垂直管内の沸騰現象に関する実験的研究

松村 邦仁^{1,*}, 神永 文人², 鈴木 政浩³, 藤井 寛一⁴

An Experimental Investigation of Boiling of Water in a Vertical Tube

Kunihito MATSUMURA^{1,*}, Fumito KAMINAGA², Masahiro SUZUKI³ and Kan-ichi FUJII⁴

¹Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan

²Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito-shi, Ibaraki 310-8512, Japan

³Division of Advanced Nuclear System, Japan Atomic Energy Agency, 4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan

⁴Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan

(Received October 24, 2013; accepted in revised form February 1, 2014; published online April 18, 2014)

In order to realize a quick mass production of PuO_2/UO_2 (MOX) particles *via* vaporization of Pu/U mixed nitrate solution, an innovative denitration process is required. In this process, one of the important problems is the safety control of radioactive materials in the solution. However, it is known that violent boiling (*i.e.*, geysering) of liquid sometimes occurs in a long, heated vessel. In this study, we experimentally examined the boiling characteristics of water in a vertical glass tube with a closed lower end opening to an upper plenum at the top. In our experiments, we measured the transient static water pressure and the water temperature at four elevations along the glass tube. The effects of the water temperature of the upper plenum and heat input into the water on the boiling of water were investigated. Flow visualization shows that the bubbles are first formed on the heater surface, and then they detach and start to rise in the water. They suddenly coalesce and form a large slug bubble in the test tube. Measurements of local water temperatures showed that in the case of violent boiling, the temperatures and pressure fluctuate at the same frequency.

KEYWORDS: *thermal hydraulics, experiment, geysering, denitration, condensation, boiling*

I. 緒 言

下端が閉じられた垂直管内の液体を加熱した場合、内部の液体が急激に激しく沸騰し、条件によっては間欠的に液体の噴出と再流入を繰り返す突沸現象が発生することが知られている。こうした現象はガイセリングとも呼ばれており、管路内で発生する流動不安定現象の1つとして分類されている¹⁾。ガイセリングは、ボイラなど沸騰を伴う動力プラントの配管等で発生する可能性があることから、単純な垂直管²⁾を始め、流動を伴う閉ループ系³⁾や自然循環炉を模擬した並列流路内で発生するガイセリング⁴⁾など、これまで様々な体系を対象として研究報告がなされている。

ところで高速増殖炉を中心とした核燃料サイクル実用化を目指し、従来の高速炉用燃料製造設備のさらなる合理化を目指した簡素化ペレット法燃料製造に関する研究開発が

進められている⁵⁾。簡素化ペレット製造は、プルトニウム含有量を調整した硝酸溶液をマイクロ波により加熱して硝酸成分を取り除き(脱硝)、同時に燃料粉末の転換と造粒を効率的に行う方式である。マイクロ波加熱は、加熱体を硝酸溶液内へ直接入れることなく加熱できる利点があるが、一方で使用する容器の形状やその加熱条件によっては上述したガイセリングなど予測の難しい、激しい沸騰現象が生じる可能性があることが示されている^{6~8)}。これらの研究では、主として高速度カメラを用いた可視化観察によりマイクロ波加熱時の溶液内での蒸気相の発生とその成長過程が明確に示されていて、容器内の溶液深さや容器寸法を変えた実験によりマイクロ波加熱における突沸発生条件が報告されている。このような予期せぬ激しい沸騰現象によって放射性物質を含む溶液が容器外部へ飛散することは、核物質の安全管理上避けるべき事象である。安全かつ安定的な脱硝工程を実現するためには、上述のマイクロ波加熱時の突沸メカニズムの解明に加え、容器形状や加熱方式の影響など、容器内液体の沸騰現象の様々な特性についての知見を蓄積し、装置設計に役立てる必要がある。

こうしたことを背景に、筆者らは先に簡素化ペレット製

¹ 茨城大学 工学部

² 茨城大学 理事(副学長)

³ 日本原子力研究開発機構

⁴ 茨城大学 名誉教授

* Corresponding author, E-mail: kunimatsu@mx.ibaraki.ac.jp

造の脱硝工程における溶液の突沸防止を目的として、内径 6 mm、全長 1,500 mm の垂直ガラス管内の作動液体を電気ヒータにより加熱し、ガイセリングの発生条件とその特性について実験的に調べ報告した⁹⁾。それにより、作動液体の加熱量とガイセリングの発生条件の関係を示し、ガイセリングに伴うガラス管内の差圧変動特性が可視化観察による蒸気泡の挙動と対応付けて説明できることを明らかにした。その一方、前報では使用したガラス管内径 (6 mm) が小さいことに加え、ガラス管下部にその約15倍の内容積を有する加熱用ヒータを含む沸騰容器があったことから、こうした容積の大きい下部沸騰容器の有無がガイセリングの発生に及ぼす影響を明らかにする必要がある。残された。

以上のことから、本研究では前報に続いて脱硝工程における溶液加熱時の突沸防止のため、突沸を含む垂直管内の沸騰現象に関する基礎的な知見を得ることを目的とする。実験は、前報と同様に加熱量の制御が可能な電気加熱ヒータを用いて、作動液体である水の加熱を行う。なお前報に比べ管内径が5倍の大きさのガラス管を用いることによって、電気加熱ヒータを管底部に直接設置し、下部沸騰容器の影響を排除した。実験は、前述のガイセリングに関する従来の研究でも報告されていない垂直管内の沸騰様相の可視化観察を行うとともに、垂直管の管軸に沿った局所温度変化と圧力変化の測定を行った。また、得られたデータの時系列解析を行うことによって、垂直管内の温度および圧力の相関特性を調べ、突沸発生時の蒸気泡の流動特性について検討した。

II. 実験

1. 実験装置

実験装置の全体概要図を Fig. 1 に示す。実験装置は、主要部として垂直ガラス管および上部プレナム、さらに加・計測系により構成されている。ガラス管は内径 30 mm、全長 1,000 mm の透明耐熱ガラスであり、内部の様相観察が可能となっている。前報では大気圧下の水/空気系の臨界波長¹⁰⁾を参考に、内径 6 mm、全長 1,500 mm の垂直ガラス管を使用し、このガラス管下部に電気加熱ヒータを封入した下部沸騰容器を有する体系でのガイセリングの特性を報告した。本研究では、電気加熱ヒータをガラス管底部に直接設置して加熱する方式とすることで、下部沸騰容器の影響のない構造とした。液体の加熱に使用した電気加熱ヒータ (全長 190 mm、外径 12 mm、最大加熱電力 500 W、有効伝熱面積 $7.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) は、ガラス管底面のフランジ中央に固定されていて、これにより作動液体を直接加熱した。一方、ガラス管上部はフランジを介して上部プレナムに接続されていて、その上端部は Griffith の実験²⁾と同様に、上部プレナム内の作動液体水位よりも低い位置とした。上部プレナムはポリカーボネイト製の矩形容器 (縦×横×高さ: 50 cm×50 cm×50 cm) であり、その内部の液温調整は投げ込みヒータ (最大出力 1 KW) と底部に

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

設置したコイル状に巻いた銅製パイプを併用して行った。外部の恒温水槽から所定の温度・流量の冷却水をこの銅製パイプへ循環させることにより、上部プレナム内の作動液体温度の微調節を行った。上部プレナム内の液温測定のため、外径 1 mm の K 型シース熱電対を上部プレナム中心軸上から 100 mm、容器底面から 70 mm の高さに設置し、この測定温度により上部プレナム内の温度を代表させ、実験中は常に一定温度に保った。なお、上部プレナムの上端は大気解放されていて、後で述べるように実験はすべて大気圧条件とした。

垂直ガラス管の管軸に沿って設置した熱電対および圧力センサの取り付け位置を Fig. 2 に示す。ガラス管の底面を座標原点とし、鉛直上方を x 軸正方向として図中に示した 4 点 (x=100, 300, 700, 900 mm) に外径 1 mm の K 型シース熱電対 (JIS 規格, クラス 1) を 4 本挿入した。熱電対は、管内の流動への影響を小さくするため、先端測温部がすべて管壁から 5 mm の位置になるよう調整した。一方、圧力センサはガラス管底面に接着したポリカーボネイト製のフランジに静圧孔を開け、底面 (x=0 mm) におけるゲージ圧力を測定した。なお、ガラス管全長 1,000 mm に対して、ヒータ長は 190 mm であるので、x=190 mm 以下が加熱部、その上はすべて非加熱部に相当する。実験で使用するすべての熱電対・圧力センサは別途校正を行い、その出力特性を確認している。各センサの測定結果について不確かさ解析を行った結果、温度計測については拡張不確かさ 1.8°C、圧力計測については同じく 78.3 Pa であることを確認した。

Fig. 2 Locations of thermo couples (T) and pressure transducer (P)

Table 1 Experimental conditions and their ranges

Water temperature of upper plenum, T_c	30, 50, 70, 90°C
Water depth of upper plenum, H	100 mm
Inner diameter of glass tube, D	30 mm
Length of glass tube, Lt	1,000 mm
Input power, Q	100, 200, 300, 400, 500 W

2. 実験条件と実験手順

本実験における実験条件を Table 1 に示す。実験はすべて大気圧条件下で行い、作動液体には蒸留水を使用した。作動液体は上部プレナムから静かに注水し、ガラス管内を作動液体で満たした後、上部プレナム内を実験条件で定めた液水位 H と温度 T_c に設定した。その後、ガラス管内の電気加熱ヒータの加熱電力 Q を調整して実験を開始した。電気加熱ヒータへの通電後、ガラス管内の温度がおおよそ定常的に変化することを確認した後、ガラス管内の温度 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , ガラス管下部圧力 P をデータロガーに同時記録した。温度および圧力の測定時間は、最大 600 秒間 (サンプリング周波数 100 Hz) として行った。また、一部の条件についてはデジタルビデオカメラを使用してガラス管内の沸騰様相の観察を行った。

III. 実験結果

1. 沸騰様相と温度および圧力変化の関係

Figure 3 に、ガラス管内で突沸が発生した際の典型的な可視化観察結果を示す。実験条件は上部プレナム水位 $H = 100$ mm, 上部プレナム水温 $T_c = 70^\circ\text{C}$, ヒータの加熱電力 (以下加熱量とする) $Q = 500$ W である。図中の記号

Fig. 3 Photographs of successive boiling process in the test tube (Upper plenum temperature $T_c = 70^\circ\text{C}$, Input power $Q = 500$ W).

(A) から (H) は、後述する Fig. 4 に示す時系列データの (A) から (H) に対応している。(A) から (C) において、ガラス管最下部のヒータ表面からは連続的に蒸気泡が発生していて、それらは浮力によって管内を上昇している。図中、白矢印で示す蒸気泡の最上部はヒータよりも上の非加熱部 ($x > 190$ mm) 内でも消滅することなく、徐々に管内を上昇している。その後、(C) から (D) にかけて非加熱部内の蒸気泡の一部はスラグ状の大きな蒸気泡に変化し、その上部の作動液体を押し上げながら急速に管内を上昇して、(E) においてガラス管上端の上部プレナム内に噴出している。スラグ状蒸気泡はその全長が約 40 cm 程度で、この蒸気泡の下端では (D) (E) の各画像の管中央部にみられるように、管内が白濁するほど水と蒸気泡が激しく混合している様子がみられる。(E) において、飽和温度以下の上部プレナム水との直接接触によって蒸気泡は直ちに凝縮し、同時に上部プレナムのサブクール水が管内を流下するため、(F) にかけて蒸気泡の位置は下降している。ガラス管内ではこの間も加熱部で発生した蒸気が下方から上昇しているため、特に (E) から (F) にかけてガラス管内は上昇蒸気流と上部プレナムから下方に流下するサブクール水が一時的に気液対向流を形成している状況が確認された。その後蒸気泡の位置はさらに下降して、(G) では上部プレナムから流下したサブクール水によって管内の温度が低下し、一時的にヒータ周囲の蒸気泡の数が減少している。しかし、直後の (H) では再び加熱ヒータ表面で蒸気泡が発生し、その後 (A) の状態に戻る。以上の突沸様相は、およそ数秒間の短い時間サイクルで繰り返すことが確認された。

Figure 4 は、以上の突沸現象に対応するガラス管内の温度および圧力変化を表していて、図中の記号 (A) から (H) は Fig. 3 の各画像の記号に対応している。なお Fig. 4 上段がガラス管の管軸に沿って設置した 4 本の熱電対による局所温度変化、下段がガラス管下部のゲージ圧力変化

Fig. 4 Time variations of temperatures and static pressure in the test tube

(Upper plenum temperature $T_C = 70^\circ\text{C}$, Input power $Q = 500\text{ W}$).

を表している。図中に示す破線は、それぞれ作動液体の水頭を考慮したガラス管最下部の静水圧 P_l および飽和温度 T_{sat} であり、以下の方法で求めた。まずガラス管最下部の静水圧 P_l は、次の(1)式に示すように上部プレナム内の静水圧 ΔP_u およびガラス管内の静水圧 ΔP_l をそれぞれ足し合わせて算出した。

$$P_l = \Delta P_u + \Delta P_l = \rho_l g (H + L_t) \quad (1)$$

なお、上式においては Fig. 2 に示すように上部プレナム水深を H 、ガラス管長さを L_t として、液相密度 ρ_l と重力加速度 g を用いている。(1)式で得た静水圧に大気圧 P_{atm} を加え、この圧力に対する飽和温度を次式で定義し、その値は蒸気表を参照して求めた。

$$T_l = T_{\text{sat}}(P_l + P_{\text{atm}}) \quad (2)$$

Fig. 4 上段の温度測定結果から、ガラス管下部の温度 T_1 が最も高く、上部プレナムに近くなるほどその温度が低くなる傾向が示されている。管底部から $x = 100\text{ mm}$ の位置の温度 T_1 は、(2)式の液水頭を考慮した飽和温度にほぼ等しく、その温度変化の振幅も他に比べると小さい。 $x = 300\text{ mm}$ の T_2 はヒータ上端 ($x = 190\text{ mm}$) よりも上の非加熱部であるが、 T_1 よりも約 2°C 程度しか温度は低下していない。以上のことから、突沸発生時の T_1 および T_2 はその温度変化の振幅が小さいことが特徴として挙げられる。これに対し、 $x = 700\text{ mm}$ の T_3 は温度変化の振幅が最も大きく、Fig. 4 では約 25°C 程度の範囲で繰り返し変動している。 $x = 900\text{ mm}$ の T_4 は、一定温度に保たれた上部プレナムに近いので、測定点の中では最も温度が低く、また T_3 に比べると温度変化の振幅は小さい。Fig. 4 下段に示すガラス管下部圧力に注目すると、図中破線で示す(1)式を上限として変化している。式(1)はガラス管および

上部プレナムの所定水位まですべて液単相で占められている場合に対応し、沸騰によってガラス管内に水蒸気が発生して水/蒸気の気液二相状態になると、(1)式よりも静水圧は低下する。すなわち、Fig. 4 下段の圧力変化の測定結果は、ガラス管内では液単相状態と突沸による気液二相状態が交互に繰り返されていることを表している。

Fig. 4 を Fig. 3 の可視化観察結果と比較すると、加熱部の T_1 は(2)式の飽和温度にほぼ等しく一定温度に保たれていて、Fig. 3 の可視化観察でもヒータ表面からは常に蒸気泡が発生し、周囲の水と飽和温度に近い状態で気液が混合していることが確認できる。一方、 $x = 300\text{ mm}$ の T_2 は非加熱部であるが、 T_1 に比べ約 2°C 程度の温度低下である。これは Fig. 3 にも示すとおり、熱伝導と対流によって伝わる熱に加え、浮力により管内を上昇する多数の蒸気泡によって、非加熱部である T_2 における作動液体温度が高く保たれるためであると推測できる。こうして加熱部から発生した蒸気泡は、 T_2 よりさらに上まで上昇し、(C)から(D)にかけてガラス管中央部付近でスラグ状に急成長して上昇するが、この蒸気泡の上昇に対応してガラス管上部の T_3 および T_4 の温度も上昇している。それと同時に、スラグ状蒸気泡の発生に伴って液水頭が大きく減少するため、(C)以降の下部圧力は低下している。(E)においてスラグ状の蒸気泡が上部プレナムに達すると、そこで蒸気泡が凝縮して上部プレナムからサブクール水が管内へ流下するため、それ以降 T_3 および T_4 の温度は急速に低下するとともに、下部圧力は(1)式の液単相に対応する値に戻っている。(G)では一時的にサブクール水の流下によって蒸気泡が減少しているが、 T_1 と T_2 はほぼ飽和温度に保たれたままで、画像にも示されるように(H)では再び蒸気泡がヒータの周囲に発生している。

Figure 5(a)は、以上のガラス管内の局所温度変化と圧力変化をさらに長時間測定した結果を示している。ガラス管上部の $x = 700, 900\text{ mm}$ の位置に対応する T_3 および T_4 は、Fig. 4 と同様に一定温度範囲内で変化し、突沸現象に伴うその変化はほぼ周期的に繰り返されている。 T_1 と T_2 については温度変化の振幅が小さいため、ガラス管上部の T_3 と T_4 ほどその周期性は明確ではないが、わずかに突沸に対応して変化する傾向がみられる。以上の結果から、本実験における突沸現象では、非加熱部のガラス管上部ほどその温度変化の振幅が大きく、それはスラグ状蒸気泡の流動に対応して管内温度の上昇と下降が周期的に繰り返されていることが明らかとなった。

Figure 5(b)に、以上の温度・圧力の各時系列データをもとに算出した自己相関係数を示す¹¹⁾。ここで、自己相関係数は時系列の離散データ $x_i(t)$ に対して(3)式によって定義し、 $x_i(t)$ には実験で得られた温度 T_i ($i = 1, 2, 3, 4$)、および圧力 P をそれぞれ用いた。なお、ここでは自己相関係数は(4)式に示すように最大値が1になるよう規格化を行っている。

Fig. 5 (a) Time variations of temperatures and static pressure in the test tube
(b) Auto correlation functions of temperatures and pressure
(Upper plenum temperature $T_C = 70^\circ\text{C}$, Input power $Q = 500\text{ W}$).

Fig. 6 (a) Time variations of temperatures and static pressure in the test tube
(b) Auto correlation functions of temperatures and pressure
(Upper plenum temperature $T_C = 70^\circ\text{C}$, Input power $Q = 100\text{ W}$).

$$C_i(\tau) = \overline{x_i(t)x_i(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2+\tau} x_i(t)x_i(t+\tau) dt, \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$$R_i(\tau) = \frac{C_i(\tau)}{C_i(0)} = \frac{\overline{x_i(t)x_i(t+\tau)}}{\overline{x_i(t)^2}}, \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

Figure 5(b)に示す温度および圧力変化の自己相関係数から、ガラス管内のすべての温度変化、圧力変化は規則的に変化していて、かつそれらはほぼ同一周期であることが確認できる。ラグタイム τ が大きくなると次第に周期性がみられなくなるが、これは Fig. 3 に示すガラス管内の突

沸現象のサイクルが、厳密には一定時間間隔で行われていないことによる。なおガラス管内の圧力変化と温度変化の時間遅れについては後述する。

2. 加熱量および上部プレナム水温の影響

ガラス管内の温度および圧力変化に及ぼすヒータ加熱量の影響を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。各図は上部プレナム水温 $T_C = 70^\circ\text{C}$ で、ヒータ加熱量がそれぞれ $Q = 100\text{ W}$, $Q = 300\text{ W}$ に対する (a) 温度・圧力変化および (b) 自己相関係数を表している。Fig. 6(a) に示す $Q = 100\text{ W}$ では、ガ

Fig. 7 (a) Time variations of temperatures and static pressure in the test tube
(b) Auto correlation functions of temperatures and pressure
(Upper plenum temperature $T_c = 70^\circ\text{C}$, Input power $Q = 300\text{ W}$).

ラス管下部の T_1 は (2) 式の飽和温度よりもわずかに低い
が、ほぼ一定値を示している。非加熱部の T_2 は T_1 より
その温度は低い、Fig. 5 に示す $Q = 500\text{ W}$ の T_2 と比べ
ると周期的変化はあまりみられない。一方、ガラス管上部
の T_3 と T_4 に注目すると、上部プレナムに近い T_4 ほどそ
の温度は低くなっているが、いずれも突沸発生時のスラグ
状蒸気泡の流動に伴う振幅の大きい周期的温度変化は確認
できない。この理由は、加熱量が小さい場合にはヒータか
ら発生する蒸気量が少なく、発生した蒸気泡の多くは管内
を上昇する過程で合体することなく徐々に凝縮して消滅す
るためである。このように $Q = 100\text{ W}$ では突沸が発生し
ないため、Fig. 6(a) 下段に示す圧力変化についてもその
振幅は非常に小さく、液単相に対応する (1) 式と一致し
たほぼ一定値を示している。また、以上の温度変化、圧力
変化に対応して、Fig. 6(b) の自己相関係数においても周
期的な自己相関性は確認できない。

一方、Fig. 7(a) (b) に示す $Q = 300\text{ W}$ では、 T_1 と T_2 は
 $Q = 100\text{ W}$ と同様な傾向を示していて、大きな相違はみら
れない。これに対し、ガラス管上部の T_3 , T_4 および圧力
変化に注目すると、それぞれ突沸現象に対応する周期的な
変化が確認できる。ただし、 T_3 の温度を Fig. 5 の $Q =$
 500 W と比べると、上部プレナム水温が同じ $T_c = 70^\circ\text{C}$ に
も関わらず、その温度変化範囲は狭く、 T_3 の温度低下は
少ない。これは、高加熱量の $Q = 500\text{ W}$ では突沸に伴う
スラグ状蒸気泡は上部プレナムまで達した後に凝縮するの
に対し、加熱量が小さく蒸気発生量の少ない $Q = 300\text{ W}$
では、上部プレナムよりも下のガラス管内で凝縮する傾向
があるためである。すなわち、スラグ状蒸気泡は T_3 から
 T_4 の間で凝縮することにより、上部プレナムから直接流

Fig. 8 Photographs of successive boiling process in the test tube
(Upper plenum temperature $T_c = 30^\circ\text{C}$, Input power $Q =$
 500 W).

下するサブクール水が少なくガラス管内の温度低下が生じ
難いためである。Fig. 7 下段の圧力変化においても、その
振幅は Fig. 5 に比べて小さく、この結果は突沸発生時の
水頭圧変化、すなわちスラグ状蒸気泡の大きさが $Q = 500$
 W に比べて小さいことを意味する。

上部プレナム水温 $T_c = 30^\circ\text{C}$ における、突沸発生時のガ
ラス管内の典型的な可視化様相を **Fig. 8** に示す。加熱量
は $Q = 500\text{ W}$ であり、図は任意の時刻 $t = t_0$ 以降の突沸様
相を表している。ガラス管下部のヒータ表面からは $T_c =$
 70°C と同様に連続的に蒸気泡が発生していて、それらは
浮力によって管内を上昇している。(A) から (B) で蒸気泡
は管内を徐々に上昇し、(C) ではガラス管中央部付近から

(a) Upper plenum temperature $T_c = 30^\circ\text{C}$ (b) Upper plenum temperature $T_c = 90^\circ\text{C}$

Fig. 9 Effect of upper plenum temperature on the boiling process of the test tube
Input power $Q = 500\text{ W}$.

スラグ状蒸気泡が管内を急速に上昇している。その際、Fig. 3 と同じく $x = 300\text{ mm}$ の T_2 付近では管内が白濁するほど蒸気泡が多数みられる。しかし、(D)に示されるようにスラグ状蒸気泡は上部プレナムまで達することなくガラス管上部の T_3 から T_4 付近で凝縮し、その後蒸気泡の位置は下降している。その間もガラス管下部のヒータからは連続的に蒸気泡が発生しているため、再び(G)以降は蒸気泡がガラス管を上昇し同様な変化を繰り返す。以上のように、上部プレナム水温が低い場合も Fig. 3 と同様にスラグ状蒸気泡が形成されるが、スラグ状蒸気泡は上部プレナムに達する前にガラス管上部で凝縮する特性がある。

ガラス管内の温度・圧力変化に及ぼす上部プレナム水温の影響を Fig. 9(a)(b)に示す。加熱量は $Q = 500\text{ W}$ であり、(a)は上部プレナム水温 $T_c = 30^\circ\text{C}$ 、(b)は上部プレナム水温 $T_c = 90^\circ\text{C}$ である。(a)に示す $T_c = 30^\circ\text{C}$ では、他の条件と同様にガラス管下部の温度 T_1 が最も高く、上部の T_4 の温度が最も低くなっているが、 T_4 は飽和温度よりも 50°C 程度低い。このことは、Fig. 8 においてガラス管内を上昇するスラグ状蒸気泡が上部プレナムに達する前にガラス管上部で凝縮することに対応している。すなわち、スラグ状蒸気泡の上昇に対応して T_3, T_4 の温度も上昇するが、ガラス管上部の水温が低いため Fig. 8 のように蒸気泡は上部プレナムまで達することなく凝縮する。これに対し、(b)の上部プレナム水温 $T_c = 90^\circ\text{C}$ では T_3, T_4 の温度差は小さく、その下限温度は上部プレナム水温にほぼ等しいことから、スラグ状蒸気泡は上部プレナムまで達してから凝縮し、管内に上部プレナム内の水が流下していることが推測できる。なお、ガラス管内の水温が高い $T_c = 90^\circ\text{C}$ では、上部プレナムおよびガラス管内ともにサブクール度が小さく蒸気泡の凝縮が起き難いため、スラグ状蒸気泡が

大きくなりそれにより圧力変化の振幅も大きくなっている。

Figure 10 は、上部プレナム水温 $T_c = 30^\circ\text{C}$ と $T_c = 90^\circ\text{C}$ について加熱量ごとの圧力変化を示している。先に述べたように、加熱量が最も低い $Q = 100\text{ W}$ では突沸が発生しないため、圧力変化は液单相に対する(1)式とほぼ一致している。一方、加熱量が増加するほど突沸によって圧力変化の振幅は大きくなり、 $Q = 500\text{ W}$ では $T_c = 30^\circ\text{C}$ 、 $T_c = 90^\circ\text{C}$ とともに周期的に変化する傾向が確認できる。なお、同一加熱量では $T_c = 90^\circ\text{C}$ の方が圧力変化の振幅が大きい。これは、上部プレナム水温のサブクール度が小さいと蒸気が凝縮され難く、ガラス管内のスラグ状蒸気泡の大きさが増加するためである。ところで本実験体系では、ガラス管内で突沸により発生した蒸気泡は、管内を上昇すると上部プレナム内のサブクール水の効果で完全に凝縮するため、二相界面の上昇はみられなかった。

Figure 11(a)(b)には、突沸発生時のガラス管内の温度、圧力時系列データをFFT解析(Fast Fourier Transformation)して得たパワースペクトルを示す。(a)は加熱量 $Q = 500\text{ W}$ 、上部プレナム水温 $T_c = 70^\circ\text{C}$ について、ガラス管内すべての温度・圧力変化のFFT解析結果であり、(b)は加熱量 $Q = 500\text{ W}$ について、圧力変化から計算した解析結果を上部プレナム水温ごとに比較して示している。Fig. 11(a)より、ガラス管内の温度・圧力変化はほぼ同一の卓越周波数をもつことが確認できる。なお、卓越周波数は加熱量 Q が大きい場合には Fig. 11(a)のようにそのピークが明確であるが、加熱量が減少すると卓越した周波数成分はみられなくなる。この理由は、低加熱量になるほど突沸が発生し難く、その周期性がなくなるためである。一方、圧力変化から計算した Fig. 11(b)の結果から、上部プレナム水温が低くなるほど卓越周波数は大きく

Fig. 10 Comparison of static pressure fluctuation for different upper plenum temperature

Fig. 11 Power spectrum densities of temperatures and pressure in the test tube
 (a) PSD of all temperatures and pressure at $T_c=70\text{ }^{\circ}\text{C}$
 (b) PSD of pressure fluctuation for various upper plenum temperatures
 (Input power $Q=500\text{ W}$).

なる傾向がみられる。Fig. 8にも示すように、上部プレナム水温が低く、ガラス管上部のサブクール度が大きい場合には、スラグ状蒸気泡の凝縮位置は上部プレナムからガラス管内に低下する傾向がある。これにより、低サブクール度の場合に比べて蒸気泡の凝縮に要する時間は短くなり、そのため突沸1サイクルの時間も短くなると考えられる。

Fig. 12は、以上の圧力変化のFFT解析から得られた卓越周波数と上部プレナム水温のサブクール度との関係を表している。圧力変化の卓越周波数は、上部プレナム水温に依存していて、そのサブクール度が大きくなるほど卓越周波数も増加する傾向がある。また、加熱量が大きくなるほど、突沸の発生頻度が増えるため卓越周波数は増加する。

Fig. 12 Relationship of water subcooling to dominant frequency of pressure fluctuation

3. 圧力・温度変化の相関特性

以上の結果から、突沸発生時にはガラス管内の温度および圧力は周期的に変化することが明らかとなった。ここでは可視化観察で明らかとなったスラグ状蒸気泡の流動とそれに伴う管内の温度・圧力の関係について考察を行う。垂直管内の水/空気系のスラグ気泡の特性については古くから多くの研究が行われているが、このうち深野ら¹²⁾は、内径 26 mm、長さ 8.45 m の垂直円管内のスラグ気泡の上昇特性について報告している。その中で、管軸に沿った数点で静水圧を測定し、得られた時系列圧力データの相関解析によってスラグ気泡の上昇特性と管内の静圧変動の関係について調べている。本実験は、ガラス管内で蒸気の凝縮を伴うため厳密には深野らとは流動条件が異なるが、実験で得たガラス管内の圧力と局所温度データを用いて、以下に示す深野らと同様な相関解析により突沸発生時のスラグ状蒸気泡の特性を調べる。

Figure 13(a)–(d)は、加熱量 Q および上部プレナム水温 T_C が異なる 4 つの条件について、ガラス管下部圧力変化 P と各熱電対 (T_1, T_2, T_3, T_4) の温度変化との相関関係を示している。各図の最下部のグラフは、位置 $x=0$ mm における圧力変化のデータから求めた自己相関係数 R_P であり、それ以外のグラフは圧力変化と局所温度変化との相互相関係数 ($R_{P1}, R_{P2}, R_{P3}, R_{P4}$) を測定位置ごとに示している。ここで相互相関係数は時系列の離散データ $x(t)$ 、および $y_i(t)$ に対して次式により定義した¹¹⁾。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y_i(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y_i(t+\tau) dt, \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{x(t)y_i(t+\tau)}{\sqrt{x^2} \sqrt{y_i^2}} = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sqrt{C_x(0)C_y(0)}}, \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

$x(t)$ には圧力変化 P を使い、 $y_i(t+\tau)$ ($i=1, 2, 3, 4$) として

Fig. 13 Comparison of cross correlation functions for different input power and upper plenum temperatures

管軸上の各測定点での温度変化 T_i ($i=1, 2, 3, 4$) を用いた。なお、相互相関係数についても (6) 式に示すように最大値が 1 になるよう規格化を行っている。

Figure 13 に示すように、 $Q=300$ W 以上では圧力変化の自己相関係数 R_p はすべての条件で周期的に変化していて、加熱量の大きい $Q=500$ W ではその周期的変化がより明確に示されている。相互相関係数に注目すると、例えば Fig. 13(a) に示すようにガラス管下部 ($x=0$ mm) の圧力変化の自己相関係数 R_p と各測定位置の局所温度変化との相互相関係数には時間遅れがあり、ガラス管上部ほど圧力変化に対する時間遅れが大きくなっていることが確認できる ($\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$)。ただし、 $x=300, 700, 900$ mm の測定温度にそれぞれ対応する τ_2, τ_3, τ_4 を比較するとその時間差は 0.1 秒程度であり、その差は非常に小さい。このように T_2 よりも上部の温度変化の時間遅れの差が小さい理由は、Fig. 3 の可視化観察にも示したように、加熱部から上昇する蒸気泡が T_2 より上部でスラグ状蒸気泡を形成し、それが管内を上昇することによって急速に温度変化が伝わることによる。また、各測定温度の時間遅れを表す τ_2, τ_3, τ_4 は圧力変化の周期のほぼ半分であり、両者はほぼ逆位相の関係である。すなわち、突沸によってガラス管内の水頭圧が減少し圧力が低下しているときには、温度は上昇し、逆に凝縮によって下部圧力が増加するときには、温度は低下することに対応する。一方、上部プレナム水温が低い (b) でも (a) と同様な傾向を示しているが、先に述べたように、管内を上昇する蒸気泡の凝縮位置の違いから、時間遅れ τ は全般に $T_c=70^\circ\text{C}$ よりも小さい。加熱量 $Q=300$ W に対応する (c) および (d) では、 $Q=500$ W に比べて全般に相関係数の時間遅れが大きい。これは $Q=500$ W に比べ $Q=300$ W では蒸気発生量が少なく、発生した蒸気泡がスラグ状に成長するまでに時間遅れが生じることによる。以上の結果から、圧力変化とガラス管内の局所温度は同一周期で変化しているが、それらには時間遅れのあることが示された。また、この時間遅れはガラス管上部ほどその差は小さく、スラグ状蒸気泡の流動と対応していることが示された。

ここまでの実験結果から、垂直ガラス管内の水を電気ヒータ加熱した場合の温度・圧力変化を含む沸騰特性が明らかとなった。Fig. 14 に、本実験結果と筆者らによる前報の結果⁹⁾、さらに Griffith の実験²⁾ のうち、作動液体が水について行われた突沸発生条件の比較を示す。縦軸は加熱量 (Q) で、横軸は垂直管の幾何的形狀を表すパラメータとして垂直管長さ (L_t) と管内径 (D) の比である L_t/D を用いて整理している。なお、Griffith の実験で用いられた垂直管は銅管であり、内部の作動液体の加熱には銅管外周に巻いた主電熱線ヒータと作動液体内に浸漬した補助電熱線ヒータが併用されている。

Figure 14 から、ガラス管内の水を電気ヒータ加熱した本実験と前報の結果は、ともに加熱量が低下すると突沸が

Fig. 14 Occurrence condition of geysering in the vertical tube

発生しない傾向であるが、その下限は異なっている。前述のように、前報ではガラス管の下部にその約15倍の内容積をもつ沸騰容器が設置されていて、沸騰容器内で発生した蒸気泡はまず沸騰容器上部に徐々に滞留し、液温が飽和温度を超えるまで過熱されたのち、蒸気泡がガラス管内へ流入することが可視化観察および温度測定によって示されている。このことから、容器形状パラメータである L_t/D に加え、下部沸騰容器固有の特性が突沸の発生条件に影響があることが推測される。一方、銅管を用いて行われた Griffith の結果でも、高加熱量では本実験と同様に L_t/D に関わらず突沸が発生している。これに対し、突沸発生の下限の加熱量 Q は L_t/D によって異なっていて、 L_t/D が大きくなると低加熱量でも突沸が発生する傾向がみられ、筆者らの実験結果と異なっている。以上のことから、円筒管形状の容器では高加熱量では L_t/D によらずガラス管内で突沸が発生する傾向があるため、脱硝工程の突沸防止策として、低加熱量でゆっくりと蒸発させる方式が望ましいといえる。ただし、突沸による放射性物質飛散を防ぐ安全対策の観点からは、突沸の発生限界を正確に予測することが重要であり、突沸発生条件に及ぼす容器形状や加熱方式の影響について、さらに実験的知見を蓄積して整理する必要がある。

IV. 結 論

内径 30 mm、管長 1,000 mm の垂直ガラス管内の作動液体を全長 190 mm の電気ヒータにより加熱した際の沸騰現象について実験的に調べ、以下の結論を得た。

(1) ガラス管底部の圧力測定および管軸に沿った局所温度の同時測定を行った。その結果、突沸発生時にはガラス管底面から 100 mm における、加熱部の作動液体温度は液水頭による静水圧上昇を考慮した飽和温度にほぼ等しいことが明らかとなった。一方、底面から 700 mm におけるガラス管内の作動液体温度は、測定温度の中で最も広い範囲で変化し、これは可視化観察のスラグ状蒸気泡の流動と対応していることが示された。

(2) ガラス管内の可視化観察を行い、垂直管内の突沸発生時の様相を明らかにした。ガラス管下部の加熱部では連続的に多数の蒸気泡が発生していて、それらは浮力により管内を上昇する。電気ヒータよりも上の非加熱部において、蒸気泡の一部は合体してスラグ状に急成長し、管内を上昇する。スラグ状蒸気泡は上部プレナムまで達すると凝縮し、その後上部プレナム内の水が管内を流下する。このスラグ状蒸気泡の凝縮位置は、上部プレナム水温および加熱量が低下するほど、ガラス管内の低い位置で生じる傾向がある。

(3) ガラス管内で突沸が発生すると、管内の温度および圧力は周期的に変化する傾向を示し、周波数解析の結果からそれらは同一周期であることを明らかにした。一方、電気ヒータの加熱量が小さくなると、ヒータ表面から発生する蒸気量は減少し、ガラス管内でのスラグ状蒸気泡の合体は生じないため突沸は発生しない。その場合、容器内の温度および圧力変化には周期的に変化しないことを示した。

(4) 突沸発生時のガラス管下部の圧力変化に対する、局所温度変化の相互相関解析を行った。その結果、圧力変化に対する温度変化の時間遅れはガラス管上部ほど大きくなることを示した。ただし、ガラス管下部からそれぞれ 300, 700, 900 mm の非加熱部内の時間遅れの差は小さく、突沸によって発生するスラグ状蒸気泡は非加熱部内から急速に成長する傾向のあることを明らかにした。

(5) 本実験結果と過去の研究を含めて、容器の幾何的形狀 L_t/D と加熱量 Q の関係から突沸の発生条件を整理した。円筒形状の容器では、高加熱量では L_t/D によらず突沸が発生する傾向があるため、脱硝工程の突沸防止対策として、低加熱量でゆっくりと蒸発させる方式が望ましいこ

とを示した。

— 参考文献 —

- 1) 日本機械学会編, 改訂気液二相流ハンドブック, コロナ社, 347-348, ISBN4-339-04578-0 (2006), [in Japanese].
- 2) P. Griffith, *Geysering in Liquid-filled Lines*, ASME 62-HT-39, 1-9 (1963).
- 3) 中西重康, 他, “蒸発管系の不安定流動(第2報, ガイセリング),” 日本機械学会論文集, **44**[388], 4252-4262 (1978), [in Japanese].
- 4) M. Aritomi, J. H. Ghang, M. Mori, “Geysering in parallel boiling channels,” *Nucl. Eng. Des.*, **141**, 111-121 (1993).
- 5) 原子力ハンドブック編集委員会編, 原子力ハンドブック, オーム社, 713-721, ISBN978-4-274-20443-2 (2007), [in Japanese].
- 6) M. Suzuki, “Discussion on artificial geyser affecting vessel design for innovative de-nitration,” *Proc. Global 2009*, Paris, France, Sept. 6-11, 2009, Paper 9175, [CD-ROM].
- 7) 鈴木翔太, 他, “電磁波加熱による過渡沸騰挙動に及ぼす物理因子の影響評価,” 日本原子力学会「秋の大会」予稿集, 北九州国際会議場, 9月19-22日, (2011), P33, [in Japanese], [CD-ROM].
- 8) 鈴木翔太, 他, “電磁波加熱による過渡沸騰現象のメカニズム解明,” 日本原子力学会「春の年会」予稿集, 福井大学, 3月19-21日, (2012), G10, [in Japanese], [CD-ROM].
- 9) 松村邦仁, 他, “垂直円筒容器内のガイセリングに関する研究,” 日本原子力学会和文論文誌, **11**[1], 49-61 (2012), [in Japanese].
- 10) 甲藤好郎, 伝熱概論, 養賢堂, 290 (1990), [in Japanese].
- 11) 日野幹雄, スペクトル解析, 朝倉書店, 25-66 (1996), [in Japanese].
- 12) 深野 徹, 他, “垂直に上昇する気水二相流の静圧変動特性 (スラグ流モデルによる静圧変動の解析),” 九大工学集報, **44**[5], 1-8 (1971), [in Japanese].