

異温度流体混合における熱流動特性の評価

Estimation on the thermal hydraulic characteristics in a non-isothermal fluid mixing

東北大学大学院工学研究科 菅原 良昌 Yoshimasa SUGAWARA Student Member
東北大学大学院工学研究科 Hoseini Seyed MOHAMMAD
東北大学工学部工学研究科 結城 和久 Kazuhisa YUKI
東北大学工学部工学研究科 橋爪 秀利 Hidetoshi Hashizume Member
核燃料サイクル開発機構 田中 正暁 Masaaki Tanaka

In a process of hot and cold fluid mixing, temperature fluctuation in the fluid can occur. When this fluctuation is caused by unstable fluid mixing process, the surrounding structure would be damaged by high-cycle thermal fatigue. This phenomenon is observed in various nuclear power plants, which means it is important to investigate the relation between the fluid mixing process and the thermal fatigue. When there exists a 90-degree bend in the upstream of the mixing area, the fluid mixing process becomes more complex due to the occurrence of a secondary flow. In this study, therefore, the flow field in the mixing area and the temperature fluctuation near the wall are measured with a PIV measuring system and thin thermocouples, respectively, to clarify the influence of the secondary flow on the non-isothermal fluid mixing in the T-junction with the 90-degree bend upstream.

Keywords: Fluid Mixing, Thermal Fatigue, 90-Degree Bend, Secondary Flow, Temperature Fluctuation

1. 緒言

原子力発電所に代表される大型プラントにおいては、異なる温度の流体が混合する領域が数多く存在する。これらの領域では、流体の不安定混合に伴う非定常の温度揺らぎが発生する。温度揺らぎの振幅、周波数によっては構造材に熱疲労が生じる可能性があるため、今後のプラントの設計において熱疲労の緩和は重要な課題である。これまで特に T 字配管合流系を対象とした研究が、数多く実施されており、混合形態と壁面温度変動の関係が明らかにされている[1][2][3]。しかしながら、実際の合流系においては配管合流部の上流側に 90 度ベンドを有する 경우가多く、ベンド内で形成される 2 次流れが上述の流体混合をさらに複雑化している。

このような背景の下に、過去の研究では PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて流体混合領域における可視化実験、ならびに壁近傍に置ける流体温度変動の計測を行っており、その結果、90 度ベンドにより生じる 2 次流れの非定常性により、ベンドが存在しない体系よりも高い温度変動が生じることが明らかになった[4]。

これまで主配管口径 108mm に対して、枝配管口径が小口径 (15mm)、大口径 (31mm) の場合について実験を行

い、混合状態が成層流および偏向噴流の遷移域にある場合に温度変動が極大化されることを確認した[5]。本研究では中口径 (21mm) の場合について実験を行い、これまで得られたデータを総括して温度変動予測式の構築について検討する。また、温度変動が極大化される場合の混合状態の可視化を行い、温度変動の要因について考察する。

2. 試験部詳細および実験条件

Fig.1 に試験部詳細図を示す。試験部における主流は鉛直上向きに流れ、途中、枝管が垂直に流入し T 字配管合流領域を形成する。主配管の口径 $D_m=108\text{mm}$ と一定に対し、枝配管口径 $D_b=15, 21, 31\text{mm}$ と 3 パターンに変化可能である。本実験では $D_b=21\text{mm}$ を用いる。主流流速 U_m を $0.24\sim 0.72\text{m/s}$ 、枝流流速 U_b を $0.23\sim 0.79\text{m/s}$ と変化させる。T 字配管合流部上流 200mm の位置に曲率半径比 1.41 の 90 度ベンドが設置される。壁面温度変動を計測する場合、主流および枝流温度はそれぞれ 20°C および 60°C とし、可視化実験を行う場合は主流および枝流温度は 20°C とする。可視化実験の場合、PIV システムによる流れ場の可視化のため、試験部は肉厚 1mm のアクリル円

連絡先:菅原良昌, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字
6-6-01-2, 東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻
電話: 022-795-7906, e-mail: ysuga@karma.qse.tohoku.ac.jp

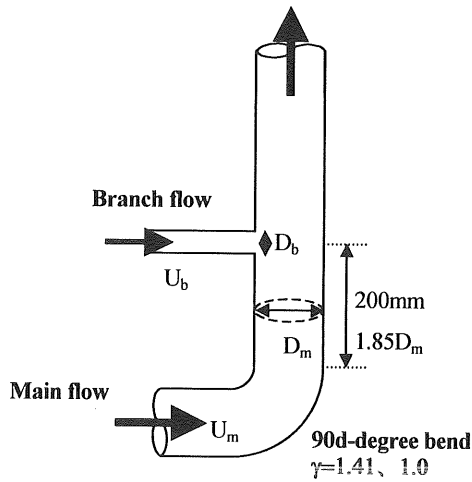


Fig.1 Details of test section

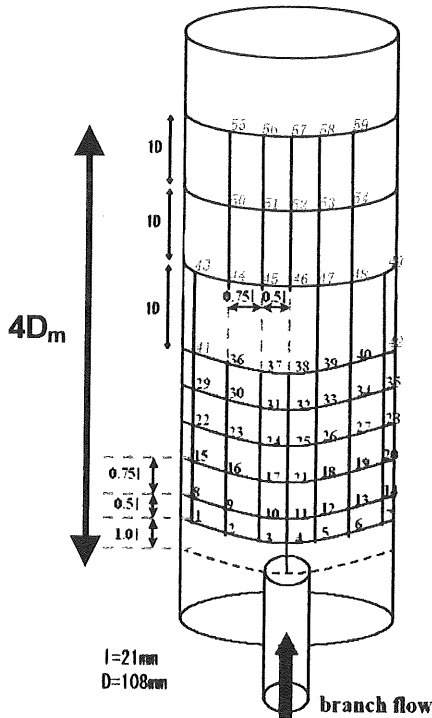


Fig.2 The T.C. section to the downstream

管で構成され、さらにその周りには屈折率整合のためダクト状ウォータージャケットが設置される。

Fig.2 に温度計測位置を示す。合流点の下流側に計 59 本の熱電対が設置され、合流点より約 $4D_m$ 下流まで温度を計測する。温度変動に対する熱応答性を考慮して素線径が 0.1mm の非被覆型 K 型熱電対を使用し、 60Hz で 2100 点 (35s) 計測する。設置位置は壁面から約 1mm である。総サンプリング数 6300 点から温度変動強度 ΔT_{rms} を次式

で求める。

$$\Delta T_{rms} = \left(\sqrt{\sum (T_i - T_m)^2 / n} \right) / \Delta T$$

ここで、 T_i 、 T_m はそれぞれ瞬時および平均の温度、 n は温度データのサンプリング数である。

3. 実験結果および考察

3.1 $D_b=21\text{mm}$ における温度変動強度 ΔT_{rms} の特性

Fig.3 は枝流流速 U_b を 0.23 、 0.39 、 0.63 、 0.79m/s と変化させた場合の温度変動強度分布であり、各座標は $\theta=21\text{mm}$ で規格化されている。また熱電対設置点以外の領域はスプライン補間されている。Fig.3 から枝流合流部下流域に中心軸から左右にずれた位置に温度変動のピークが生じていることが確認できる。枝流流速が 0.23m/s の場合、枝流は主流壁近傍を下流方向に流れていると考えられ、高温噴流が常に存在する領域では温度は高いが、温度変動はさほど大きくないと考えられる。しかしながら、高温噴流は 2 次流れの非定常挙動により周方向に振動するため左右にずれた位置にピークが存在する。またこのピーク値は U_b の増加とともに減少しているが、これは枝流が主流深く侵入して流れるためである。これは $U_m=0.24$ 、 0.72m/s の場合も同様であった。そこで本研究では測定範囲内において得られる温度変動強度の最大値 $\Delta T_{rms, \max}$ に

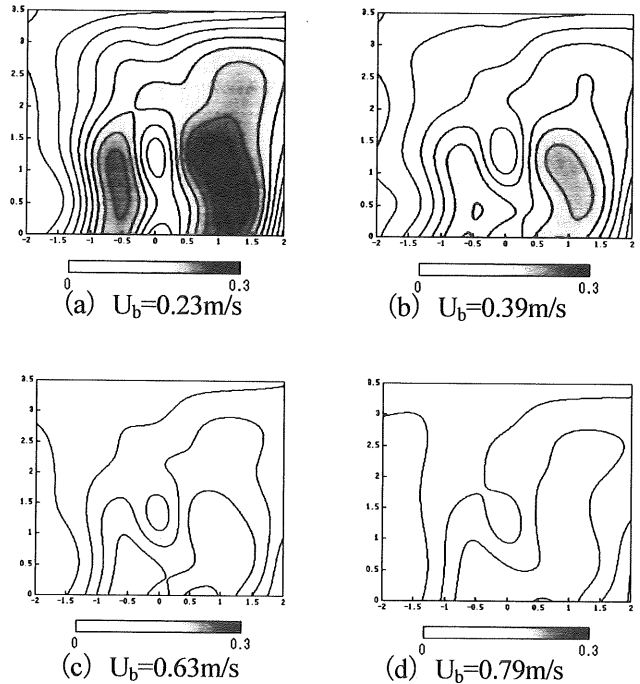


Fig.3 The effect of the branch velocity on the ΔT_{rms}

着目し評価した。

Fig.4は $\Delta T_{rms,max}$ に対する枝流流速の影響を示している。比較の為、同時に $D_b=15, 31\text{mm}$ の場合も示す。Fig.4より、最も枝配管口径が小さい $D_b=15\text{mm}$ の場合では枝流流量が小さいため、枝流は主流中で障害物としての役割を果たさず2次流れに追従してエンタルピーが拡散されるため、 $\Delta T_{rms,max}$ は単調減少の傾向を示すと考えられる(Fig.4(a))。今回実験を行った $D_b=21\text{mm}$ の場合では、主流流速 $U_m=0.72\text{m/s}$ の時に枝流流速 $U_b=0.4\text{m/s}$ 付近で極値を取る(Fig.4(b))。また、以前実験を行った $D_b=31\text{mm}$ の場合には、 $U_m=0.72\text{m/s}$ だけでなく $U_m=0.48\text{m/s}$ の時にも極値を取る事が確認されている(Fig.4(c))。すなわち枝配管口径 D_b が大きく且つ主流流速 U_m が速い場合、つまり枝流による障害作用が大きい場合に $\Delta T_{rms,max}$ は極大化される。

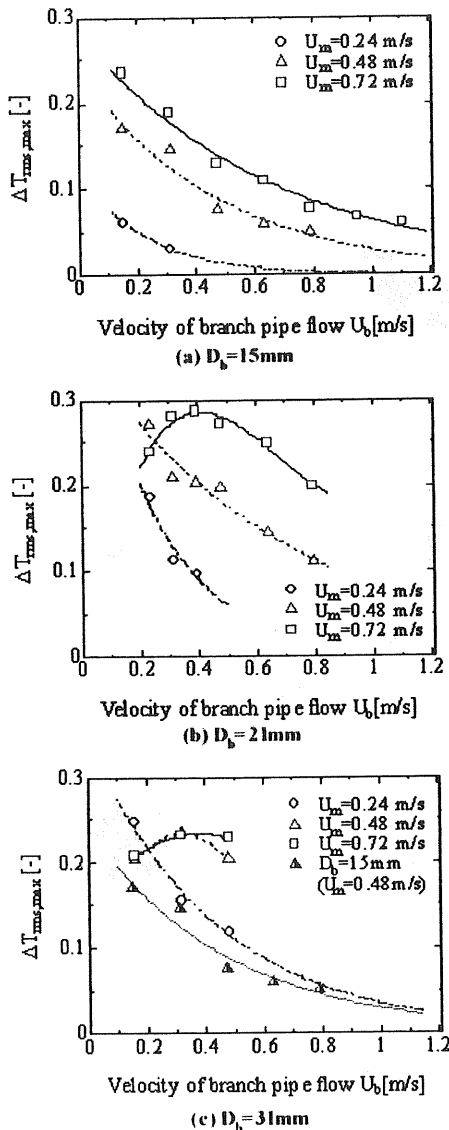


Fig.4 The effect of the branch velocity on the $\Delta T_{rms,max}$

PIVによる可視化から混合形態は大きく、Fig.5に示す三種類に分けられる。ピーク付近の混合条件ではFig.5(b)に示すような噴流後方に循環渦の生成・消滅が確認され、循環渦の生成・消滅が温度変動を大きくする要因であることがわかる。また、枝配管口径 D_b が大きくなるほど枝流流量が増加するため、温度変動が増加すると考えられるが、 $D_b=31\text{mm}$ になると枝流の慣性が大きくなり振動しにくくなる。それゆえ温度変動は $D_b=21\text{mm}$ ほど大きくならなかったと考えられる。

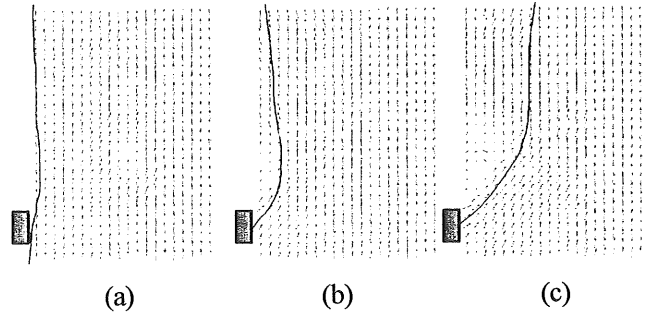


Fig.5 Fluid mixing patterns
(a)Stratified flow (b)Re-attachment flow
(c)Turn-jet flow

3.2 流速比 (U_b/U_m) が温度変動に与える影響

Fig.6に流速比 (U_b/U_m) で整理した温度変動強度の最大値 $\Delta T_{rms,max}$ を示す。 $D_b=15, 31\text{mm}$ における $\Delta T_{rms,max}$ も同時に示している。流速比 U_b/U_m をパラメータにした場合においても、 $U_b/U_m=0.6$ 付近にピークがあることが確認できる。図中A付近の流速比において混合形態は成層流の形を取る(Fig.5(a))。この時、枝流が壁近傍を流れるため、温度は大きいと考えられるが温度変動はさほど大きくならない。さらに流速比が大きくなったBにおいて混合形態は再附着噴流の形を取る(Fig.5(b))。B付近における温度変動の要因は、後流の発生、2次流れによる周方向および径方向振動が考えられる。後流とは、枝流が障害物の役割を果たすことにより枝流下流側に発生するカルマン渦列に似た渦を指す。B付近においては枝流の形状が崩れにくく、かつ枝流が壁近傍で大きく振動するために上記の3つの要因が発生しやすい。よって温度変動が最も大きくなっていると考えられる。Cの領域では混合形態は偏向噴流の形を取る(Fig.5(c))。Cでは流速比の増大とともに温度変動は減少している。これは枝流が主流深く進入するためである。

また、口径比 D_b/D_m の増大に伴い温度変動は増加する傾

向にあるが、 $D_b=21\text{mm}$ のときに最大値を取っている。これは先にも述べたが、大口径になると噴流の慣性力が強くなり、噴流が振動しにくくなる為である。

以上の事をより定量的に議論するため速度変動分布に注目する。ここで、 $D_b=21\text{mm}$ の場合で最も温度変動が高い値を示している $U_b=0.4\text{m/s}$ 付近の混合形態を議論する。Fig.7は $U_b=0.46\text{m/s}$ で $U_m=0.24, 0.48, 0.72\text{m/s}$ まで変化させた場合における縦断面及び水平断面の速度変動強度を示している。主流速度 U_m が $0.24, 0.48\text{m/s}$ の場合、噴流の侵入位置周辺で速度変動が高いのに対し、 $U_m=0.72\text{m/s}$ の場合では循環渦の生成・消滅に伴い強い速度変動領域そのものが壁面へ再付着する分布が確認され、これが壁面温度変動を最大化する要因であると考えられる。水平断面における分布において、 $U_m=0.24\text{m/s}$ の場合では90度バンドが存在しない体系における変動分布に類似しているが、 $U_m=0.48, 0.72\text{m/s}$ においては類似性は見られない。これは主流流速の増大に伴い混合場が大きく変化していることを示唆しており、縦断面も含めたより3次元的な議論を展開していく必要がある。

4. 混合形態ごとの温度変動予測式の構築

温度変動予測の際、流速比の変化に伴い変化する流動構造を無視することは難しい。従って温度変動予測式を成層流の場合、再付着噴流から偏向噴流の場合と二つに分けて構築する。

Fig.8 および Fig.9 に速度比および口径比を用いて最大温度変動強度 $\Delta T_{rms, max}$ の回帰分析結果を示す。成層流の場合において 20%以内の誤差で予想可能であることがわかる。一方、再付着噴流から偏向噴流の場合においても約 8 割、温度変動を予測することが可能である。重回帰曲線よりややずれているデータは温度変動が大きいという特徴がある。温度変動が大きい領域は混合形態が再付着噴流の領域であるが、この領域における混合形態が正確に予測できていないために、重回帰曲線からずれてしまったと考えられる。Fig.10 はデータ整理に用いた混合形態の分類であり、目視により得られたものである。同時にバンドが存在しない体系における分類も示す[3]。Fig.10 より上流に 90 度バンドが存在する体系では、高温噴流はバンドが存在しない体系より深く主流中に侵入している。予測式の高精度化ならびに T 字合流管の設計指針を得る為にも、混合形態をより定量的に予測する必要があると考えられる。

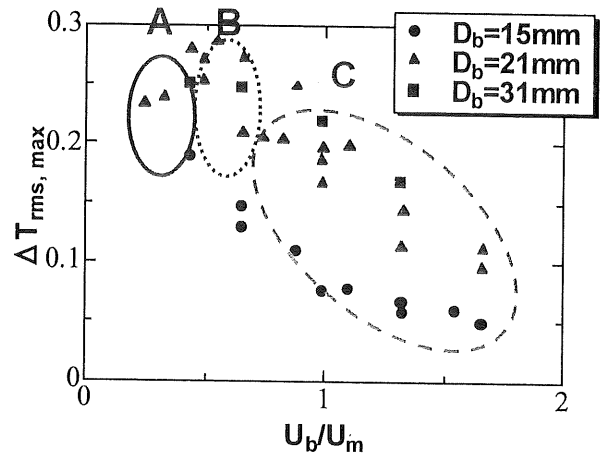


Fig.6 Effect of velocity ratio on $\Delta T_{rms, max}$

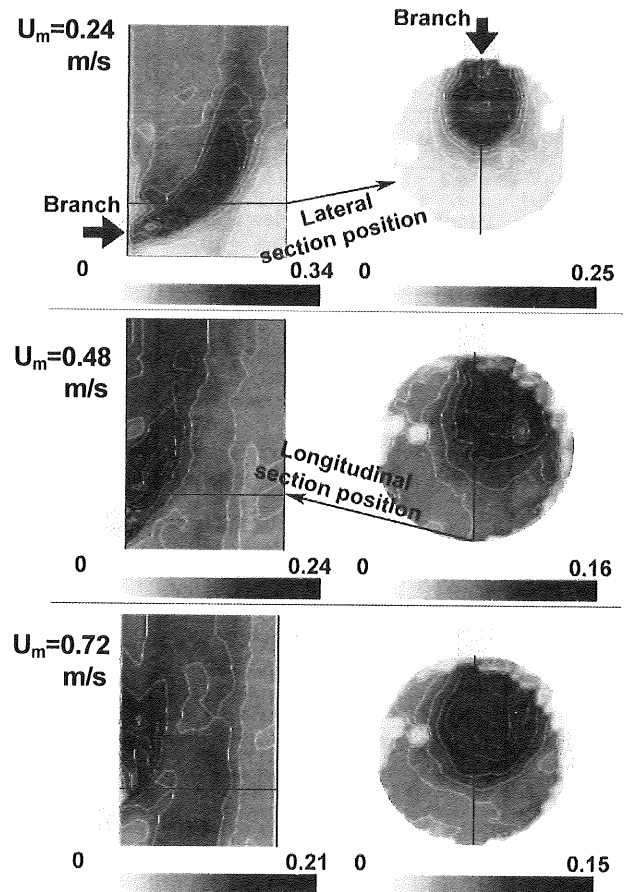


Fig.7 Distribution of velocity fluctuation intensity ($D_b=21\text{mm}$, $U_b=0.46\text{m/s}$)

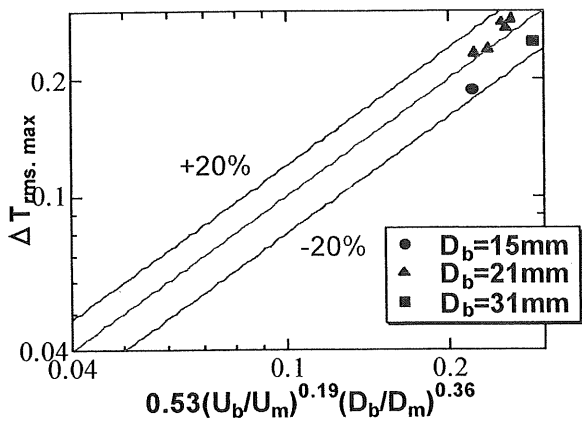


Fig.8 Prediction of $\Delta T_{rms,max}$
(Stratified flow)

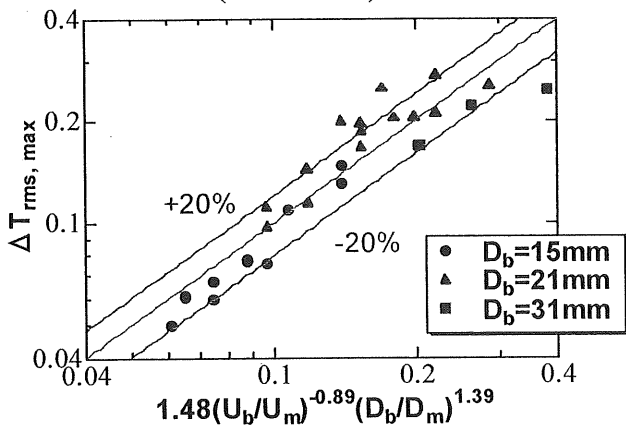
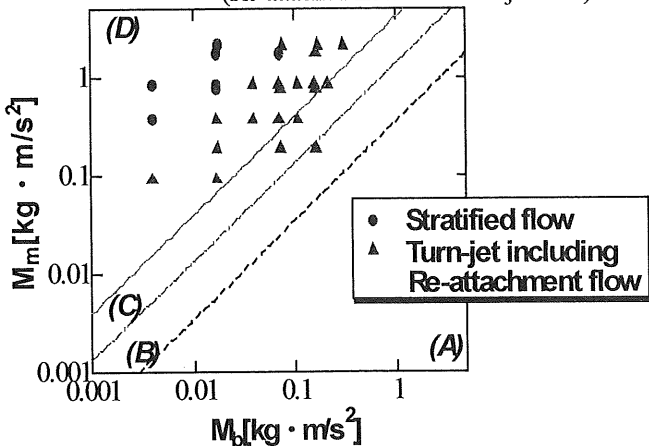


Fig.9 Prediction of $\Delta T_{rms,max}$
(Re-attached flow ~ Turn-jet flow)



Classification without 90-degree bend
 (A) Impinging Jet
 ---- (M_m/M_b)=0.35
 (B) Deflecting Jet
 ---- (M_m/M_b)=1.35
 (C) Re-attachment Jet
 ---- (M_m/M_b)=4.00
 (D) Wall Jet

Fig.10 Classification of fluid mixing pattern

5 結言

上流に90度ベンドを有するT字配管合流領域における異温度流体混合実験により、以下の知見が得られた。

- 1) 混合形態が再付着噴流のとき、後流および2次流れの影響を受け枝流が激しく振動するため、壁近傍における温度変動が最も激しくなる。
- 2) $D_b=21\text{mm}$ 、 $U_b=0.46\text{m/s}$ における可視化より、主流流速の増大に伴い強い速度変動領域が壁面へ再付着する為、温度変動が大きくなる。
- 3) 水平断面の流れ場は、主流が低流速においては90度ベンドが存在しない体系における変動分布に類似しているが、主流流速が増大すると類似性は見られず、混合場が大きく変化しているため、縦断面も含めた議論を展開していく必要がある。
- 4) 混合形態ごとの温度変動予測式により、誤差20%以内に温度変動を予測可能である。
- 5) 今後、温度変動予測式の高精度化のために混合形態をより定量的に分類する必要がある。

謝辞

本研究は核燃料サイクル開発機構の先行基礎工学研究の支持を受けて実施されたものであり、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 高橋志郎・他5名 “T字形合流配管部における温度差を有する二流体の熱的混合特性”、日本機械学会論文集 (B編) 63巻613号 (1997-9)、p.68-74
- [2] Minoru IGARASHI, Masaaki TANAKA, Nobuyuki KIMURA and Hideki KAMIDE “STUDY ON FLUID MIXING PHENOMENA FOR EVALUATION OF THERMAL STRIPING IN MIXING TEE” NURETH-10, (2003)
- [3] Masaaki TANAKA, Toshiharu MURAMATSU “TURBULENCE MIXING CHARACTERISTICS IN T-JUNCTION PIPE WITH ELBOW PIPE IN UPSTREAM SIDE” NUTHHOS-6, (2004)
- [4] 結城和久、田嶋祐、戸田三朗、橋爪秀利、村松壽晴 “上流に90度ベンドを有するT字配管合流領域での熱

的混合特性に対する曲率半径比の影響”、日本機械学会論文集 (B 編) 70 卷 700 号 (2004-12)、p118-125

- [5] Kazuhisa YUKI, Yoshimasa SUGAWARA, Hoseini Seyed MOHAMMAD, Hidetoshi HASHIZUME, Saburo TODA, Masaaki TANAKA, Toshiharu MURAMATSU
“PREDICTION OF THE WALL TEMPERATURE FLUCTUATION IN A T-JUNCTION AREA WITH A 90-DEGREE BEND UPSTREAM” NUTHOS-6, (2004)