の温度ゆらぎ」と「閉塞分岐管滞留部の熱成層」との二種類の熱荷重による高サイクル熱疲労評価指針を作成している。この内、本報告では、「高低温水合流部での温度ゆらぎ」による高サイクル熱疲労に関する民間基準策定の取組み、設計評価フローおよび基準策定のために実施した水流動試験の概要について述べる。

2. 基準化への取組み

日本機械学会・動力エネルギーシステム部門の研究部会「熱荷重による構造物損傷評価手法に関する研究会」の下に、平成 12 年 1 月に「軽水炉 WG」を設立し、この WG にて、配管の高サイクル熱疲労に関する評価手法について検討を開始した。この WG の指導のもと、電力共研として評価フロー開発に必要な熱流動試験（平成 12～14 年度）が実施されている。さらに平成 14 年 5 月には同部門の中に「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針基準策定委員会」を設置し、技術指針原案の検討を行っている。この委員会では、本指針原案を平成 14 年 12 月までに策定し、平成 14 年度末までに民間技術指針として制定する予定で検討作業を続けている。

3. 高低温水合流部の温度ゆらぎによる高サイクル熱疲労評価フロー

軽水炉・火力・化学プラント等では、様々な形態の合流・

分岐管が用いられている。これら全ての形態の配管に対する技術指針を策定することは極めて困難である。そこで本指針では、最も基本的な形態と考えられる水を内包した T 管継手での温度ゆらぎを対象とした。合流形態としては、軽水炉プラントの合流形態を参考にして、主管の流れが合流し分岐管に流れる形態（合流形態①）および分岐管からの流れが主管に直角に合流する形態（合流形態②）とした。主管と分岐管の口径比 D_R （分岐管内径/主管内径）については、合流形態①では $D_R=1$ とし、また合流形態②では $D_R=0.2 - 1.0$ とした。

評価フローとしては、Fig.1 に示すように、4 段階のスクリーニング評価により、順次、詳細な評価を行う方式を採用した。本評価法は、サイクル機構で検討されていた高速炉に対する高サイクル熱疲労評価法を参考にして、具体化を図ったものである。各ステップの概要は以下の通りである。

① 第一ステップ：高低温水の温度差に基づくスクリーニング。混合する二流体の合流前の温度差とクリティカル温度差（配管材料の疲労限相当の温度差）とを比較。

② 第二ステップ：高低温水の混合温度差に基づくスクリーニング。二流体の温度差が混合によって減衰する効果および外乱がある場合にはその外乱による効果を考慮した配管内壁近傍での最大温度ゆらぎ幅とクリティカル温度差とを比較。

③ 第三ステップ：応力評価に基づくスクリーニング。流体の温度ゆらぎが配管内壁に伝達されることによって発生する応力のうち、最も厳しい温度変動周波数を考慮した発生応力と配管材料の疲労限とを比較。

④ 第四ステップ：累積疲労損傷評価に基づくスクリーニング。流体の温度変動にレインフロー処理を施し、温度ゆらぎ幅とそれらの発生頻度を求める。各温度ゆらぎ幅から、最も厳しい温度変動周波数を考慮した発生応力を求める。これらの発生応力、発生頻度および工学的に妥当な設計疲れ線図から、プラント供用期間の累積疲労損傷係数 UF を算出し、この値が 1 以下かどうかを評価する方法。なお、

Fig.1 Design Evaluation Flow for Thermal Stripping

このステップで構造健全性が確認されない場合には、詳細評価として、対象部位の FEM 解析（軸対称モデルまたはソリッド詳細モデル）等を実施し、応力時系列のレインフロー処理にて疲労損傷評価を行うこととする。

4. T 字管部の温度ゆらぎ試験と評価チャートの概要

設計評価フローの各ステップで用いる評価チャートを作成するために、T 字管部の温度ゆらぎ試験を実施した。試験の概要を Table.1 に示す。試験模型は合流形態①（衝突）、合流形態②（合流）に相当したものであり、合流形態②では、口径比を 5 ケース変化させた。はじめに透明アクリル製の模型を用いて可視化試験（温度計測含む）を行い、本試験（温度ゆらぎ試験）での温度計測点を決定した。温度ゆらぎ試験では、ステンレス製の配管模型（主管内径：102.3mm）を用いた。この配管模型には、流体温度計測用に 0.5mm シース熱電対（K 型）が配管内壁から流体側に 3mm の位置に約 100 本取り付けられている。また、非常熱伝達率を算定するために、比較的大きな温度ゆらぎが発生する場所に、熱電対を埋め込んだ壁面センサーが 5 個取り付けられている。試験パラメータとしては、主管流速および流速比とし、また、上流側外乱（エルボ、バルブ、ディフューザ）と下流エルボの影響評価についても試験を実施した。高・低温水の温度差は約 40℃と一定とした。なお、これらの試験ケースの一部を、解析コード検証データとして公開する予定としている。

これらの試験等により、以下の 5 種類の設計基準チャートを作成する。

- (1) 温度ゆらぎ幅減衰特性：第 2 ステップで使用されるチャートであり、合流配管の軸方向の無次元距離位置での最大温度ゆらぎ幅を初期温度差で規格化したもの。
- (2) 熱伝達率増倍係数：第 3 ステップで使用されるチャートであり、流体温度ゆらぎに対する熱伝達率（非非常熱伝

達率）を円管乱流の定常熱伝達率で規格化した増倍係数を合流後の配管レイノルズ数との関係で表したもの。

(3) 温度変動周波数に応じた配管の応力応答特性：第 3 ステップで使用されるチャートであり、流体温度が周期的に変動する場合の配管熱応力を求める既往理論⁽¹⁾を用いて、配管の無次元最大熱応力変動幅をビオ数との関係で表したもの。

(4) レインフロー法による流体温度ゆらぎ幅と発生頻度：第 4 ステップで使用されるチャートであり、流体温度変動をレインフロー処理を施し、無次元温度ゆらぎ幅と無次元発生頻度（St 数）との関係を無次元流下距離をパラメータとして表形式で表示したもの

(5) 外乱補正係数：第 2 ステップで使用されるチャートであり、流体温度ゆらぎに及ぼす上・下流外乱の影響を補正係数として表形式で表したもの。

5. 結 言

高低温水合流部の温度ゆらぎによる高サイクル熱疲労に関する評価指針の策定計画とその概要を示した。本指針は、軽水炉の流動条件をカバーするように設計基準チャートを整備したものであるが、本指針の適用範囲であれば、火力プラントやその他の工業プラントにも適用可能なものである。今後、流体温度ゆらぎの熱境界層減衰効果等の導入や温度ゆらぎの時系列特性を表現可能な解析コードの開発によって、本評価指針の一層の合理化と適用範囲の拡大を図っていくことが重要と考える。

本報告は、PWR/BWR 電力 11 社と東芝、日立、三菱重工との共同研究の成果の一部である。

参考文献

- (1) Kasahara, N. and Takasho, H, ASME, PVP2002, DA-05A, (2002)

Table.1 Thermal Stripping Test using Mixing Tees

	Visualization Test	Temp.Fluctuation Test
Material	Acrylic pipe	Metal pipe
Evaluation	<ul style="list-style-type: none">• Flow pattern• Fluid temp. fluctuation	<ul style="list-style-type: none">• Fluid and pipe temp. fluctuation• Unsteady heat transfer coeff.
Model	<div><div><p>(D1, U1, T1) (D1, U2, T2)</p><p><u>Type①</u></p></div><div><p>(D1, U1, T1) (D2, U2, T2)</p><p><u>Type②</u></p></div></div>	
Test parameter	<ul style="list-style-type: none">• Velocity ratio : $K (=U2/U1)$• Main flow velocity : $U1$• Diameter ratio : D_R• Upstream/downstream piping elements (valve, elbow, diffuser)	