使用済み燃料プールにおける温度成層化の無電源解消法に関する研究*

Study on a Passive Method for Solving Thermal Stratification of Spent Fuel Pools

落合 克樹**
OCHIAI Katsuki橋長 宏明**
HASHINAGA Hiroaki師岡 慎一**
MOROOKA Shinichi

Abstract The external power supply of Fukushima nuclear power plant was lost by the Great East Japan earthquake, which might have resulted in shortage of water in the spent fuel pool. Many researchers are developing cooling system of spent fuel pool (SFP) by loop heat pipe without power supply. However, thermal stratification in SFP was not considered to predict the cooling performance. The purpose of this study is to develop the solving system for thermal stratification without power supply by injecting air to SFP. Simulated test using thermosensitive self-operated valve was done. The flow visualization test and the solving test for thermal stratification have been done by using three kinds of air injection structure. The following conclusions are obtained. ① Air injection method can solve the thermal stratification. ② Using the thermosensitive self-operated valve, the air can be injected without power supply. ③ Elbow type was suitable structure as air injection structure.

Keywords: Thermal stratification, Spent fuel pool, Loop heat pipe, No power supply

1. 背景および先行研究の課題

東日本大震災において福島第一原子力発電所は全電源喪失状態に陥り、結果として炉心溶融や放射性物質の放出といった過酷事故に進展した。この時4号機の使用済み燃料プール（SFP=Spent Fuel Pool）では、2 MW 程度の崩壊熱を使用済み燃料（SF=Spent Fuel）から除熱していた冷却システムが停止したため、熱の逃げ場がなくなり SFP の水は 84 °C 程度まで温度が上昇した[1]。SFP の水が蒸発したことにより水位が下がり、使用済み燃料が空焚きになってしまう危険性があった。以上の教訓から、外部電源を喪失した非常時にも

Fig. 1 Cooling system of spent fuel pool using loop heat pipe.

* Received: 11 June 2020 / Accepted: 18 September 2020 / Published online: 21 December 2020

** 早稲田大学 先進理工学研究科 共同原子力専攻 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

TEL: (03)5286-8216 E-mail: morooka@waseda.jp

SFP を無電源で冷却できるシステムの開発が急務となり、熱輸送に電源を必要としないループ型ヒートパイプ（以下、LHP=Loop Heat Pipe）を用いた SFP 冷却研究が多方面で実施されている[3-8]。Fig. 1 に LHP を用いた SFP 無電源システム（以下、ヒートパイプシステム）の一例を示す。従来研究では、LHP を用いた除熱量を算出する際には SFP の冷却水温度は常に一樣であるという仮定で除熱計算が行われていた[6, 7]。しかし、実際には崩壊熱により温度が上昇した冷却水はプール上面付近に滞留し、深度が増すにつれて温度は低くなる。これは温度成層化と呼ばれ、浴槽内の湯の温度分布などの身近な現象である。LHP の受熱部において冷却水温度と LHP 内冷媒温度の差が除熱量に影響するため、プール下部の水温が冷媒温度程度に低いとその部分では熱交換が行われず、ヒートパイプシステムによる伝熱量が減少する。すなわち、従来の研究には上述した課題があり、無電源によりプール内の温度成層化を解消するシステムが必要であると考えられる。

2. 無電源による温度成層化解消方法

著者は、プール内の温度成層化による除熱量減少を解消する方法として、片岡らが考えた逆熱対流性粒子の利用[9]、LHP 受熱部を高温部分に水平に設置、SFP の上部の水の空間を大きくしてその部分に LHP の受熱部を垂直に設置、気泡注入などの方法を検討し、その中から実機への導入を考慮してプール内に空気を注入する方法を選出した。気泡注入による温度成層化解消に関する研究は、貯水の温度成層化に起因する水環境悪化を改善する方法として多方面で利用されている。北浦、村井ら[10, 11]そして浅枝、池田ら[12-14]は、気泡注入による温度成層あるいは密度成層を解消する気泡と周囲流体の流体力学的メカニズムに関する研究を行っている。つまり、メカニズム面より流量、気泡サイズなどの気泡注入条件を改良することにより温度成層あるいは密度成層の解消の効率化を狙っている。駒形ら[15]は、原子力発電所の水平管の温度成層化解消に気泡注入が有効であることを報告している。本研究では、この気泡注入方法を無電源による SFP 温度成層化解消方法に適用することを考えた。従来研究では、電気を利用して気泡注入を考えているが、本研究では無電源による注入が重要な点で、従来研

Fig. 2 Schematic view of the solving system for thermal stratification without power supply.

究のように気泡サイズそして流量などの気泡注入条件を検討するのではなく、気泡を注入する例えば円筒などの気泡注入構造物を改良することにより温度成層解消の効率化を図ることを主眼としている。この点が従来研究との相違点と考える。この方法を組み込んだヒートパイプシステムの概略図を Fig. 2 に示す。LHP と自動気泡注入装置を SFP に新たに設置することを考えている。以下に、この解消方法の作動原理を説明する。

- ① 通常運転時には高压タンク内に圧縮空気を貯蔵しバルブは閉じておく。
- ② 全電源が喪失するなど異常状態が発生した際には、SFP の冷却が不可能となる為 SFP 上面温度が上昇する。温度成層化が発生する。
- ③ SFP 上面温度が温度感式バルブの設定温度になるとバルブが開き、減圧弁を通してプール内に空気を注入する。
- ④ 気泡により対流を発生させ、温度成層化を解消しつつループ型ヒートパイプで除熱を行う。

3. 研究目的および本研究の位置付け

本研究の最終目的は、無電源により SFP 内の温度成層化を解消し、LHP により SFP 内の崩壊熱を無電源で除熱するシステムを開発することである。例えば、福島原子力発電所 1 から 6 号機の SFP の寸法は、事故報告書[2]によれば、最深部深さ 11.8 m、最大幅 12.2 m そして最大長さは 10.4 m であり、使用済み燃料の貯蔵体数、崩壊熱そして貯蔵位置も異なっており、崩壊熱による自然対流も 3 次元性があり、この状態を実験室レベルで模擬するのは困難である。そこで、本研究の位置付けは、実験時の流体挙動そして温度変化を観察するという実験室スケールの基礎研究を通して

より効果的な空気注入法の選定そして無電源で空気を注入する方法の検討について、以下の点を目的としている。

① 無電源でプール内に空気を注入し、温度成層化を解消するシステムの検討及び実験による検証を行う。

② 効果的に温度成層化を解消する空気注入方法を選定する。

研究目的②を検討する実験として温度成層化解消実験と流動可視化実験を行うが、この実験では試験条件、測定位置そして測定方法は同じとして、空気注入方法の違いのみを抽出している。

4. 無電源での空気注入実験

空気注入は、温感自力式開閉バルブを使用して温度を感知して無電源で開閉する方法を検討する。このシステムの成立性を検討する実験装置を Fig. 3 に示す。SFP を模擬した水槽(ステンレス製、高さ 500 mm×横幅 600 mm×奥行 200 mm)、温度成層を作り出す温度調整付きパイプヒータ(ヒータ長:365 mm、出力 1000 W)、水温測定用熱電対 10 個(測定位置は各 40 mm 間隔)そして円筒形(内径 48 mm、外径 55 mm、長さ 240 mm)の空気注入構造物から構成されている。Fig. 3 には熱電対位置そして構造物の主要寸法を示す。構造物は容器の中央に、設置した。空気は、空気ポンプより温感式バルブを介して空気注入構造物の下部より注入される。空気流量は、2.0 L/min である。温感式バルブとしては、温度が上昇すると膨張する充填物(パラフィンワックス)で、無電源で作動するワックス式小型温度調節弁[16]を用いた。この弁は、水温が設定以下の場合には流路 A(図中 tube A)から空気が外部に排出され、設定温度を超えると、流路が切り替わり水中に空気を注入するようになっている。

Fig. 4 に、横軸にヒータ加熱開始からの時間、縦軸に測定温度の内最も高い温度と最も低い温度をとり示す。ヒータ加熱開始後最大温度と最少温度の差が次第に大きくなっており、温度成層化が進んでいることがわかる。約 35 分において、バルブが自動的に作動し空気が注入される。空気注入約 5 分後に温度成層が解消され、水槽内の温度分布は均一になった。また、Fig 4 の試験前に予備試験を実施し、気泡による温度成層化解消[17]そして温感式バルブの作動についての再現性

Fig. 3 Test apparatus of the solving system for thermal stratification without power supply.

Fig. 4 Test results for the solving system for thermal stratification without power supply.

については確認している。

以上、温感式バルブを用いる事により無電源で空気をプール内に注入し、温度成層化を解消するシステムが実現可能であることを実験的に明らかにすることができた。

本研究システムの課題として Fig. 2 の Air tank を小型化する必要がある。村井ら[11]が反復的に気泡を発生することにより温度成層破壊が促進されることを報告しているので、今後は温感式バルブを無電源で ON-OFF することにより、空気使用量の抑制、つまり Air tank の小型化を検討したいと考えている。加えて、本論文では、設定温度以下で空気が外部に排出する弁を用いたが、外部に空気を排出しない弁もあり、空気タンクの容量を低減のためには弁の仕様についても今後検討する必要がある。

5. 温度成層化解消実験と流動可視化実験

5.1 実験の目的

本章では、効果的に温度成層化を解消する空気注入方法の選定をおこなった。

まず空気注入方法を選定し、次にプール内の流動可視化実験を行い、この実験結果を基に注入方法の絞り込み、そして新しい注入方法を検討した。流動化可視化結果を基に数種類の試験体を選択して、温度成層化解消実験（解消実験）を行った。

各実験での選定の基準は、流動可視化実験ではプール内を均一に混合できること、そして温度成層化解消実験は空気注入後成層化解消する時間が短いことを判断材料とした。成層化解消時間が短いことにより、Fig. 2 に示した空気タンクの容量を減少することが可能となる。また、注入空気量は多いほど解消時間は短くなることは、予備実験で確認している。本論文の目的は、注入方法の選定であるので、各試験で空気流量は 0.4 L/min と固定した。この流量は実機を考慮して設定したものではなく、このシステムを実機に適用する場合は、実験などで空気流量の解消時間の感度そして空気タンクの容量を考え決める必要がある。

5.2 空気注入方法の選定

Fig. 5 に実験に用いた空気注入構造物（以下、構造物）を示す。空気注入部分と他の部分との密度差による自然循環により混合を促進することを意図している。基本形状は円管（煙突）と仕切板で、高さを 3 種類変えている。エルボ形状の煙突は円管（煙突）・仕切板での試験結果に基づいて考えた構造であり、選定した理由については後述する。図中に、各構造物の寸法そして材質を示す。

5.3 実験装置

流動可視化実験と温度成層化解消実験は同じ装置を用いて行った。実験装置の概略図を Fig. 6 に示す。水槽としては、幅 430×奥行 280×高さ 280 mm の透明な水槽を用いた。空気はエアータンク、流量計、逆止弁そして流路分配弁を介して下部より注入される。流体温度分布は熱電対により測定し、データロガーを介して PC に保存した。流動の可視化は、トレーサ粒子（ナイロンパウダ、粒子径 4.1 μm ）を水中に入れ、その粒子の動きをシート光発生器（LHA-DA432Z-

Fig. 5 Air injection structure.

Fig. 6 Test apparatus for flow visualization test and the solving test for thermal stratification.

Fig. 7 Method to fix air injection structure (Chimney).

S/07-9611、オーム電機）とカメラ（EOS Kiss M）により測定した。Fig. 7 に円筒形の構造物を設置した様相および熱電対位置を示す。Fig. 6 に示すように空気注入口は 3 カ所ある。空気注入位置の条件を固定し構造物による差異をみる点、空気注入位置から遠いほど混合しにくいと考えられる

ので右の壁より最も距離をとれる左端の位置を空気注入位置として選択した。空気注入管は、外径 6 mm、内径 4 mm のシリコン管を用い、空気出口は管であり数ミリの気泡が出ている。Fig. 5 に各構造物の設置位置を示す。構造物の高さの中心が一致するように設置している。水槽の体積は福島原子力発電所の SFP の約 1/30,000 であり、課題のところでも述べるが今後スケール効果を検討する必要がある。

5.4 流動可視化の原理と本研究での可視化手法

流体運動の可視化技術については古くから数多く考案されており、液体の流れに関する可視化技術としてはトレーサー粒子法や色素流法、毛糸法、光学的方法、塗膜法、液晶法などがある。近年ではカメラ技術やコンピュータ処理速度の向上に伴い PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) や PTV (Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡法) といった測定技術が誕生し、可視化技術の主流として多方面で流体の測定や解析に用いられている。PIV では非接触で流れ場の定量測定が可能であるが、そのためにはレーザーやハイスピードカメラ、流体解析ソフトウェアが必要となる。本研究においては流速分布の絶対値そして分布ではなく 5.2 で選定した各空気注入方法の流動様相画像 (流跡線画像) より水の流速が遅くあるいは淀んだ攪拌が不十分な領域を可視化することにより、空気注入方法の選定を行うことを考えており、この目的に沿った可視化装置を製作した。

本研究では、シート状のレーザーの代用として LED ライトを 2 重スリットに通しシート状となった光を利用した。シート光の照射位置は奥行き方向の中心かつ構造物の中心でシートの厚み (可視化範囲) は 10 から 15 mm である。また、構造物によりシート光が遮断されるのを避けるために、Fig. 6 に示す 2 台の LED ライト (Light generating unit) から照射した。また、温度測定点そして空気注入口もシート光の位置である。

5.5 実験条件、実験方法およびデータ処理

流動可視化実験そして温度成層化解消実験の方法を以下に示す。圧力は大気圧そして空気注入量は 0.4 L/min とした。

(1) 流動可視化実験

- ① 実験条件 (構造物、空気注入量・位置、データロガー) を設定する。

- ② 水槽の底から 275 mm の位置まで注水しトレーサー粒子を混入する。シート光を照射し空気注入を開始する。

- ③ 空気注入後、最低 5 分間放置し、攪拌が発生している領域の変化が無くなっていることを目視で確認後可視化映像をカメラ収録する。

(2) 温度成層化解消実験

- ① 実験条件 (構造物、空気注入量・位置、データロガー) を設定する。
- ② 上部より温水を入れる事により人工的に温度成層状態を作成する。
- ③ 空気注入し、データロガーでの温度測定収録開始。
- ④ 容器内の温度が均一になった時に測定終了。

(3) 流動可視化実験の撮影動画のデータ処理

流動可視化実験では、生データとして流動の可視化動画が得られる。動画編集ソフトウェアの Adobe Premiere Pro CC 2018 で、前処理として明暗/コントラスト調整やトリミングを行った。その結果を、数値解析ソフトウェア MATLAB を用いて流跡線画像を作成した。

流跡線図像は撮影動画の 1 フレームごとにトレーサー粒子が写っている画素を全て MATLAB (Regionprops アルゴリズム) で識別し、座標として記録したものを重ね合わせることで作成した。

6. 試験結果および検討

6.1 流動可視化実験

流動可視化実験の位置付けについては、5.1 で説明したが、5.2 で選定した空気注入方法について可視化画像 (流跡線画像) を用いて、流れが遅いあるいは淀んでいる領域から選別する。最終的には、温度成層化解消実験 (解消実験) により最終判定を行う。

Fig. 8 に代表的な可視化画像 (流跡線画像) を示す。(a)、(b) は煙突そして (c)、(d) は仕切板の結果を示す。それぞれ、構造物の高さが異なる場合の結果を示している。加えて、Fig. 8(e) は構造物がない場合である。Fig. 8(a) から (e) は、600 frames (約 10 秒間) の粒子の流跡線を白い線で表している。図中、空気注入場所を△で示す。全実験で同じ位置である。流跡線の少ない領域が、水の流速が遅くあるいは淀んだつまり攪拌が不十分な領域と考えられる。Fig. 8(e) に示すように空気を注入するだけでは流れの方向が定まらず流

速を打ち消し合ってしまう頻度が増えるため、大きな攪拌が生まれなかった。つまり、Fig. 8(e)中に○で囲んだ部分に見られるように空気注入口から離れるほど攪拌はされにくく、気泡を注入するだけでは空気注入口から遠い領域の攪拌は不十分である。一方、煙突や仕切板で流路を作ることにより大きな攪拌が生まれた。全体的に、Fig. 8(a)から(d)中に○で囲んだ部分に見られるように攪拌が不十分である。煙突と仕切板を比較すると、仕切板の方が攪拌力は大きい。一つの要因として、煙突下部から水が流入する抵抗が大きいためと考えられる。

煙突や仕切板の構造物の液面近傍の横方向の流れは、放射状に広がるが、その流れを一方に偏向することにより構造物からより遠い位置での攪拌を促進できるのではないかと考えた。加えて、実験中の目視観察によると、気泡により水面が揺動し、そこで気泡のエネルギーが部分的に失われてしまい、その揺動を少なくすることにより横方向の流れが促進できるのではないかと考えた。このような点を考慮して、Fig. 5に示すような鉛直方向の流れを水平方向の流れに変化させる形状の配管であるエルボ管を構造物として考えた。エルボ管を用いた場合の流跡線画像をFig. 8(f)に示す。600 frames(約 10 秒間)の粒子の流跡線では画面が真っ白になるので、エルボ管の場合は 200 frames(約 3 秒間)の流跡線画像を示す。エルボ管により他の構造物に比較して均一に水槽内が攪拌されていることがわかる。目視観察によると、エルボにより水面の揺動は抑えられた。ただし、今回の可視化はある断面(2次元)での攪拌を計測したものであり、3次元的な攪拌についての実験的な検証、そして実験に基づくエルボ形状の改良が必要である。

6.2 温度成層化解消実験

流動可視化実験の結果より、仕切板の方が煙突より水槽内の攪拌力が強いこと、エルボ管が他の構造物よりも水槽内が均一に攪拌されることがわかった。そこで、仕切板やエルボ管を用いて温度成層化解消実験を行った。温度成層化解消の効果への評価は、各時刻における測定温度の最大値と最小値の差(最大温度差)を測定し、最大温度差が初めて 1.5℃以下になった時間を温度成層化解消時間とした。Fig. 9は横軸に時間を、縦軸に最大温度差をとり、各構造物の最大温度差の時間

Fig. 8 Test results of trajectory for typical air injection structures.

変化を示す。時間ゼロで空気が注入される。空気を注入しない場合(□)は、温度成層化の解消効果はほとんどない。一方、空気注入は温度成層化解消への効果があることがわかる。仕切板(L) (○)そして空気のみ(▲)は初期の最大温度差が他に比較して高く、その差を考慮すると 30 秒程度までは各注入方法での最大温度差の時間変化はほとんど同じであるが、30 秒を過ぎるとエルボ(●)での温度成層化を解消する効果が顕著に表れている。仕切板の場合、最大温度と最小温度は、大部分の時間で Fig. 7 の熱電対位置 D1、D4 であった。Fig.10(a), (b)にエルボ管と仕切板(M)のD1からD4の位置での温度の時間変化を示す。他の仕切板の場合も温度挙動はほとんど同じである。D2(○)の位置までは空気注入直後に温度が変化し混合が進んでいる。エルボ管の温度変化の勾配が大きいので、エルボ管の方が混合促進が大きい。30秒でエルボ管ではD3(▲)の温度が急激に上昇し(矢印A)、50秒ではD4(△)まで混合が進んでいる(矢印B)。一方、仕切板(M)では、D3、D4への混合はエルボ管に比較して遅く、また温

度変化も小さいため、エルボ管に比較して混合促進が小さいと考えられる。つまり、エルボ管の場合、30 秒以降に温度が低い D3、D4 まで混合が進んだため他の注入法より効果が出たと思われる。エルボ管の場合、D3 への混合が進むまでは、最大温度と最小温度は、D1、D4 であるが、D3 まで混合が進むと D1、D2 の温度はほとんど同じになり、更に D4 まで混合が進んだ後、D1 から D4 の温度差は、急激に小さくなり上部と下部での混合が更に促進されていることがわかる。D3 まで混合が進んだ時間以降は、最大温度と最小温度の位置が B、C 列に変わる場合もある。

Fig.11 に各構造物の温度成層化解消時間を示す。仕切板のありなしそして仕切板の高さの影響はほとんど無いが、エルボ管の温度成層化の解消性能が本試験範囲内では一番良いことがわかる。やはり、水面近傍で横方向に流れを作る事は温度成層化解消に重要であることがわかった。以上のように、空気注入により温度成層化を解消できることがわかった。より効果的な注入形状としては、本試験範囲内ではエルボ形状が良いことを実験的に明らかにした。ただし、今回の実験ではある断面（2 次元）での攪拌を計測したものであり、3 次元的な攪拌についての実験的な検証が必要と考えられる。加えて、前述したように、今回の試験装置は実機の 1/30,000 であり、スケール効果つまりどこまで、このエルボの促進効果が到達し、使用済みプールに設置するエルボ管の数そして固定方法などを検討することが今後の課題である。

7. 結論

本研究の成果のまとめは下記の通りとなる。

- ① 温感式バルブを用いる事により無電源で空気をプール内に空気を注入し、温度成層化を解消するシステムが実現可能であることを実験的に明らかにすることができた。
- ② 空気注入時の容器内温度分布の測定と流動の可視化を行う装置と、データの処理により実験結果を視覚的に捉えられるプログラムを作成した。
- ③ 流動可視化実験と温度成層化解消実験の併用で、空気注入により温度成層化を解消することがわかった。より効果的な注入形状とし

Fig. 9 Time history of maximum temperature difference for typical air injection structures.

(a) Elbow

(b) Plate(M)

Fig. 10 Time history of temperature for elbow and plate(M).

てはエルボ形状が良いことを実験的に明らかにすることができた。

本研究の課題としては、

- ・本論文では、容器の 1 断面についての 2 次元の

Fig. 11 Solving time of thermal stratification for typical air injection structures.

測定結果に基づいて検討を行ったが、今後は、容器内では奥行き方向の流れについての検討が必要である。

・今回の試験装置は実機の 1/30,000 であり、スケール効果を実験的に検証するのはコストそして時間がかかるので、今後は試験データに基づいて検証された流体シミュレーション (CFD) も必要と考える。

参考文献

- [1] Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of TEPCO, Investigation Report for the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations, 105-350 (2012/6/20)(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0303.pdf, September 20, 2020) (in Japanese).
- [2] Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of TEPCO, Investigation Report for the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations (Attachment), 530 (2012/6/20)(https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0306.pdf, September 20, 2020) (in Japanese).
- [3] Ye, C., Zheng, M. G., Wang, M. L., Zhang, R. H. and Xiong, Z. Q., The Design and Simulation of a New Spent Fuel Pool Passive Cooling System, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 58, 124-131 (2013).
- [4] Katsuki, R., Shioyama, T., Iwaki, C., Abe, S., Katayama, K. and Komatsu, Y., Development of Passive Cooling System for Spent Fuel Pool (3) Evaluation of Thermal Characteristic for Heat Radiator, *Proc. Annu. Meeting of AESJ*, N27 (2013).
- [5] Iwaki, C., Abe, S., Shioya, T., Katsuki, R., Komatsu, Y. and Takiwaki, K., Development of Passive Cooling System for Spent Fuel Pool (2) Evaluation of Natural Circulation Loop Characteristic, *Proc. Annu. Meeting of AESJ*, N26 (2013).
- [6] Ohashi, K. and Morooka, S., Natural Convection Cooling System for Spent-Fuel Pool, *Proc. Annu. Meeting of AESJ*, M28 (2013).
- [7] Asaki, D. and Morooka, S., Study about Downsizing Air Cooling Equipment of Spent Fuel Pool by Experiment, *Proc. 20th National Symposium on Power and Energy System*, F241 (2015).
- [8] Singh, R., Mochizuki, M., Nguyen, T. and Saito, Y., Heat Pipe Cooling System for Safer Storage of Spent Fuel in Nuclear Plant, *Proc. 19th National Symposium on Power and Energy System*, B213 (2014).
- [9] Kataoka, I. and Yoshida, K., Development of Inverse Natural Convective Fluid and Its Thermo-Hydrodynamic Characteristic, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 26, Issues 2-4, 345-353 (2002).
- [10] Kitaura, H., Murai, Y., Tasaka, Y., Kumagai, I. and Kino, S., Spatiotemporal Structure of Density Destratification by a Bubble Plume, *Transactions of the JSME*, Vol. 79(801), 966-979 (2013).
- [11] Murai, Y., Kitamura, H., Tasaka, Y. and Kino, S., Flow Mechanism Visualization of Thermal Destratification in a Dam by a Bubble Plume, *Proc. of 92th JSME Fluids Engineering Division Conference*, 0205 (2014).
- [12] Ikeda, H., Sasaki, T. and Suga, K., Fundamental Study on Flow Pattern and Oxygen Supply Aeration Using a Micro-Bubble Aeration Device in a Two-Layered Stratification, *Proc. Hydraulic Engineering*, Vol. 45, 1213-1218 (2001).
- [13] Asaeda, T. and Imberger, J., Structure of Bubble Plumes in Linearly Stratified Environments, *J. Fluid Mech.*, Vol. 249, 35-57 (1993).
- [14] Ikeda, H., Takahashi, K., Asaeda, T. and Suga, K., Entrainment Properties of Two Dimensional Bubble Plumes in Linearly Stratified Environments, *Proc. Hydraulic Engineering*, Vol. 40, 631-636 (1996).
- [15] Komagata, D., Yokobori, S., Aoyama, T. and Tanaka, N., A Study of Active Control Technique to Avoid Thermal Stratification, *Proc. Yamanashi District Conference of JSME*, 48-49 (2013).
- [16] TRP trading co. Ltd., Wax-Type Small Temperature Control Valve, (<https://www.trp-trading.co.jp/products/detail.php?num=38&from=category>, September 20, 2020).
- [17] Ochiai, K. and Morooka, S., A Passive Method for Solving Thermal Stratification of Spent Fuel Pools (Consideration of Method by Air Injection), *Proc. JSME Multiphase Flow Symposium*, P068 (2018).