

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14293

研究課題名(和文)多相流体による自然循環流量促進に関する研究

研究課題名(英文)Study on natural circulation flow using multi-phase flow

研究代表者

師岡 慎一 (Shinichi, Morooka)

早稲田大学・理工学術院・特任教授

研究者番号：10528946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自然循環による溶融炉心冷却システムとナノ流体による限界熱流束向上を組み合わせることにより無電源による溶融炉心冷却を目指した。多相流体としては、水・空気・ナノ粒子(酸化チタン)を、円管、矩形管、テーパ管の垂直試験体を用いた。結果を以下に示す。粘性係数が約10%増大したが、多相流体の自然循環流量は水・空気二相流と大差がなく、多相流体の促進効果が働いたと考えられる。構築した予測手法は、多相流体の自然循環流量を10%以内で予測できる。構築した手法を考案したナノ流体を用いた溶融炉心冷却システムに適用し、従来システムと比較して除熱性能が向上することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop the molten core cooling system without the electric power using the natural circulation and critical heat flux enhancement effect by nano fluid. The multiphase flow which mixed air and nano-fluid (water and nano particle (TiO₂)) was used as the test fluid. Seven kinds of vertical test section are used; three circular tubes, two rectangular channels and two tapered tubes. The following conclusions can be obtained. Viscosity increased by about 10%. However, there was approximately no great difference between the flow performance of the natural circulation of multiphase flow and the air-water two phase flow. The developed method can be predicted the natural circulation flow rate of the multiphase fluid with an error of less than 10 percent for various shaped channels. When this prediction method was applied to our molten core cooling system, it was clear that the cooling performance of our system was more than that of the current system.

研究分野：原子炉熱流動

キーワード：熱流動 自然循環流量 過酷事故 ナノ流体 溶融炉心冷却システム

1. 研究開始当初の背景

苛酷事故時に、放射性物質での被害をなくすため、熔融炉心を無電源で原子炉格納容器内にとどめる必要がある。このため、熔融炉心を保持し冷却する熔融炉心冷却システムの除熱性能（限界熱流束）を増大させる必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、報告者らが考案した熔融炉心冷却システム[1]とナノ流体による限界熱流束向上[2]により無電源による熔融炉心冷却を目指している。そのため、ナノ粒子、水そして気体で構成される多相流体の自然循環流量の評価に必要な多相流体のボイド率、圧力損失を評価するモデルを作成し、試験データと比較する事により、多相流体の自然循環量を予測する手法を構築し、その手法により検討した熔融炉心冷却システムの性能を評価した。

触流量センサ(FD-Q20C:KEYENCE)によって測定を行い、空気注入量は空気ポンプより吐出される空気量を流調弁で調整し、空気流量計により測定した。試験ループ各部での圧力損失は Fig. 1 (a)に示す各 Tap 間の差圧を差圧計により測定した。測定値は、データロガー(NR500:KEYENCE)により記録を行った。差圧計は Tap1,2間($\Delta P1$)と Tap2,3($\Delta P2$)間、Tap3,4($\Delta P3$)間の3箇所に設置し、ダウンコマ、下部パイプ、空気注入上昇管部の流路出入口間の圧力損失を測定した。なお、各測定器での繰り返し測定精度による誤差は、非接触流量計が設定した測定レンジに対して約2%(約1 l/min)、空気流量計が測定レンジに対して約1.5%(約0.5 l/min)、差圧計では約3%(約300 Pa)である。ボイド率はFig. 2に示す試験体の入口と出口弁を用いて締切法により測定した。

(2) 試験体

本試験での空気注入上昇管部(試験流路)として、アクリル円管(内径 36 mm)、内径の異なる円管2種(SUS製、内径 10 mm、25 mm)と、断面が正方形の矩形管2種(SUS製、10 mm×10 mm、25 mm×25 mm)、断面積の変化するテーパ状角管(SUS製、拡大、縮小)に対して拡大、縮小の二方向の計7種の垂直試験体を用いた。試験体概要図を Fig. 1(b)に示す。

(3) 試験条件、試験方法

装置上部は大気圧に開放されており、流体には水-空気-ナノ粒子(酸化チタン)の3成分固液気のみ多相流体を用いた。上部タンクの底から約200 mmまで水道水を注水した後、酸化チタンを注入し、所定の濃度に調整した。ナノ粒子には AEROXIDE TiO2 P25 を使用した。Fig. 3 にナノ流体の写真を示す。使用流体温度は常温、非加熱で、多相流発生のための空気の注入量は 1.5~2 l/min から 20.0 l/min の間で 2/min ごとに変化させている。また、ナノ流体の濃度は基本的には、0.01 から 0.05wt%の範囲で行ったが、より広範囲で濃度の影響を検討するために内径 36mm の円管の場合は、0.01 から 0.5wt%の範囲で行った。はじめに、空気注入上昇管部の下部に設けられた空気注入口より、一定の流量で空気を注入する。流動状態が定常になったところで、自然循環流量、各部の圧力損失の測定値をデータロガーにより記録する。測定終了後、空気注入量を変化させ、同様に測定、記録を行い、自然循環流量の空気流量依存性を調べる。各濃度で試験を行った後 試験水をサンプリングし、毛管上昇方式表面張力計そしてウベローデ粘性計で ナノ流体の表面張力そして粘性係数を測定した。

(4) 自然循環流量評価手法

本研究での自然循環流量予測手法は、自然循環ループ全体の圧力損失の総和がゼロとなる流量を自然循環流量とする考え方を基

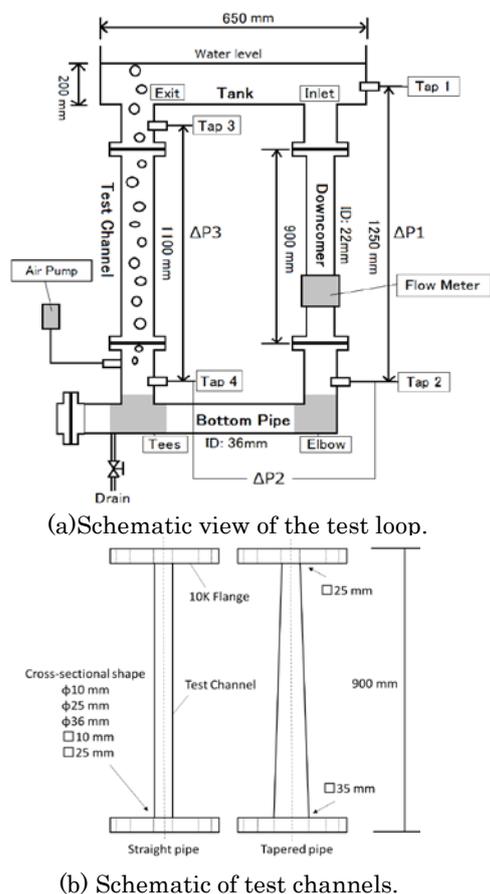


Fig.1 Schematic views of natural circulation loop .

3. 研究の方法

(1) 試験装置および試験体

試験装置の概要を Fig. 1(a)に示す。試験ループは上部タンク、ダウンコマ部、下部パイプ部、空気注入上昇管部で構成されている。上部タンクは SUS 製の直方体であり、ダウンコマ部は内径 22 mm の SUS 製円管である。自然循環流量は、ダウンコマ部に設置した非接

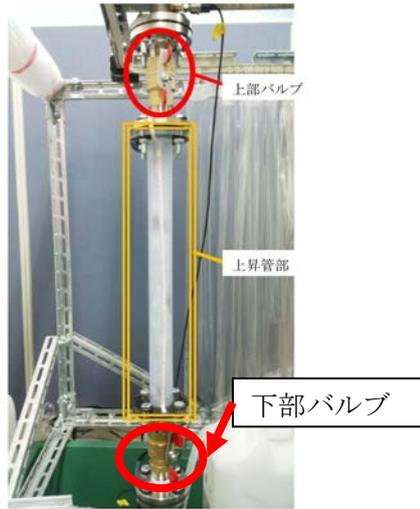


Fig.2 Test section for void fraction measurement

本としている金川・師岡[3]と同じである。その手法の概要を説明する。まず、Fig.1(a)に示したループ各部の圧力損失 ΔP_i ($i = 1, 2, 3$)は、それぞれの位置圧損、摩擦圧損、局所圧損、加速圧損の考慮から

$$\Delta P_i = \rho_i g \Delta h_i - \Delta P_{fi} - \Delta P_{Li} - \Delta P_{ai} \quad (1)$$

と表せる。ループ1周分の圧力損失の和は0であるから、式(1)の和をとることで、

$$\sum_{i=1}^3 \rho_i g \Delta h_i - \left(\sum_{i=1}^3 \Delta P_{fi} + \Delta P_{Li} + \Delta P_{ai} \right) = 0 \quad (2)$$

となる。式(2)の左辺第一項はループ内での位置圧力損失の和であり、ループ内の密度差から生じる駆動力を示す。本実験体系においては、液密度 ρ_{SF} と試験体内の二相密度 ρ_{TF} の差を用いて

$$\sum_{i=1}^3 \rho_i g \Delta h_i = (\rho_{SF} - \rho_{TF}) g h \quad (3)$$

と表せる。式(2)の左辺第二項は、ループ全体の摩擦圧損、加速圧損、局所圧損の和を示しており、駆動力と流動圧損の総和が等しくなることを示している。式(2)が成り立つ場合のループ内に流れる流動が自然循環である。式(2)の各項は流量についての陰関数であるので、自然循環流量を繰り返し計算による数値解法で求めた。Fig.4に計算のフローチャートを示す。

(5) 流動圧力損失の評価

試験ループ全体で生じる摩擦圧力損失、加速圧力損失、局所圧力損失の合計値として求める。

二相流部の摩擦圧力損失は、単相流の圧力損失に二相増倍係数を掛けることにより求めた。



Fig.3 (Water-TiO₂) Nano-fluid

$$\Delta P_f = \lambda \frac{G^2 L}{2 \rho_1 D_H} \phi_{f0}^2 = \lambda \frac{L W^2}{2 \rho_1 A^2 D_H} \phi_{f0}^2 \quad (4)$$

ここでの摩擦損失係数 λ は、Blasius[4]とNikuradze[5]を用いて求めた。また、二相増倍係数の相関式に関しては、常温大気圧下での試験データとの良い一致が報告されている Lockhart-Martinelli 相関を用いた Chisholm モデルを選定し、評価を行った[6]。加速圧力損失、局所圧力損失に関しては、分離流モデル、均質流モデルを用いた。前述したようにナノ流体の粘性係数、表面張力は実測値を用いた。粘性係数は水よりも大きく本試験範囲内では、水よりも最大10%程度大きかった。表面張力は水と比較して大きな差はなかった。

4. 研究成果

(1) 多相流体のボイド率

Fig.5は、横軸に平均クオリティ、縦軸にボイド率をとり内径36mm, 25mmの試験データを示す。ナノ流体の濃度は0.01から0.05である。この試験結果より、多相流体のボイド率は、この濃度範囲ではクオリティが同じ

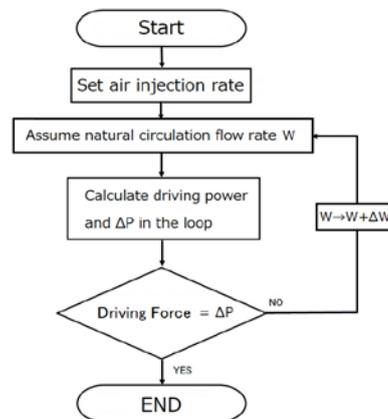


Fig.4 Flowchart to predict natural circulation flow

場合、濃度に依存しないと考えられる。Fig. 6は、横軸にボイド率の測定値、縦軸にボイド率の予測値を比較したものである。予測には、IshiiのDrift-Flux model[7]を用いた。このモデルにより、多相流体のボイド率を予測精度(計算値-測定値)5%以内で予想できる。したがって、自然循環流量予測の二相流密度の予測には、このモデルを用いる。

(2) 多相流体の自然循環流量

Fig. 7(a), (b)は、横軸に空気流量、縦軸に自然循環流量をとり円管と矩形管の自然循環流量のナノ流体の濃度依存性を示す。Fig. 8は、横軸にナノ流体の濃度、縦軸に自然循環流量をとりナノ流体の濃度が更に大きな場合の試験結果を示す。ナノ流体の粘性係数が約10%増大したが、多相流体の自然循環流量は水-空気二相流とほぼ大差がなかった。多相流体の促進効果が働いたと予想される。ナノ流体も水と同様に自然循環を起こし流動することができ、流路のつまりなどの問題も無く、安定してその現象が起きることがわかった。

(3) 自然循環流量予測精度の評価

Fig. 9に各試験流路における自然循環流量の予測値と測定値との比較を示す。ほとんどの予測結果が±10%以内に入っていることが

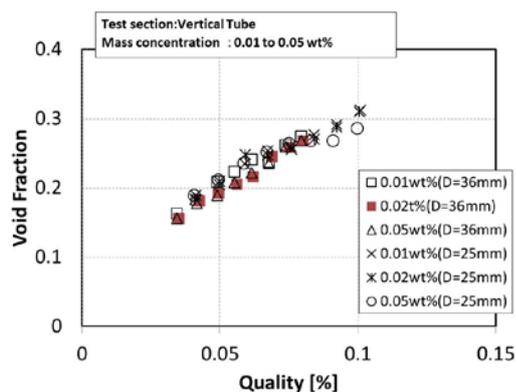


Fig.5 Effect of mass concentration on void fraction

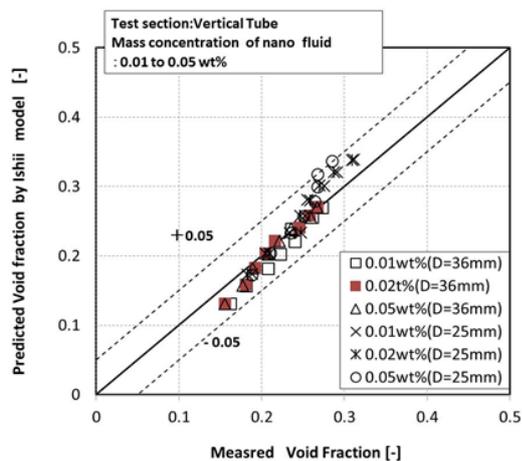


Fig.6 Comparison with Ishii void fraction model

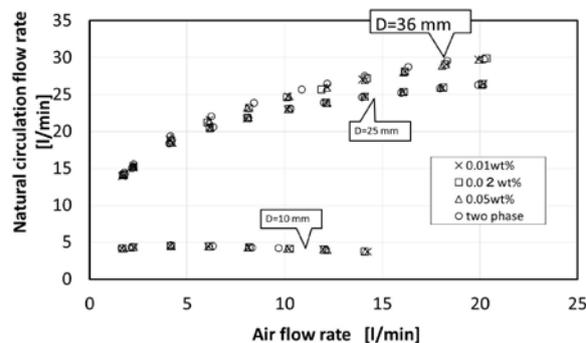
わかる。

(4) 溶融炉心冷却システムの健全性評価

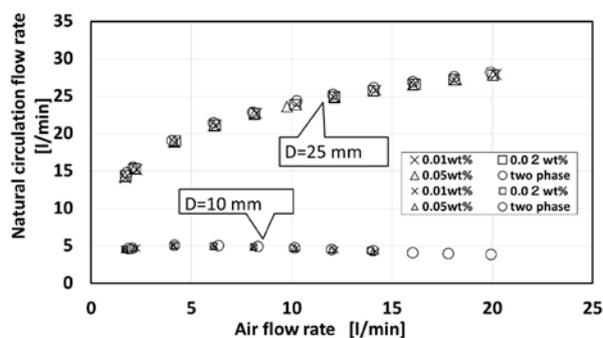
本研究で構築した多相流体自然循環流量予測手法を Fig. 10 に示す独自に考案した溶融炉心冷却システム[1]に適用した。Fig. 11は、従来システムと本研究のシステムの余裕度との評価結果を示す。余裕度とは、(限界熱流束) / (溶融炉心からの発生熱量)である。従来システムに比較して最大2倍程度の余裕があることがわかった。

(5) 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。
○多相流体の流動特性(自然循環流量、ボイド率)は水-空気二相流とほぼ大差がなかった。多相流体も水-空気二相流と同様に自然循環を起こし流動することができ、流路のつ



(a) circular tube.



(b) rectangular tube.

Fig.7 Effect of mass concentration on natural circulation flow rate

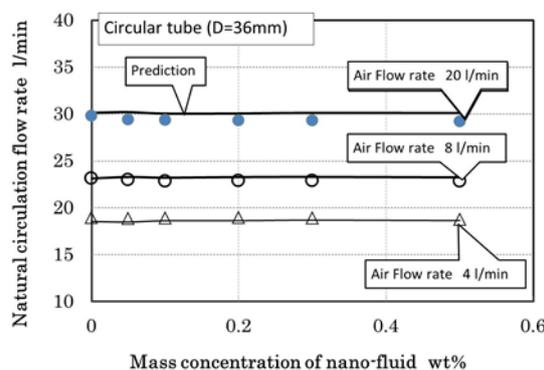


Fig.8 Effect of mass concentration on natural circulation flow rate (mass concentration 0-0.5 wt%)

まりなどの問題も無く、安定してその現象が起きることがわかった。○本研究で構築した予測手法は、多相流体の自然循環流量を10%以内で予測できることを明らかにした。○本研究で構築した多相流体自然循環流量予測手法を独自に考案したナノ流体を用いた熔融炉心冷却システムに適用し、従来システムと比較して除熱性能が向上することを明らかにした。

ナノ流体を用いた熔融炉心冷却システムを実用化するためには、模擬試験装置により

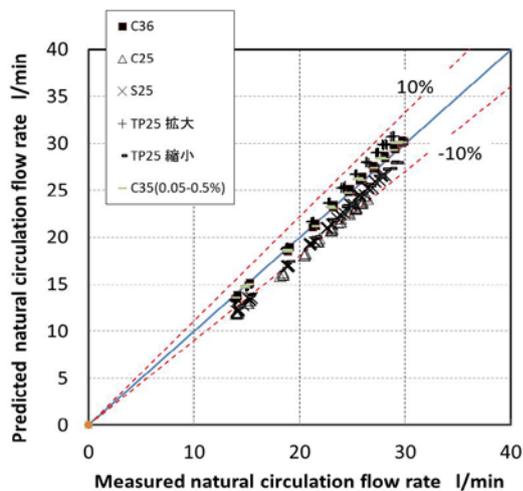


Fig.9 Comparison with predicted natural circulation flow rate

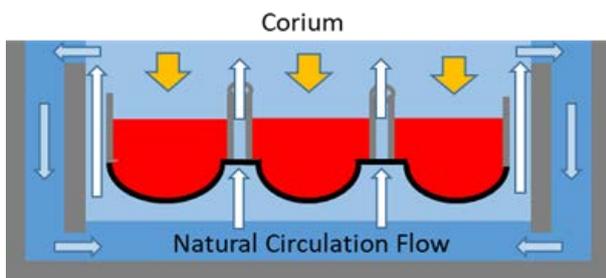


Fig.10 Schematic views of the molten core cooling system at severe accident [1]

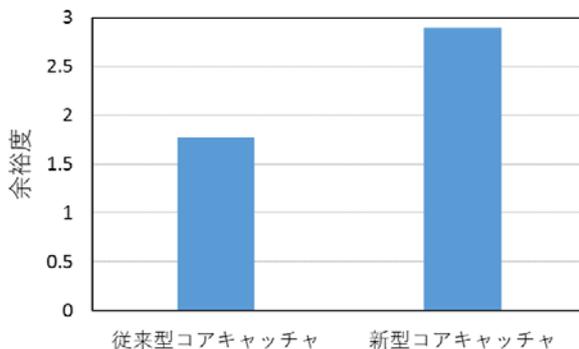


Fig.11 comparison of cooling performance between the current system and the developed system

多相流体を用いた自然循環時の限界熱流束試験が必要である。

参考文献

- (1) 亀井, 師岡, 原子力学会 春の大会、B14(2012).
- (2) 齋藤, 師岡, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 12, No. 1 (2013), pp. 43-49
- (3) 金川, 師岡, 日本混相流学会 混相流 Vol. 28 No. 2 (2014), pp. 203-211.
- (4) H. Blasius, Forsh. Geb. Ing. Wes., 131(1913).
- (5) Nikuradse, J., Forsh. Geb. Ing. Wes., 356(1932), pp. 32
- (6) Chisholm, D., J. Mechanical Engineering Science, Vol. 9, (1961) pp. 72-78.
- (7) Ishii, M., ANL-77-47 (1977)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) 山口拓真, 師岡 慎一, 様々な流路形状を用いた場合の自然循環流量に関する研究、混相流、査読有、DOI:10.3811/jjmf.2018.004 [学会発表] (計 5 件)

- (1) 臼井拓己, 師岡 慎一, ナノ流体と空気を混合した多相流体の自然循環流量性能に関する実験的研究, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017(電気通信大学、2017/08/19)P054.

- (2) 臼井拓己, 師岡 慎一, TiO₂ ナノ粒子を用いた多相流体における自然循環特性及び予測に関する研究, 日本原子力学会 関東・甲越支部 学生研究発表会(芝浦工業大学、2017/03/10)B4.

- (3) T. Yamaguchi, K. Fujioka, S. Morooka, Development of Prediction Method for the Natural Circulation Flow Rate at Various Shaped Channel, 10th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS10) (Kyoto, 2016/11/27-11/30). N10P1062.

- (4) Kasumi Fujioka, Takuma Yamaguchi, Takumi Usui and Shinnichi Morooka, Research on characteristics of a Multiphase natural circulation with TiO₂, 日本原子力学会関東・甲越支部 第15回若手研究者発表討論会(東工大、2016/11/02), A-03.

- (5) 山口拓真, 師岡 慎一, ナノ流体を熔融炉心冷却に用いるための除熱現象解明に関する実験的研究(水-空気二相流の自然循環試験)、日本原子力学会 関東・甲越支部 学生研究発表会(東海大学、v2016/03/11), A19.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

師岡 慎一 (MOROOKA, Shinichi)

早稲田大学・理工学術院・特任教授

研究者番号: 10528946