

直管の閉塞分岐配管への侵入深さに対する配管形状の影響

Effect of Pipe Shapes on Penetration Length in a Closed Straight Branch Pipe

中村 晶 (Akira Nakamura)*¹ 三好 弘二 (Koji Miyoshi)*¹ 竹中 信幸 (Nobuyuki Takenaka)*²

要約 原子力発電所では主配管のドレン系や安全注入系のように、通常運転中は弁で閉じられた分岐配管が存在する。主配管の流れは分岐配管にキャビティフローを誘起し、主配管の熱水が分岐配管内に旋回渦となって侵入し、熱水は滞留している冷水との間に熱成層界面を形成する。熱成層界面が揺動すると温度変動が生じ、熱疲労が起こる場合がある。本研究はこの旋回渦の侵入深さの評価を高度化することを目的とし、等温条件で旋回渦の侵入深さを実験により計測した。基本的な分岐部形状である直角のダクトからの分岐に対して、面取を施した場合、分岐管に隙間があることを模擬した場合、および主配管が円管で分岐部近傍に曲率を有することを模擬した場合を比較した。その結果、分岐部に面取がある場合には旋回渦の侵入深さが分岐管口径の1倍程度少なくなった。隙間のある分岐部形状と曲率があるという主配管形状については、旋回渦の侵入深さに影響しないことが分かった。

キーワード キャビティフロー, 熱成層, 旋回渦, 分岐管, 侵入深さ

Abstract Branch pipes which are closed during normal reactor operation are connected to main flow pipes in a nuclear power plant for coolant drain or for safety injection systems. The main flow initiates cavity flow in a branch pipe, and hot water penetrates into the branch pipe forming swirl flow and makes a thermal stratified layer between this spiral flow and stagnant cold water. It has been reported that large temperature fluctuation causes thermal fatigue when the penetration fluctuates. To enhance the estimation of the penetration length, the penetration length in the uniform temperature condition was measured in this study. The three cases of experiment are compared to the base case which uses a simple duct main pipe and a branch pipe: a chamfered edge branch pipe, a branch pipe with a joint gap and a rounded main pipe at the corner which imitates a circular main pipe. The penetration length results of the chamfered edge case were smaller about 1 branch pipe diameter than the simple duct results (i.e. base case). The results of joint gap case and the rounded main pipe case did not show any effect on the penetration length.

Keywords cavity flow, thermal stratification, swirl vortex, branch pipe, penetration length

1. 序論

上端が主配管に接続され末端が閉止された配管（以下、閉塞分岐配管と呼ぶ）には主配管の流れにより誘起されるキャビティフローが発生する。主配管と分岐配管の間に温度差があるときに、このキャビティフローが主配管の水を分岐配管へと輸送するため、管内に急峻な温度勾配をもつ熱成層界面が発生する。このキャビティフローの強さが時間的に変動することに伴い熱成層界面が移動し、その温度変動により配管に疲労が生じる場合がある。

日本機械学会ではこのような温度変動現象による配管への影響評価手法を確立するため、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」⁽¹⁾（以下、指針）を策定した。指針は電力会社・メーカーにより行われた実験^{(2)~(4)}によるデータをもとに策定され、水を内包する配管での高低温水の合流・混合により生じる熱疲労の評価、閉塞分岐配管での熱成層界面位置の評価を行う方法を提供している。閉塞分岐配管の評価で重要なことは、熱成層界面位置の同定である。分岐管にエルボ等の曲がり部があり、曲がり部に熱成層界面があると継続的に温度変動が生じることが分かっている⁽¹⁾。

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 神戸大学工学部

曲がり部の温度変動により生じる熱疲労の評価方法は今後の課題である。

これまで中森ら⁽⁵⁾や白石ら⁽⁶⁾、筆者らを含めた研究^{(7)~(13)}で、閉塞分岐配管に起こる熱成層、特に温度変動の原因である熱成層界面の変動現象について調べられてきた。筆者らは分岐配管に熱を輸送するキャビティフローと旋回渦が持つ渦構造の特性を明らかにすることで、温度変動を引き起こす要因となる流体力学的現象が明らかになると考えた。現象の理解、メカニズム、影響因子を明らかにすることで、熱成層界面の発生場所の予測評価がより妥当なものとなる。そのため、可視化実験により渦構造と温度変動の関係を調べ、分岐配管が曲管の場合に長周期で温度変動が生じること、そして旋回渦の流速変動が温度変動に関連していることを明らかにしてきた^{(7)~(13)}。

一方、発電所の配管接合部の形状が、侵入深さに及ぼす影響はあまり調べられていない。本報告では、配管分岐部に面取を施したり、差込みのソケット溶接であったりという形状を模擬した試験体を作成し、これまで調べた単純な直角分岐との差違を調べた。

2. おもな記号

D : 分岐配管内径[m]

L : 管軸で定義される分岐配管分岐部からの距離[m]

T : 温度[°C]

U : 主配管平均流速[m/s]

添 字

m : 主配管

b : 分岐配管

3. 実験内容

3.1 実験装置および方法

実験には図1に示す神戸大学工学部の熱流動実験ループを用いた。作動流体には脱気した水を用い、ポンプ入熱による流体温度上昇を熱交換器の冷却水流量により制御した。ポンプから送り出された水はバルブを通り、試験部を流れ、熱交換器を経てポンプへと戻る。電磁流量計を用いて試験部流速を平均流速として計測した。試験部の主配管形状は図2もしくは図3に示すように矩形(ダクト状)に絞り、流速を確保した。主配管内の流れが十分に発達するようにダクト入口から分岐配管分岐部までの距離は600mmとし、高

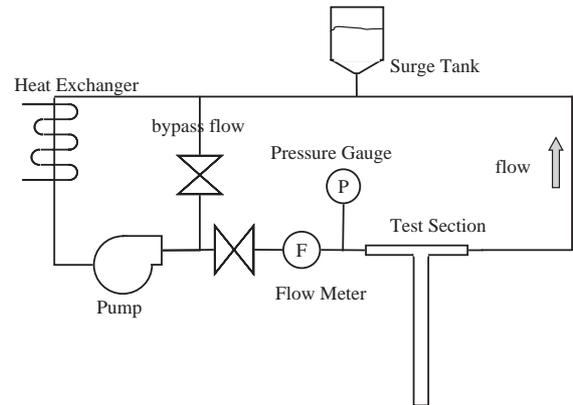


図1 実験ループ

さ10mmの流路の場合で水力等価直径の約35倍を取った。分岐配管は図2に示すようなアクリル製の直管を用い、内径 D_b はプラントで用いられる2インチ配管と同じ43mmとした。

それぞれの試験において主配管流速を4m/sから1m/sずつ増加させ、分岐配管への侵入深さの測定、渦構造の観察を行った。渦構造の観察には、濡れ性をアルコールで改善して密度が常温水とほぼ等しくなった発泡スチロール粉末をトレーサー粒子として用いた。主配管と分岐配管の水温に温度差がない等温場で流動状態を調べるため、室温約25°Cの水を分岐配管内に滞留させ、主配管の水をポンプで循環させながら冷却水量の調整により室温と同じになるように調整した。これまでの研究^{(9)~(13)}により、閉塞分岐配管内には図4のような流れが生じることが分かっている。600秒程度のビデオ撮影によりトレーサー粒子の移動を見て旋回渦の到達位置、すなわち侵入深さ L_s の最大値を計測した。

3.2 試験部形状および実験条件

実機では配管の分岐部には、工場で作成して内面を仕上げる場合や、現地で管台に差込み溶接を行う場合などがある。また主配管の口径は様々で、分岐管との口径比の違いもある。これらの形状を一般化して系統的に調べることは多大な労力を要するため、今回は次のように典型的な形状を念頭に単純化して、影響の有無を調べた。

試験部形状と実験条件を表1に示す。

1) 分岐部形状

これまで実施した大塚ら⁽¹⁰⁾の実験では、図5(a)の

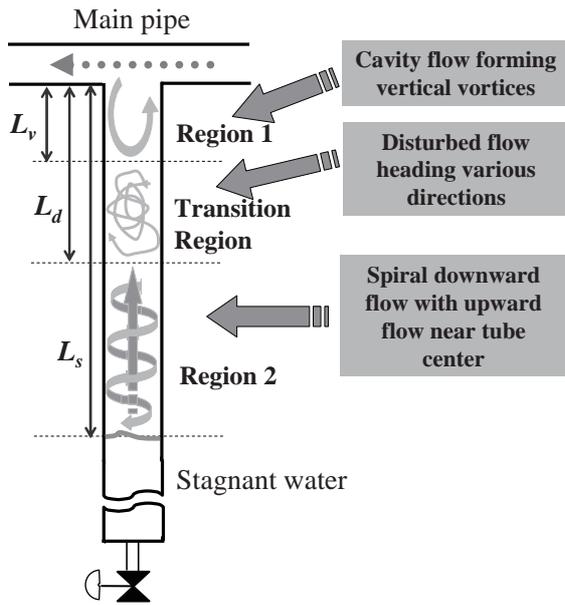


図4 閉塞分岐配管内の流れ⁽⁷⁾

ように面取なしの角がある分岐部形状の試験部 a を用いた。本研究では角に面取を施した場合を想定し、図 5(b)のように分岐部に曲率 $r = 19\text{mm}$ を施した試験部 b を作成した。上流から見た主配管断面形状は図 2 と同じである。

また、実機では主配管に管台を接続し、分岐配管を差込んでソケット溶接を施す場合がある。そこで本研究では管台と差込まれた管の間に生じる隙間を想定し、図 5(c)のように分岐部近傍の分岐管に幅 3mm、深さ 3mm の隙間（くぼみ）を付けた試験体 c を作成した。

2) 主配管断面形状

実機では配管口径が大きいので、その曲率が無視できるものとして、主配管をダクト状にしてきた。十分な主流流速を得るために図 2 の主配管高さは 10mm としたが、この流路高さが侵入深さに影響する可能性を考え、10~40mm に変えた試験体を図 6(a)のように作成した。主配管の軸方向断面形状は図 3 に示す試験部 B のタイプである。流路高さ 40mm の場合では、アクリル試験部入口から分岐部までの距離 600mm は水力等価直径の約 13 倍となった。流路断面積が増加したために主流流速は表 1 のように 8m/s 以下となっ

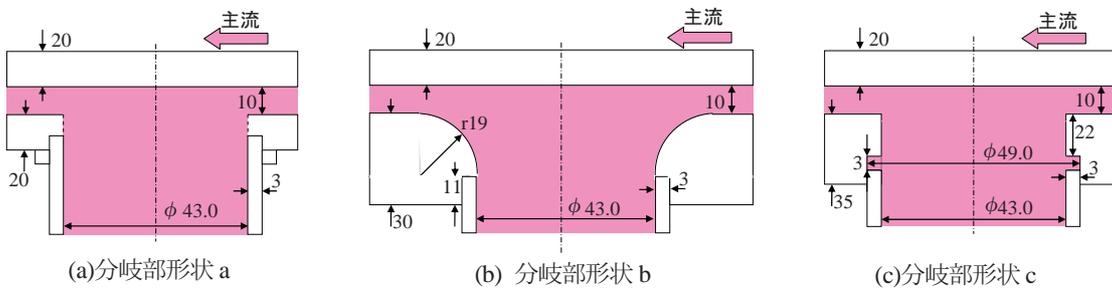


図5 閉塞分岐配管の試験部 A における分岐部形状

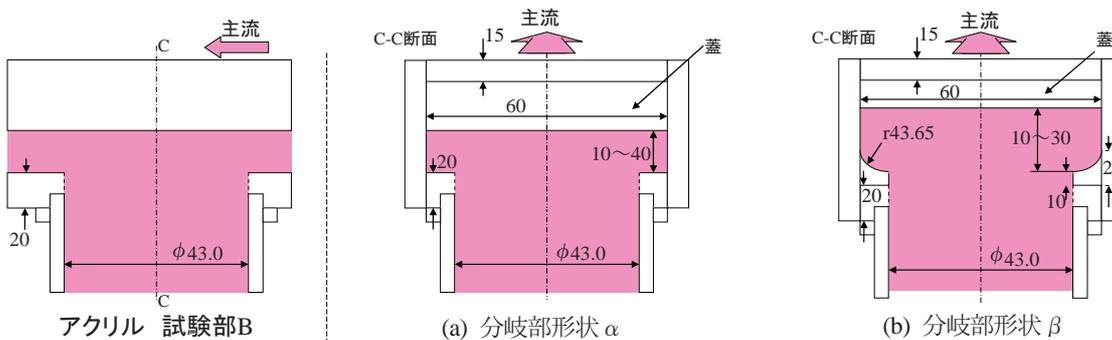


図6 閉塞分岐配管の試験部 B の形状

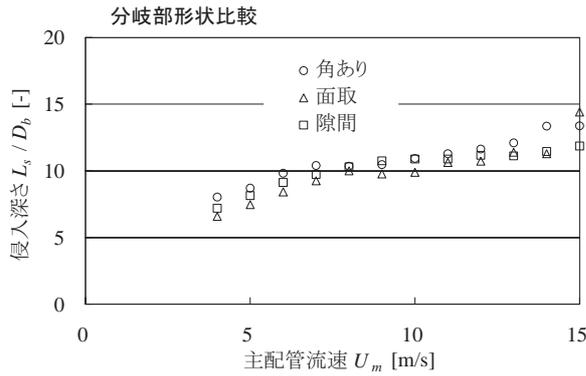


図7 侵入深さに対する分岐部形状の影響⁽¹⁴⁾

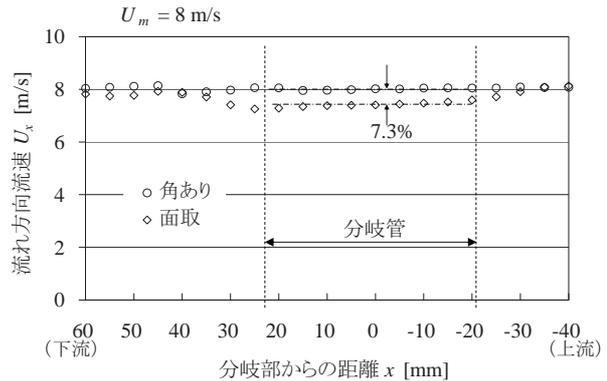


図8 角ありと面取の場合の分岐管形状に対する流れ方向流速の違い ($U_m = 8\text{m/s}$, 主配管中心軸上)

た。

また、主配管の曲率が無視できず、侵入深さに影響する可能性を考えて、図6(b)に示すように、主配管の角のうち分岐管側に丸みRを付けた試験体を作成した。主配管には分岐配管の2倍の直径を想定し、分岐配管側の角に4インチ配管に相当する曲率 $r = 43.7\text{mm}$ の中子を挿入した。同時に流路高さを変えて影響を調べた。

4. 実験結果

3章で述べた分岐部形状と主配管断面形状を変えた試験体を用い、分岐配管と主配管の水温が同じである等温条件で、表1のように主流流速をパラメータに旋回渦の侵入深さを計測した実験結果を述べる。

4.1 分岐部形状の影響

図7に分岐部形状を図5(a)~(c)の場合で主流流速を変化させたときの侵入深さ⁽¹⁴⁾を示す。面取を付けた場合の侵入深さは他の場合よりも $1D_b$ ほど浅く推移しているが、全体としてほぼ同程度であり、分岐部形状の影響はほとんどみられない。

図5(b)のように面取があれば、主流が分岐管内に流入しやすくなる、または図4の領域1で分岐部直下に生じるセル状渦^{(7),(8)}と主流とが接する面積が増えることで旋回速度が増加する、などの効果が予想される。これらの効果は定性的には侵入深さを大きくさせると考えられるが、図7では逆に $1D_b$ ほど減少している。そこで分岐部のある位置での主流の流れ方向流速を調べた結果を図8に示す。計測位置は主流の中心軸

上で、分岐管中心軸を原点とする流れ方向の距離で -40mm (上流) から 60mm (下流) の範囲である。図8から分かるように、面取なしの場合に比べて面取あり場合の分岐部近傍の主流流速は、分岐管位置での平均で7.3%低下した。これは、面取があることにより分岐部近傍で有効流路断面積が大きくなり、面取が無い場合に比べて主流流速が遅くなったものと考えられる。主流流速が遅くなった影響のため、侵入深さが減少したと考えられる。

分岐管内に隙間がある図5(c)場合には、分岐管内に主流により励起されるキャビティフローが隙間にも流れ込むと考えられるが、キャビティフローの速度には影響を及ぼすほどではないため、侵入深さには影響が無かったと考えられる。

4.2 主配管断面形状の影響

図9には、矩形流路で流路高さを変えた場合について、主流流速に対する侵入深さを調べた結果を示す。流路高さ $10\sim 40\text{mm}$ の侵入深さのデータ点は重なっていて、流路高さの影響が無いことが分かる。

図10には、分岐配管側の主流管の角に曲率を付けた図6(b)の場合で流路高さを変えて、主流流速に対する侵入深さを調べた結果⁽¹⁵⁾を示す。流路高さ $10\sim 30\text{mm}$ の侵入深さは重なっていて、高さの影響が無いことが分かる。

図11には矩形流路と曲率あり矩形流路との差を示す。データはほぼ重なっており、分岐配管側の主配管の角に曲率があっても侵入深さには影響が無い。どちらの場合も流路高さは 10mm としたが、図9,10で既に示したとおり高さ影響は無いため、他の流路高さ

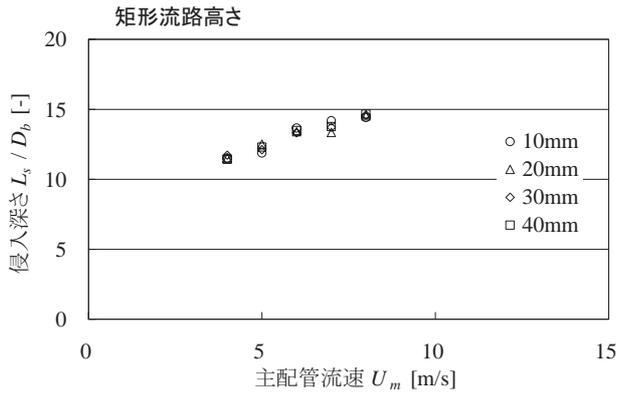


図9 侵入深さに対する主配管流路高さの影響⁽¹⁵⁾

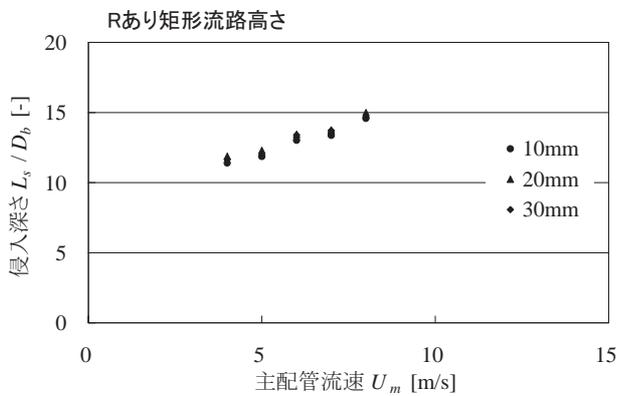


図10 侵入深さに対する曲率を付けた主流流路での流路高さの影響⁽¹⁵⁾

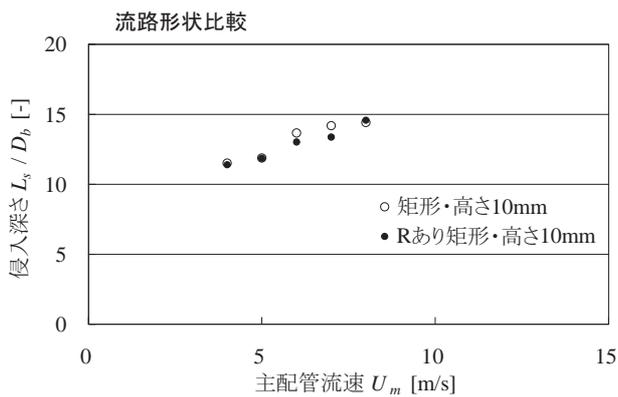


図11 侵入深さに対する主配管形状の影響

条件でも同様である。

5. 結論

本研究では分岐部に面取と隙間がある場合、および

主配管の曲率を模擬して角に丸みを付けた場合について、主流流速を変えて分岐配管への侵入深さを計測し、以下の結論を得た。

- (1) 分岐部に曲率半径 19mm の面取を施した場合を調べ、単純な矩形流路での侵入深さに対して $1D_b$ 程度短くなることが分かった。
- (2) 分岐配管内に幅 3mm、深さ 3mm の隙間がある場合を調べ、単純な矩形流路での侵入深さに対して差が無いことが分かった。
- (3) 矩形の主配管の高さを 10~40mm と変えて調べ、主配管高さの影響が無いことが分かった。
- (4) 分岐配管が分岐する方向の主配管の角に曲率半径 43.7mm の中子を挿入した場合を調べ、単純な矩形流路での侵入深さに対して差が無いことが分かった。

文献

- (1) 日本機械学会, JSME S 017 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針 (2003).
- (2) 谷本浩一, 白石直, 鈴木盛喜, 小倉健志, 椎名孝次, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 滞留部の熱成層化による高サイクル熱疲労に関する研究 (L₁評価手法の概要), 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻, 689 号, pp.176-183 (2004).
- (3) 近藤喜之, 谷本浩一, 白石直, 鈴木盛喜, 小倉健志, 椎名孝次, 福田俊彦, 千種直樹, 守屋祥一, 滞留部の熱成層化による高サイクル熱疲労に関する研究 (L_{sh}評価手法の概要), 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻, 689 号, pp.184-191 (2004).
- (4) 椎名孝次, 河村勉, 大塚雅哉, 水野正, 久恒眞一, 小倉健志, 谷本浩一, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 班目春樹, 閉塞分岐管滞留部の熱成層化による水平管内渦侵入深さ予測 (温度変動特性に及ぼす放熱条件の影響), 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻, 703 号, pp.954-961 (2005).
- (5) 中森信夫, 鈴木忠彦, 上野隆司, 笠原二郎, 半沢克巳, 桶谷浩一郎, 鶴飼修, 枝管内における熱成層現象, 日本伝熱学会, 第 30 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D252, pp.646-648 (1993).
- (6) 白石直, 並河幸治, 鈴木盛喜, 閉塞分岐配管内旋回流の速度分布の研究, 可視化情報学会, 可視化情報, Vol.20, No.2, pp.93-96 (2000).

- (7) 中村晶, 竹中信幸, 濱谷大輔, 村瀬道雄, 佐々木亨, 分岐配管に起こる熱成層変動現象の実験と数値解析, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, Vol.9, pp.67-79 (2002).
- (8) 中村晶, 竹中信幸, 閉じられた直管の分岐配管に生じる流れ場の構造と温度変動, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, Vol.12, pp.146-153 (2005).
- (9) 大厩徹, 中村晶, 長谷正紹, 細川茂雄, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム - 第1報 鉛直分岐配管に生じる流動現象 -, *日本機械学会論文集 B 編*, 75 巻, 749 号, pp.68-76 (2009).
- (10) 中村晶, 大厩徹, 濱谷大輔, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム - 第2報 水平部を有する曲がり管に生じる温度変動 -, *日本機械学会論文集 B 編*, 75 巻, 749 号, pp.77-84 (2009).
- (11) 大厩徹, 中村晶, 齊藤敦, 山本泰大, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム - 第3報 水平部を有する曲がり管に生じる壁温の温度変動 -, *日本機械学会論文集 B 編*, 75 巻, 755 号, pp.1410-1419 (2009).
- (12) Takenaka N., Hosokawa S., Hase M., Onojima D., Nakamura A. and Oumaya T., Investigation of Flow Structure and Temperature Fluctuation in a Closed Branch Pipe Connected to High Velocity and High Temperature Flow in a Main Pipe, Fourth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS4), No.000002 (2004).
- (13) Takenaka N., Hosokawa S., Hamatani D., Hase M., Onojima D., Yamamoto Y., Saito A., Nakamura A., Oumaya T. and Miyoshi K., Experimental study on Temperature Fluctuation Phenomena in a Closed Branch Pipe Connecting to High Velocity and High Temperature Flow in a Main Pipe, 14th International Heat Transfer Conference (IHTC-14), IHTC14-23190, (2010).
- (14) 谷角佳祐, 井口貴宏, 竹中信幸, 三好弘二, 中村晶, 原子炉の枝配管におけるもぐりこみ現象に関する研究, *日本機械学会, 関西学生会平成23年度学生員卒業研究発表講演会*, No.1216, (2012).
- (15) 土藏孝博, 杉本勝美, 竹中信幸, 三好弘二, 中村晶, 原子炉の分岐配管における潜り込み現象に関する研究, *日本機械学会, 関西学生会平成24年度学生員卒業研究発表講演会*, No.11A21, (2013).