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)

大 厩 徹^{*1}, 中 村 晶^{*1}, 長 谷 正 紹^{*2}
細 川 茂 雄^{*3}, 竹 中 信 幸^{*4}Flow and Temperature Fluctuation Mechanism in
a Downward Branch Pipe with a Closed End
(1st Report, Flow Structure in a Vertical Branch Pipe)Toru OUMAYA^{*5}, Akira NAKAMURA, Masatsugu HASE,
Shigeo HOSOKAWA and Nobuyuki TAKENAKA^{*5} Institute of Nuclear Technology, Institute of Nuclear Safety System, Inc.,
64 Sata, Mihama-cho, Mikata-gun, Fukui, 919-1205 Japan

Numerous pipes branch off from main pipe in power plant facilities. Main flow initiates a cavity flow in the downward branch pipe with a closed end and thermally stratified layer may form in the branch pipe if there is significant temperature difference in main and branch fluid. Fluctuation of thermally stratified layer may initiate thermal fatigue crack in the branch pipe. Flow visualization experiment was conducted to understand detailed behavior of the layer, for vertical branch pipe with a closed end. The penetration length of main flow in the branch pipe was measured for various main flow velocities. The velocity distributions in the penetrating flow region were obtained by a LDV method. The temperature fluctuation near the thermally stratified layer was measured. Through these experiments it was found that; (1) the driving force of the fluctuations in the branch pipe was not due to thermal phenomena but fluctuation of the spiral flow; (2) the flow regime in the second region was simple structured forced vortex with constant angular velocity, (3) steady thermally stratified layer did not fluctuate periodically in the vertical pipe.

Key Words: Cavity Flow, Thermal Stratification, Velocity Fluctuation, Vortex Structure, Vertical Branch Pipe, LDV

1. 緒 言

大口径の主配管から分岐し, その下流部に滞留した流体を有する管(以下, 閉塞分岐配管)では, 主配管から見て分岐配管は凹みであり, その凹みにキャビティーフローが発生する. 主配管と分岐管の流体に温度差があるときには, このキャビティーフローが主配管の温水を分岐配管へ輸送するため, 分岐管内に急峻な温度勾配を有する熱成層界面が発生する⁽¹⁾. この熱成層界面の揺動による温度変動により, 原子力プラントの配管系に熱疲労による貫通き裂が生じたことが報告されている⁽²⁾⁽³⁾.

この閉塞分岐配管に主配管の流体が輸送される現象は米国で研究が開始された. 当初は分岐部に生じる流れが乱れを輸送するとして乱流貫入 (turbulence penetration)⁽²⁾⁽⁴⁾と呼ばれ, Kim ら⁽⁴⁾は閉塞分岐配管内の

流速を測定し, 乱れ速度で定義したレイノルズ数と浸入深さの関係を求めた. 近年はキャビティーフローが特有の旋回渦を形成することから, 渦貫入 (vortex penetration, swirl penetration)と呼ばれ, Keller ら⁽⁵⁾はこの熱成層による疲労が懸念される部位を原子力発電所の主冷却材管の分岐管から抽出する方法を提案した.

日本機械学会では, このような温度変動現象による構造物への影響評価を確立するため, 「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」⁽⁶⁾を策定した. 同指針は, 水を内包した配管で高低温水の合流・混合による熱疲労を評価するものであるが, 閉塞分岐配管については, 主流の潜り込み位置(熱成層界面)が曲がり部付近に存在しないよう鉛直部の長さの妥当性を評価するものとなっている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

これらの研究や指針では熱成層界面の位置を推定し, 配管の損傷を未然防止するという設計法の観点が中心であり, なぜ熱成層界面が揺動するのかという物理的な検討は少ない. 著者らは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界面揺動現象の解明を目的として研究を行ってきた⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾. 分岐配管内に熱を輸送

* 原稿受付 2008年6月18日.

^{*1} 正員, (株)原子力安全システム研究所(〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64).^{*2} 神戸大学大学院工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1).^{*3} 正員, 神戸大学大学院工学研究科.^{*4} 正員, フェロー, 神戸大学大学院工学研究科.

E-mail: ooumaya@inss.co.jp

するキャビティフローが持つ渦構造と特性を明らかにすることで、現象が明らかになると考えた。現象の理解、すなわち変動メカニズムを明らかにすることで、熱成層界面の発生場所と熱疲労の寿命予測の精度が向上することが期待される。

本研究では、閉塞分岐配管内の流動と温度変動のメカニズムを調べるため、一連の流動実験及び解析を行なった。第1報では、閉塞分岐配管が直管の場合に、主流の潜り込み範囲を特定して分岐管内部の流速分布の測定を行なった結果を示すと共に界面付近の温度変動を調べて潜り込みと熱成層界面の関係を明らかにする。

2. おもな記号

D :	管内径 [m]
R :	管内半径 [m]
g :	重力加速度 [m^2/s]
H :	総エンタルピ [J/kg]
L :	管中心で定義される分岐配管分岐部からの距離 [m]
p :	圧力 [Pa]
T :	温度 [K]
t :	時間 [s]
$\mathbf{u}$:	流速ベクトル [m/s]
U :	流速 [m/s]
r :	半径方向軸
x :	水平軸(面内)
z :	鉛直軸
β :	体膨張係数 [$1/\text{K}$]
λ :	熱伝導率 [W/mK]
ν :	動粘度 [m^2/s]
ρ :	密度 [kg/m^3]
θ :	曲がり部傾斜角度 [$^\circ$]
ϕ :	周方向角度 [$^\circ$]

添字

i, j :	座標方向
m :	主配管
b :	分岐配管
n :	無次元化
v, d, s :	領域1, 遷移領域, 領域2

3. 実験装置及び方法

分岐管が鉛直直管の場合に、主流が分岐管内部に潜り込んだ際の流動状態を調べるため、可視化実験を行なった。図1に試験部、実験ループの概要を示す。

試験部は、実機と同じ内径 43mm のアクリル製で、図

2 に示すようなダクト状に絞った幅 60mm、厚さ 10mm の矩形のチャンネルに接続し、十分な流速が得られるようにした。実機プラントでは主配管の内径は分岐管の 15 倍以上であり、曲率が十分に小さいことから矩形のチャンネルで主配管の流れを模擬できると判断した。主配管内の流れが十分に発達するようにチャンネル入口から分岐部までの距離は 600mm とし、水力等価直径の 35 倍とした。主流の平均流速を 1m/s から 12m/s まで 1m/s 毎に上昇させ、主流と分岐部の温度差がある場合とない場合について、主流の潜り込み深さを調べた。渦構造の観察及び潜り込み深さの測定は、発泡スチロール製粉末のトレーサ粒子で流れを可視化して行なった。主流と分岐部が等温条件の場合は実験ループ全体を室温に、非等温条件の場合は主流を約 65°C、分岐部を室温に保って実験を行なった。

レーザードップラー流速計(LDV)を用いて分岐部の周方向速度 U_θ 及び軸方向速度 U_z の分布を測定した。LDV システムの概要を図3に示す。光源として He-Ne レーザを用い、1MHz の周波数シフトを施した。散乱粒子として平均粒子径 3 μm の炭化シリコン粒子を用いた。図3に示すようにレーザ光源を軸芯から 0.75mm おきに移動させて半径方向分布を、管軸方向に分岐管内径 D_b に等しい 43mm 間隔で移動させて、主流中央からの距離 L との比である $L/D_b=1\sim 11$ の位置について軸方向分布を測定した。LDV による計測は、主流の平均流速を 7m/s に固定し、等温条件で実験を行なった。

非等温条件における分岐管内の流体の温度変動は、素線径 0.1mm の K 型熱電対を $L/D_b=11, 12$ の位置の管内壁から 1mm の位置に設置して測定した。

Fig.1 Schematic diagram of the test loop and the test section

Fig. 2 Details of the rectangular channel duct

Fig. 3 Configuration of LDV system and measured points

4. 実験結果

4.1 流れの可視化実験結果及び潜り込み深さ

図4に可視化実験により、観察された流動を、トレーサ粒子により1秒間露光した各領域の流線と併せて示す。目視観察により、分岐管内の流れは、主流と分岐部が等温、非等温の場合のいずれも、大きく三つの領域に分類され、白石らが得た知見⁽¹⁴⁾と一致した。領域1では主流の流れにより、分岐管内に主流の流れ方向に回転する渦を有する乱れたキャビティーフローが観測された。遷移領域では流れは乱れており、目視からは特定のパターンは見出せなかった。領域2では、管壁付近で旋回状の下降流れが、管中心付近では上昇流が見られ、領域2の下端で流れは停止する。主流との接続部からこれらの境界までの長さをそれぞれ L_v , L_d , L_s とし、これらを目視により測定した。また、 L_s を主流の最大潜り込み深さと定義する。

図5に主流と分岐部が等温の場合と非等温の場合の、主流流速が1~12m/sにおける各領域までの潜り込み深さ L_v , L_d , L_s を示す。潜り込み深さは分岐管内径 D_b の比で示してある。潜り込み深さ L_v , L_d は等温条件の場合も

非等温条件の場合も違いが見られなかったが、 L_s は非等温条件のほうが若干小さいことがわかる。主流の流速の増加に伴い L_d , L_s は増加するが、 L_v はほぼ一定であり、 L_v/D_b は3程度である。

図6に、等温条件において領域2の位置で1秒間露光した15秒間隔の流れの様子を示す。同図より、旋回流の流速は時刻により増減していることがわかる。この流速の変動は等温条件でも非等温条件でも同様に観察されたことから、分岐部内の流れの変動は、温度分布により生じる自然対流のような熱的な現象ではなく、流体の現象によることが示された。

Fig. 4 Observed flow patterns

Fig. 5 Penetration depth of straight pipe under uniform and non-uniform temperature conditions

Fig.6 Streak lines by the tracers observed in Region 2

4.2 分岐部の流速測定結果

図 7 に, 主流の平均流速が 7m/s のときの管内壁から 2mm の位置における周方向速度 U_θ 及び軸方向速度 U_z の 200 秒間の測定結果の時刻歴波形を, 各領域別に示す. 周方向の速度については, $L/D_b=2$ の位置で 1 秒程度の比較的短周期の変動が見られ, 下方へ移動し遷移領域, 領域 2 と流れの状態が変化するにつれて徐々に 10~100 秒程度の長周期の変動が見られる. 軸方向流れは領域 1 では向きが変化するが, 遷移領域, 領域 2

では負の方向の流れが支配的となった. 一方, 軸方向の速度については, 各領域とも周方向と比べて小さいが, 領域 1 では 1 秒程度の短周期であったのが遷移領域, 領域 2 では 10 秒程度の長周期が観察された.

図 8 に, 主流の平均流速が 7m/s のときの各領域の周方向及び軸方向速度の $L/D_b=1\sim11$ の位置における半径方向分布の一例を, 180 秒間の平均流速と流速変動の標準偏差を示す. 半径方向位置 r は分岐管半径 R_b との比で示した. 周方向速度 U_θ については, 粒子のデータ率が低く, 管中心付近では測定ができなかった. 領域 1 の計測した断面では, 周方向・軸方向速度共に標準偏差が大きく乱れた流れであり, 軸方向速度は $L/D_b=1$ の位置で半径方向に大きく勾配があり, 管中心付近で下降, 管壁付近で上昇する流れとなっている. $L/D_b=2, 3$ では半径方向の速度勾配は水平に近づき, 領域 1 の下端である $L/D_b=3$ では, 平均流速は 0 でほぼ一定となり, 領域 1 の境界に対応する. 周方向の平均流速はほぼ 0 である. 遷移領域及び領域 2 では, 軸方向の平均速度は領域 1 とは逆に管中心付近で上昇, 管壁付近で下降する流れとなっており, 領域 1 と同様に領域 2 の下端に近づくにつれて小さくなる. 周方向速度は $L/D_b=4\sim11$ のいずれの位置でも反時計回りであり, 壁面近傍を除くと, 周方向速度の半径方向分布はほぼ直線になっており, また遷移領域の範囲にある $L/D_b=7$ での分布を,

Fig.7 Circumferential and axial velocity fluctuations for each region

Fig.8 Radial distribution of circumferential and axial velocity

Fig.9 Power Spectrum Density of circumferential and axial velocity for each region

領域 2 の $L/D_b=11$ の位置と比較すると、軸方向・周方向速度共にほぼ同様の分布となっている。このことから、可視化実験では遷移領域には明確な流れが確認できず、領域 2 の旋回流と区別したが、平均流速で見れば乱れの程度が異なる同じ流れであることがわかる。

図 9 に、主流の平均流速が 7m/s のときの各領域における管内壁から 2mm の位置における周方向速度 U_θ 及び軸方向速度 U_z を標準偏差で正規化したパワースペクトル密度分布の例を示す。パワースペクトル密度は、1024 秒間の流速の時間変化を 2Hz でサンプリングした 2048 点のデータから得た。領域 1 では、軸方向速度及び周方向速度共に低周波数から高周波数領域にかけて一様に分布しており卓越した周波数は見られなかった。一方、遷移領域及び領域 2 では、0.1Hz 以下の低周波数が軸方向及び周方向速度共に卓越しており、長周期の変動が支配的であることがわかる。また、いずれの方向の流速も下方へ移動するにつれて変動が長周期側へ移行する傾向が見られた。主流の最大潜り込み位置付近の $L/D_b=11$ では、周方向及び軸方向速度共にピークが 0.01Hz 付近で観察される。

4.3 分岐部の温度変動測定結果

図 10 に、主流の流速を 6m/s から 7m/s に変化した後の分岐部の $L/D_b=11$ と 12 の位置での液温の変化を示す。

図中の温度 T_n は、主流の温度 T_m 及び分岐部下流端の温度 T_b を用いて下式によって無次元化した。

$$T_n = \frac{T - T_b}{T_m - T_b} \cdots (4.1)$$

主流の流速の増加に伴う潜り込み位置の下降に伴い熱成層界面も下方へ移動して、 $L/D_b=11$ の位置に到達して温度の急上昇が 360 秒付近で見られ、520 秒付近で一度熱成層界面が上昇して温度が急低下するが、その後はほぼ一定となる。一方、 $L/D_b=12$ では、主流流速が 7m/s に変化しても主流の最大潜り込み位置の下側のままで、分岐部の下端の温度である 30°C 付近でほぼ一定であった。 $L/D_b=11$ の位置における温度測定結果から、図 6 に示すような旋回流の流速変動があっても、熱成層界面が安定していることが示された。

直管の分岐部では、旋回流の流速変動は生じるが液温の周期的な変動は生じない。このときの熱成層界面と旋回流の関係を目視結果より、図 11 に模式的に示す。主流の流速が一定であっても、図 7 に示した旋回流の周方向流速の増減に伴い渦の先端の位置が変化する。主流の流速が変化する過程では、図 10 の $L/D_b=11$ の位置の $t=0 \sim 850[s]$ までの間の温度変化のように熱成層界面の下降に起因する過渡的な温度変動が見られるが、主流の流速が一定になった後で十分な時間が経過すると、熱成層界面は旋回流の変動範囲の最低部で安定になっ

到達範囲から外れるため、界面の揺動が生じず、従って液温の変動も生じない。図5に示したように主流の流速の増加に伴い潜り込み深さ L_s は増加するが、実機条件ではレイノルズ数が異なり、熱成層界面が形成される位置も異なると考えられる。主流と分岐部の滞留水の温度差が小さければ熱成層界面は安定しないが、この場合旋回渦の中心に生じる上昇流により低温水が巻き上げられて界面自体が消失すると考えられる。これらのことから、分岐部において熱成層界面が鉛直な直管内にあれば熱疲労の要因となる繰り返し熱応力の変動は生じないことがわかる。

Fig.10 Time history of temperature near the stratified layer in a straight branch pipe

Fig. 11 Relationship between spiral vortex and thermally stratified layer

5. 検 討

5.1 遷移領域及び領域2における流速分布の推定

分岐管内の領域1では流れは軸対称ではないが、遷移領域及び領域2では時間平均流速分布を、軸対称であると仮定して、図8(b)に示した流速分布を簡易な式で

あらわすことを試みた。図12に、管壁から2mmの位置における周方向平均流速 $\overline{U}_\theta$ の軸方向の分布を、遷移領域及び領域2での最大速度となる $L/D_b=4$ の位置の流速 $\overline{U}_{\theta \max}$ で無次元化したものを示す。 $\overline{U}_\theta$ は分岐部の L/D_b の増加により指数関数的に減少していることがわかり、周方向平均流速の軸方向変化は下式の近似式で、

$$\frac{\overline{U}_\theta}{\overline{U}_{\theta \max}} = \alpha \exp(\beta z) \cdots (5.1)$$

とあらわすことができた。ここで、 α, β は定数、 z は $L/D_b=4$ の位置を基点に鉛直方向上方を正とした分岐部の軸方向位置であり、この場合 $\alpha=3.18, \beta=7.22$ である。

一方、図8(b)より遷移領域及び領域2における周方向平均流速は角速度が一定の強制渦を示しているため半径方向には、管中心で0となり壁面近傍で最大となる直線分布を、軸方向平均流速については壁面近傍で下降し管中心で上昇する直線速度分布を仮定すると、式(5.1)に示した軸方向分布と併せて周方向及び半径方向の平均流速は下式であらわされる。

$$\overline{U}_\theta = \overline{U}_{\theta \max} \alpha \frac{r}{r_e} \exp(\beta z) \cdots (5.2)$$

$$\overline{U}_z = \overline{U}_{z \max} \alpha \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r}{r_e} \right) \exp(\beta z) \cdots (5.3)$$

ここで r_e は管中心から壁面近傍までの距離であり、 $\overline{U}_{z \max}$ は遷移領域及び領域2で最大となる $L/D_b=4$ における軸方向平均流速である。

半径方向流速 $\overline{U}_r$ は測定していないが連続の式により、式(5.2)と式(5.3)から

$$\overline{U}_r = \overline{U}_{z \max} \alpha \beta \left(\frac{3}{4} \frac{r^2}{r_e} - r \right) \exp(\beta z) \cdots (5.4)$$

とあらわすことができる。

式(5.2), (5.3)から得られた周方向及び軸方向平均流速の半径方向分布を測定結果と共に図13に示す。遷移領域及び領域2の全域に渡って式(5.2)及び(5.3)による推定結果は管中心から管壁近傍までの実測値とおおむね一致し、遷移領域及び領域2の強制対流渦は、平均的には簡易な式で記述できる単純な渦であることが示された。

Fig. 12 Axial distribution of normalized average circumferential velocity

Fig. 13 Comparison of measured average velocity with the estimated value

5.2 分岐管軸方向の運動エネルギーの減衰

主流の運動エネルギーは分岐管内を減衰しながら下方へ伝わる。遷移領域及び領域 2 の周及び軸方向の平均流速については第 5.1 節で指数関数的に減衰することを示した。ここでは、領域 1、遷移領域、領域 2 の全域に渡る周及び軸方向の平均流速の運動エネルギーと乱れエネルギーの関係について調べた。

図 14 に軸及び周方向の運動エネルギー及び乱れエネルギーの、軸方向分布を示す。ここで運動エネルギーは、境界層近傍で平均流速の絶対値がおおむね最大となる管壁から 2mm の位置における各時点の流速の 2 乗の 1024 秒間の時間平均を、乱れエネルギーは同位置における標準偏差を 2 乗して求めた。同図より、領域に関わらず運動エネルギー、乱れエネルギー共に単調に減衰していることがわかる。

軸方向の運動エネルギーは、領域 1 ではほぼ一定の勾配で指数関数的に減少し、遷移領域ではその勾配が大きくなり、領域 2 では再び勾配が小さくなる。周方向の運動エネルギーは、領域 1 ではほぼ一定であり、遷移領域では一定の勾配で指数関数的に減少し、領域 2 でもその勾配が維持される。軸方向及び周方向の乱れエネルギーは、領域 1 ではほぼ一定であり、遷移領域では周方向の運動エネルギーよりも急な勾配で指数関数的に減少し、領域 2 では一定に近づき、それよりも下側では再び勾配が急になる傾向が見られた。

領域 1 では軸方向の運動エネルギーが周方向のものよりも大きく、可視化実験で観測された渦と一致する。遷移領域及び領域 2 では、周方向の運動エネルギーが最も大きく、旋回渦が支配的であることがわかる。また、乱れエネルギーは遷移領域と領域 2 で異なった勾配で減衰しており、旋回方向の運動エネルギーとの差が異なることから、可視化実験で遷移領域を乱れた流れ、領域 2 を旋回渦と別の領域に区分した要因となった。

Fig. 14 Axial distribution of kinetic and turbulent energy

6. 結 論

分岐部が直管の場合の、主流により下向きの閉塞分岐管内部に生じる流れを調べた結果、以下の結論を得た。

(1) 主流と分岐部が等温、非等温いずれの場合にも分岐管内で流速の周期的な変動が見られたことから、本実験条件において分岐管内の変動は、熱による現象でないことがわかった。

(2) 主流が分岐管内に潜り込む際の流動様式は、可視化実験からは乱れたキャビティーフローの領域、遷移領域、旋回流領域の 3 つの領域に分けられ、既発表研究⁽¹⁴⁾と一致した。しかし流速分布測定の結果、時

間平均速度分布では、遷移領域及び領域2は周方向、軸方向速度共に半径方向に線形分布を示していた。そのため、可視化実験では乱れの程度によって別々の領域に区分していた流れが同じ流動様式であることがわかった。

(3) 遷移領域及び領域2の平均流速分布は、軸方向に指数関数、半径方向に1次関数を用いた式で記述される、角速度が一定の強制渦であることを明らかにした。

(4) 主流の最大潜り込み位置付近の液温測定の結果、分岐部が鉛直下向きの直管の場合に、主流流速が一定であれば、旋回渦の流速変動により潜り込み位置が変化しても熱成層界面はその最下端で安定し、界面の周期的な揺動は発生せず、顕著な温度変動は生じないことを明らかにした。

(5) 領域1では、軸方向の運動エネルギーが、遷移領域及び領域2では周方向の運動エネルギーが L/D_b の増加に伴い指数関数的に減少する。一方、乱れエネルギーは遷移領域において周方向の運動エネルギーよりも急な勾配で減少する。

文 献

- (1) Nakamori, N., Suzuta, T., Ueno, T., Kasahara, J., Hanzawa, K., Oketani, K., and Ukai, O., Thermal Stratification in Branch Pipe, *Proceedings of 30th National Heat Transfer Symposium*, D252 (1993), pp.646-648.
- (2) Nuclear Regulatory Commission, Assessment of Pressurized Water Reactor Primary System Leaks, US NRC, NUREG / CR-6582 (1999).
- (3) Kansai Electric Power Company, The inspection results of Mihama Unit 2 (The causes and its measures for the leak from Letdown system in CVCS), (1999), <http://www.kepc.co.jp/pressre/1999/0525-1j.html>.
- (4) Kim, J. H., Roidt, R. M., and Deardorff, A. F., Thermal stratification and reactor piping integrity, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.139, No.1 (1993), pp.83-95.
- (5) Keller, J. D., Bilanin, A. J., Kaufman, A. E., and Carey, J., Thermal Cycling Screening and Evaluation Methodology and Application to Pressurized Water Reactor Branch Line Piping, *Third International Conference Fatigue of Reactor Components* (2004), Session No.4-4.
- (6) The Japan Society of Mechanical Engineers, Guideline for Evaluation of High-Cycle Thermal Fatigue of a Pipe JSME S 017, *JSME Standard* (2003).
- (7) Tanimoto, K., Shiraishi, T., Suzuki, S., Ogura, K., Shiina, K., Fukuda, T., Minami, Y., and Moriya, S., Study on Thermal Stratification by Cavity Flow in a Branch Pipe with a Closed End (Concept of L_1 Evaluation Method), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No. 689 (2004), pp.176-183.
- (8) Kondo, Y., Tanimoto, K., Shiraishi, T., Suzuki, S., Ogura, K., Shiina, K., Fukuda, T., Chigusa, N., and Moriya, S., Study on Thermal Stratification by Cavity Flow in a Branch Pipe with a Closed End (Concept of L_{sn} Evaluation Method), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.689 (2004), pp.184-191.
- (9) Shiina, K., Kawamura, T., Ohtsuka, M., Mizuno, T., Hisatsune, M., Ogura, K., Tanimoto, K., Fukuda, T., Minami, Y., Moriya, S., and Madarame, H., Prediction of Vortex Penetration Depth on Thermal Stratification by Cavity Flow in a Branch Pipe with a Closed End (Effect of Heat Leak Condition on Temperature Fluctuation), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.703 (2005), pp.954-961.
- (10) Nakamura, A., Takenaka, N., Hamatani, D., Murase, M., and Sasaki, T., Experiments and Numerical Simulations of Fluctuating Thermal Stratification in a Branch Pipe, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, Vol.9 (2002), pp.67-79.
- (11) Nakamura, A. and Takenaka, N., Investigation of Flow Structure and Temperature Fluctuation in a Closed Branch Pipe Connected to Main Pipe, *Third International Conference Fatigue of Reactor Components* (2004), Session No.2b-5.
- (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)* (2004), No.000002.
- (13) Nakamura, A. and Takenaka, N., Investigation of Flow Structure and Temperature Fluctuations in a Straight Branch Pipe with Closed End, *Journal of the Institute of Nuclear Safety System*, Vol.12 (2005), pp.146-153.
- (14) Shiraishi, T., Nabika, Y., and Suzuki, S., Experiments on a Vortex in a Circular Pipe with a Closed End, *Transactions of the Visualization Society of Japan*, Vol.20, Suppl. No.2 (2000), pp.93-96.