論文

内管加熱二重管における海水の非沸騰熱伝達への影響

上澤 伸一郎^{1,2,*}, 劉 維^{1,2}, 焦 利芳^{1,2}, 永武 拓^{1,2},
高瀬 和之^{1,2}, 柴田 光彦^{1,2}, 吉田 啓之^{1,2}

Effect of Seawater on Heat Transfer without Boiling in Internally Heated Annulus

Shinichiro UESAWA^{1,2,*}, Wei LIU^{1,2}, Lifang JIAO^{1,2}, Taku NAGATAKE^{1,2},
Kazuyuki TAKASE^{1,2}, Mitsuhiko SHIBATA^{1,2} and Hiroyuki YOSHIDA^{1,2}

¹Nuclear Science and Engineering Center, 2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

²International Research Institute for Nuclear Decommissioning, 2-23-1 Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0003, Japan

(Received November 27, 2015; accepted in revised form May 17, 2016; published online September 13, 2016)

Seawater was injected into the reactors during the accident at TEPCO's Fukushima Daiichi NPS. However, the effects of the seawater on the cooling performance of the fuel rods and fuel debris are not clear. As possible effects, the change in the physical properties of the coolant and the sea salt deposition on a heat transfer surface and in the coolant are considered. We conducted thermal-hydraulic experiments using an internally heated annulus to determine the effects of seawater under conditions without boiling. The same experiments for water and sodium chloride (NaCl) solution were also conducted for the purpose of comparison with the artificial seawater. In these experiments, considering the physical properties of the artificial seawater, the thermal-hydraulic behaviors of the artificial seawater under forced convection ($Re > 2300$ [–]) was estimated from the Dittus-Boelter correlation although sea salt was deposited in the fluid. According to the results of particle image velocimetry (PIV), the velocity distribution in the artificial seawater was NOT different from that in the water and the NaCl solution. For a mixed convection regime, the Nusselt number of the artificial seawater was obtained from the correlation of the Grashof number, Reynolds number and Prandtl number, as well as those for the water and the NaCl solution. Therefore, considering the physical properties of the artificial seawater, the thermal-hydraulic behavior of the seawater in single-phase flow can be estimated from the conventional thermal-hydraulic correlations for a single-phase flow.

KEYWORDS: *experiment, measurement, thermal hydraulics, heat transfer, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, heat transfer, seawater, NaCl, PIV, internally heated annulus*

I. 緒 言

東京電力福島第一原子力発電所事故において、1号機から4号機では電源ならびに除熱機能を失ったため、ポンプ車等による海水の注水が試みられた。しかし、これまで炉内や使用済み燃料貯蔵プールへの海水注入は行われたことはなく、燃料集合体が海水に晒される事象は世界的に経験がない。特に海水は、純水とは異なり様々なイオンを含むため、材料工学や化学工学的観点から、燃料集合体の劣化や燃料デブリの形成への影響について検証が求められている¹⁾。また、熱水力学的問題としても、シビアアクシデ

ント解析コードで用いられている伝熱流動相関式は、海水注入による従来の冷却材である純水の物性値の変化や、事故時に冷却材として用いられた海水の蒸発濃縮による濃縮海水の物性値の影響、海水の加熱ならびに蒸発によって生成される析出物の影響は想定しておらず、海水が伝熱流動に与える影響についての評価が必要と考えられる。

既存の海水の熱水力学的研究として、海水淡水化装置に関する研究が代表として挙げられる。宮武らは海水淡水化技術の主要な技術の1つであるフラッシュ蒸発現象の機構と促進に関する基礎実験を行い、蒸発現象に関する実験式を複数提案した^{2,3)}。また、Yusufovaらは電流で加熱したステンレス管内の鉛直流動に対して実験を行い、無次元数による評価は行っていないものの、塩分濃度が熱伝達率に与える影響について議論した⁴⁾。さらに、海水淡水化装

¹ (国研)日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

² 国際廃炉研究開発機構

* Corresponding author, E-mail: uesawa.shinichiro@jaea.go.jp

置以外にも、海洋温度差発電に関する研究として、中岡らは、上原らの研究結果に基づいて、プレート蒸発器における温海水側のヌセルト数の計算に、レイノルズ数とプラントル数の相関式を用いて、その熱伝達率を評価した^{5,6)}。東京電力福島第一原子力発電所事故後の研究としては、Lee らが再冠水過程における海水の熱伝達への影響を把握するためにクエンチ実験を行った⁷⁾。その結果、純水と比べて海水では蒸気の凝縮が促進され、冷却性能が向上することを示した。しかし、海水の場合、その温度の上昇によって海水塩析出物の溶解度が低下するため、単相流においても海水塩が液中や伝熱面上に析出する可能性があるが、これらの研究では、海水塩析出を考慮した上での既存の単相流伝熱流動相関式の適用可能性について検証されていない。

本研究では、海水による冷却材の物性値の変化ならびに海水塩析出物が伝熱流動に与える影響を把握し、既存の単相流伝熱流動相関式の適用可能性について実験的に検証した。実験は、燃料棒の直径と同スケールの加熱ロッドを有する二重管試験体を用い、作動流体に人工海水、塩化ナトリウム (NaCl) 溶液、純水を使用することで、作動流体中に含まれる塩化ナトリウムならびに人工海水が含む塩化ナ

トリウム以外の塩類が及ぼす影響に対する、既存の単相流伝熱流動評価式の適用可能性について議論した。

II. 人工海水と NaCl 溶液の物性値

海水注入による冷却材の物性値の変化が炉心の冷却性へ及ぼす影響を把握するためには、海水の物性値についての理解が必要不可欠である。本研究では複数の既存研究をもとに、海水と NaCl 溶液の濃度と温度に対する物性値の変化について **Figs. 1, 2** のようにまとめた^{8~12)}。なお、本実験の条件に基づき、海水に含まれる塩化ナトリウムや、硫酸塩、炭酸塩などの全塩類の濃度については 3.5 wt%, 7.0 wt%, NaCl 溶液の濃度は 3.5 wt%, 7.0 wt%, 15.0 wt%, 20.0 wt% の範囲でまとめた。また、本研究では大気圧下、非沸騰条件で実験を実施することから、温度範囲については、各流体の飽和温度以下とした。

Figure 1 は、海水と NaCl 溶液の各濃度のデータにおける質量密度と粘度を、温度に対してプロットしたものである。海水、NaCl 溶液ともに、濃度の上昇に従い質量密度は大きくなり、温度の上昇に対しては、質量密度は低下する。3.5 wt% と 7.0 wt% の海水と同濃度の NaCl 溶液を比較すると、質量密度の差は小さかった。粘度についても

Fig. 1 Hydrodynamic properties of seawater and NaCl solution

Fig. 2 Thermodynamic properties of seawater and NaCl solution

質量密度と同様に、海水や NaCl 溶液の濃度の上昇に対して上昇し、温度上昇とともに低下する。また、濃度が同じであれば、海水と NaCl 溶液には明確な違いがないことがわかる。

Figure 2 は、海水と NaCl 溶液の各濃度のデータにおける熱伝導率および比熱を、温度に対してプロットしたものである。熱伝導率は、質量密度や動粘度とは逆に、濃度の上昇とともに小さく、温度の上昇とともに大きくなる。20℃ から 100℃ までの温度に対する変化量に比べると、濃度に対する変化量は小さく、特に 3.5 wt% と 7.0 wt% の違いはみられない。海水の比熱は NaCl 溶液と比較すると、20℃ から 50℃ にかけて差異がみられるものの、その差は小さく、また、どちらも 100℃ までの温度に対してほぼ一定であること、濃度が高いほど比熱は小さくなることがわかる。

このように濃度や温度に対して、大きく変化する物性値と、ほとんど変化しない物性値があることが確認された。ここで注目すべき点としては、海水と NaCl 溶液はほぼ同一の物性値であり、海水と NaCl 溶液の物性値の違いは、温度や濃度の変化に比べて小さい。本実験においては、この章で示した海水や NaCl 溶液の物性値を用いて、人工海水と NaCl 溶液の伝熱流動特性の評価を行った。

III. 実験装置と実験条件

1. 実験装置

Figure 3(a) に試験ループを示す。ループはタンク、ポンプ、予熱器、濃度計、マスフローメーター、テスト部、気水分離器で構成される。Fig. 3(b) にテスト部の写真を示す。テスト部は直径 24 mm のガラスパイプに直径 12 mm の金属ロッドが挿入された二重管構造である。写真のように可視化部には屈折の影響を低減するために、加熱部より 80 mm 上流の入口温度 T_{in} と同じ温度の流体を流すことができるウォータージャケットが設けられている。Fig. 3(c) はテスト部である二重管全体の側面模式図である。助走区間(非加熱部) 730 mm、加熱部が 1,000 mm である。温度計測点は加熱部下流から 10 mm の位置である。Fig. 3(d) はその熱電対がある場所の断面の模式図である。ロッドは中心部より二重螺旋状のヒーター、絶縁体、ヒーターシース、ロッド表面で構成されており、ヒーターシースならびにロッド表面はインコネル 600 で製作されている。温度計測には K 型熱電対 (Class 1, シース径 0.5 mm) を使用し、ロッド内部 (T'_w) とロッド-ガラスパイプ間 (T_b) の 2 点で計測した。ロッド内の熱電対はヒーターシースに溝を掘り、その溝に挿入してある。その外側からインコネル 600 で包むことで、腐食の要因となる人

Fig. 3 Experimental apparatus

工海水や NaCl 溶液に熱電対が直接接触しない構造になっている。この熱電対より得られた温度 T'_w とインコネル 600 の熱伝導率 λ_w を用いることで、ロッド表面の温度 T_w を以下の式より求めた。

$$T_w = T'_w - \frac{q}{\lambda_w} r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (1)$$

以後、壁面温度として上式より求められた温度を用いる。また、流路側面より挿入した、流路上にある熱電対より得られた温度をバルク温度 T_b として伝熱特性を評価する。

温度計測に加えて、二重管内の流体挙動を把握するために、粒子画像流速測定法(PIV)を実施した。計測装置模式図を Fig. 4 に示す。トレーサー粒子を照射するレーザーとして波長 532 nm, 出力 5 W の連続光の SHG-YAG レーザー (DPGL-8W, 日本レーザー)を用いた。レーザーは 1 mm 厚のシート状に照射した。トレーサー粒子の撮影には、ハイスピードビデオカメラ (FASTCAM SA-X, Photron)を用いた。撮影速度は 1,000 fps, 露光時間は 1/4,000 s とした。空間分解能は 0.02 mm/pixel である。トレーサー粒子には、励起波長 580 nm, 粒径 15 μm , 質量密度 1.1 g/cm の蛍光粒子 (FLUOSTAR, イービーエム)を用いた。ハイスピードビデオカメラレンズに、波長 550 nm 以下の光をカットするフィルタをつけることで、画像処理の障害となるガラス壁面やロッド表面からの散乱光を除去し、粒子からの励起光のみを計測した。観察領域は Fig. 4 のようにレーザーを照射できる領域から 20.5 mm $\times$ 7.7 mm となっている。画像処理における検査領域は 23 pixel $\times$ 23 pixel, 探索領域は 15 pixel $\times$ 15 pixel とした。また、流路壁面における屈折の影響を抑えるため、可視化部にウォータージャケットを設けた。スネルの法則と計測部の実寸法、石英ガラスと水の屈折率を用いることで、計測画像に屈折による歪みの影響を評価し、流路断面の流速計測位置に対して、その歪みが流路壁面近傍で 0.18 mm 以下であることを確認した。

Fig. 4 PIV system

2. 実験条件

実験は主に、作動流体、入口レイノルズ数、入口温度、ヒーターの出力もしくは熱流束の4つのパラメータによって制御される。Table 1 に本研究の実験条件を示す。使用した作動流体は人工海水、NaCl 溶液、純水である。本研究で使用する人工海水の比較対象として、NaCl 溶液や純水でも同様の実験を行った。NaCl 溶液を用いた狙いは、本研究で使用する人工海水中に含まれる NaCl 以外の各種イオンの影響を把握するためである。使用した純水は、工業用水を 25 μm メッシュの糸巻きフィルタ、3 μm メッシュの糸巻きフィルタ、1 μm メッシュの糸巻きフィルタに通したのち、イオン交換樹脂と活性炭フィルタに通したものである。導電率はおよそ 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。NaCl 溶液は、条件である質量濃度になるように、純水に塩化ナトリウムを溶解させた流体である。人工海水も同様に、純水に粉末状の人工海水塩(ネオマリン、マーフィード)を添加した流体である。Table 2 は人工海水と天然海水に含まれるイオンを比較した表である。Table 2 の人工海水の各イオン濃度は使用したネオマリンの取扱説明書を参照した。天然海水の各イオン濃度は理科年表を参照した¹³⁾。表のように、本研究で使用する人工海水は、天然海水に含まれるイオン(SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Br^+ , Sr^{2+} , B^{3+} , F^-)を模擬した流体であり、炭酸カルシウムや硫酸カルシウム、硫酸マグネシウム等の海水析出物の成分を含有している。濃度については、炉内での海水の濃縮を

Table 1 Experimental condition

Working fluid	Artificial seawater	NaCl solution	Pure water
Concentration, w [wt%]	3.5, 7	3.5, 7, 15, 20	0
Inlet Reynolds number Re_{in} [-]	100-9,400	100-9,400	100-9,400
Inlet temperature, T_{in} [$^{\circ}\text{C}$]	35	35	35
Heat flux, q [kW/m^2]	0-132	0-132	0-132

Table 2 Ionic compositions of artificial seawater and real seawater

Ionic composition	Artificial seawater [mg/L]	Real seawater [mg/L]
Cl^-	1.93×10^4	1.94×10^4
SO_4^{2-}	2.71×10^3	2.69×10^3
Na^+	1.08×10^4	1.08×10^4
Mg^{2+}	1.3×10^3	1.3×10^3
Ca^{2+}	4.1×10^2	4.1×10^2
K^+	4.0×10^2	3.9×10^2
Br^+	6.7×10	6.7×10
Sr^{2+}	7.6	7.8
B^{3+}	4.5	4.5
F^-	1.3	1.3

想定して、人工海水については 3.5 wt% と 7.0 wt%, NaCl 溶液は 3.5 wt%, 7 wt%, 15 wt%, 20 wt% で実験を行った。人工海水の質量濃度と NaCl 溶液の質量濃度を合わせることは、人工海水と NaCl 溶液それぞれに含まれる全塩類の濃度を合わせていることを意味しており、海水塩の主成分である NaCl 以外の影響を把握するためである。入口レイノルズ数は層流から乱流域までを把握するため、 $Re_{in} = 100[-] - 9,400[-]$ の範囲で実験を実施した。入口温度は 35℃ で一定とした。加熱部の熱流束はヒーターの出力を調節することで、非加熱ならびに 8–132 kW/m² とした。この熱流束は、福島第一原子力発電所のスクラム 1 時間後の崩壊熱から通常運転時の 1/4 程度に当たる。また、これらの実験条件の範囲内においては、伝熱面上での海水塩の析出は確認されなかったものの、人工海水のみにおいて、光が透過する程度に流体自体が薄く白濁した。これは海水塩が析出したためであり、X 線回折による成分分析をしたところ、析出物は炭酸カルシウムであった。

IV. 実験結果と考察

1. 二重管内の伝熱流動特性

Figure 5 に、ロッド表面温度 T_w とバルク温度 T_b の計測結果を示す。左より熱流束が 13 kW/m², 26 kW/m², 52 kW/m² の結果である。中塗りのプロットが壁面温度、白抜きのプロットがバルク温度である。ここで横軸のレイノ

ルズ数は、

$$Re_b = \frac{\rho_{in} j_{in} D}{\mu_b} \quad (2)$$

で定義される。 ρ_{in} は入口温度での質量密度、 j_{in} は入口見掛け速度、 D は水力等価直径、 μ_b はバルク温度での粘度である。ここで、計測されたバルク温度 T_b のうち 87% の計測結果は、流量と加熱量から見積もったバルク温度と $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で一致していた。図より、レイノルズ数が増加するにつれ壁面温度とバルク温度ともに減少していることがわかる。また、このレイノルズ数と温度の相関関係は、純水、人工海水、NaCl 溶液によらず同様であった。

Figure 6 は、Fig. 5 の温度計測結果を用いて得られた、熱伝達率とレイノルズ数の相関である。ここで熱伝達率は以下で定義される。

$$h = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (3)$$

q は熱流束であり、 T_w は計測された壁面温度、 T_b は計測されたバルク温度である。

$Re_b < 2000[-]$ では、熱伝達率がわずかながら減少傾向にあるが、 $Re_b > 2300[-]$ では、熱伝達率が大きく上昇することがわかる。Fig. 5 の温度計測結果と同様に、この熱伝達率の特性は人工海水や NaCl 溶液でも純水と同様であった。

Figure 7 は、Fig. 6 の熱伝達率の結果を用いて得られ

Fig. 5 Wall temperature and bulk temperature for pure water, NaCl solution and artificial seawater

Fig. 6 Heat transfer coefficient for pure water, NaCl solution and artificial seawater

Fig. 7 Correlation of $Nu_b/Pr_b^{0.4}$ and Reynolds number for pure water, NaCl solution and artificial seawater

た、ヌッセルト数の評価結果である。ここでヌッセルト数とプラントル数は以下で定義される。

$$Nu_b = \frac{hD}{\lambda_b} \quad (4)$$

$$Pr_b = \frac{c_b \cdot \mu_b}{\lambda_b} \quad (5)$$

h は熱伝達率, D は水力等価直径, λ_b はそのバルク温度での熱伝導率を示す。プラントル数に含まれる c_b はバルク温度での比熱, μ_b はバルク温度での粘度である。図中の実線は, MAAP や SAMPSON に代表されるシビアクシデントコードで水に対する伝熱流動評価式として一般的に用いられる, Dittus-Boelter の式である¹⁴⁾。破線は, Dittus-Boelter の式で示した値の+10%および-10%を示す。Fig. 7(a)のように Dittus-Boelter の式と計測結果の誤差は $\pm 10\%$ の範囲であり, 水と同様に人工海水や NaCl 溶液でも $Re_b > 2,300[-]$ では, Dittus-Boelter の式で評価できる。

一方, $Re_b < 2,300[-]$ においては, Dittus-Boelter の式から外れた。その実験結果は $Nu_b/Pr_b^{0.4}$ が 6-18 $[-]$ の範囲で分布しているものの, 互いにレイノルズ数が近いプロットは Dittus-Boelter の式とは異なる傾きで冪乗に比例した。この原因の1つとして, 低レイノルズ数であるため, 流体の慣性力に対して浮力の影響が大きくなったことが考えられる。そこで, Fig. 8のように, Metais and Eckert の流動様式図¹⁵⁾にならい, レイノルズ数とグラスホフ数で整理した¹⁵⁾。グラスホフ数は以下のように定義される。

$$Gr_b = \frac{g \rho_b^2 \beta_b (T_w - T_b) D^3}{\mu_b^2} \quad (6)$$

ここで, g は重力加速度, ρ_b はバルク温度での質量密度, T_w は計測された壁面温度, T_b は計測されたバルク温度, λ_b はバルク温度での熱伝導率である。 β_b はバルク温度での膨張率であり, 以下の式を用いて, 各作動流体に対する質量密度と温度の関係から膨張率を求めた。

Fig. 8 Regimes of free, forced and mixed convections for pure water, NaCl solution and artificial seawater in the present study

$$\beta_b = \rho_b \frac{d(1/\rho_b)}{dT_b} \quad (7)$$

Metais and Eckert が示した流動様式図¹⁵⁾に当てはめると, Dittus-Boelter の式で表すことのできる $Re_b > 2,300[-]$ では, 一部共存対流の領域にあるものの, ほぼ強制対流の領域であった。対して, $Re_b < 2,300[-]$ では, すべて共存対流であった。また, その共存対流は一部層流であるものの, ほとんどが遷移領域から乱流領域であった。

そこで, 共存対流の乱流領域を考慮した各流体の伝熱特性について, Fig. 9のように整理した。縦軸は計測した温度から求めたヌッセルト数を Dittus-Boelter の式で得られたヌッセルト数で規格化した値である。横軸は修正グラスホフ数, レイノルズ数, プラントル数の関数であり, 指数は Jackson らの研究結果を参考にした¹⁶⁾。ここで修正グラスホフ数は以下のように定義する。

$$Gr_b^* = \frac{g \rho_b^2 \beta_b q D^4}{\mu_b^2 \lambda_b} \quad (8)$$

ここで, g は重力加速度, ρ_b はバルク温度での質量密度, β_b はバルク温度での膨張率, q は熱流束, D は水力等

価直径, μ_b はバルク温度での粘度, λ_b はバルク温度での熱伝導率である。Fig. 9 より, $Gr_b^*/(Re_b^{3.425}Pr_b^{0.8}) < 5 \times 10^{-6} [-]$ では, 縦軸の Nu_b/Nu_{D-B} はおおむね 1 であった。これはつまり Dittus-Boelter の式より見積もられたヌッセルト数と温度計測より得られたヌッセルト数が一致しており, Fig. 7 での結果と矛盾しない。一方, $Gr_b^*/(Re_b^{3.425}Pr_b^{0.8}) > 5 \times 10^{-6} [-]$ では, 縦軸の Nu_b/Nu_{D-B} は $(Gr_b^*/(Re_b^{3.425}Pr_b^{0.8}))^{0.265}$ に比例して増大した。注目すべきは, 指数関数的な増大傾向が純水のみならず, 人工海水や NaCl 溶液でも得られた点である。図中の直線は, $Gr_b^*/(Re_b^{3.425}Pr_b^{0.8}) > 5 \times 10^{-6} [-]$ のプロットの近似曲線であり, ほぼすべての実験結果がこの直線上にあることがわかる。このように, 共存対流の乱流領域では, ヌッセルト数を修正グラスホフ数, レイノルズ数, プラントル数の関数で示すことができる。そして, その関係は純水のみならず, 人工海水や NaCl 溶液においても同様であることが示された。

Fig. 9 Correlation of mixed convection for pure water, NaCl solution and artificial seawater

2. 二重管内の流速分布

次に PIV で得られた流路断面方向の流動分布について検討した。Fig. 10 は純水における各熱流束の流速分布である。Fig. 10(a) はテスト部入口でのレイノルズ数 $Re_{in} = 2,000 [-]$ であり, Fig. 10(b) は $Re_{in} = 7,000 [-]$ である。横軸はガラスパイプの中心軸を 0 mm としたときの中心からの距離を表す。図中 $r = 6$ mm がロッド壁面, $r = 12$ mm がガラスパイプ内壁面の位置を示す。縦軸は各位置の流速をその分布の最大流速で規格化した値である。中塗りのプロットは 5 秒間の時間平均値, 白抜きのプロットはその時間平均値の二乗平均平方根(RMS)である。Fig. 10(a) のテスト部入口でのレイノルズ数 $Re_{in} = 2,000 [-]$ の熱流束 0 kW/m^2 の条件では, 流速分布はおおむね左右対称であるが, 熱流束の増加とともに最大速度である速度分布の頂点が加熱面側に近づく。これは, 先の節で示したように, 熱流束の増加とともにグラスホフ数が増大, つまり浮力が増大したことで, 加熱面近傍の流速が増加したためと考えられる。熱流束 79 kW/m^2 においては加熱面から 8 mm 以上離れた位置においても流速が増加した。これは流体温度の上昇によって, 流速分布計測位置におけるレイノルズ数が上昇し, 乱流における流速分布に近づいたためと考えられる。一方, Fig. 10(b) の $Re_{in} = 7,000 [-]$ では, $Re_{in} = 2,000 [-]$ の流速分布に比べて均一であり, 熱流束が $0 \sim 79 \text{ kW/m}^2$ の範囲では, 流速分布に違いはみられなかった。これは Fig. 8 で示した強制対流領域での流速分布であるため, 浮力に比べて慣性力が大きく, 流速分布に対する浮力の影響は小さいためと考えられる。

Figure 11 は入口レイノルズ数と熱流束に対する, 各作動流体の流路断面方向の流速分布である。中塗りのプロットは 5 秒間の時間平均値, 白抜きのプロットはその時間平均値の二乗平均平方根(RMS)である。まず Fig. 11(a) と (c) の非加熱時の $Re_{in} = 800 [-]$ と $2,000 [-]$ の層流の条件では, その流速分布は凸形状であった。一方, Fig. 11(f) の非加熱時の $Re_{in} = 7,000 [-]$ の乱流の条件では, 凸形状が緩やかになった。これらの流速分布を各作動流体に対して比較すると, 層流域や乱流域に関わらず, 純

Fig. 10 Velocity distributions of pure water for heat flux

Fig. 11 Velocity distributions of pure water, NaCl solution and artificial seawater for heat flux

水、人工海水、NaCl 溶液の流速分布に違いは確認されなかった。また、時間平均値と同様に RMS にも違いは確認されなかった。Fig. 11(b) の $Re_{in} = 800[-]$ かつ熱流束 26 kW/m^2 、Fig. 11(d) の $Re_{in} = 2,000[-]$ かつ熱流束 26 kW/m^2 、Fig. 11(e) の $Re_{in} = 2,000[-]$ かつ熱流束 52 kW/m^2 の低レイノルズ数かつ加熱された条件では、人工海水や NaCl 溶液の流速分布は、Fig. 10(a) で示した純水の流速分布と同様に最大流速が左側の加熱面に近づいた。先の節で示したように、純水のみならず、人工海水や NaCl 溶液においてもグラスホフ数で整理できることから、浮力の影響によって加熱面側の流速が増大したためと考えられる。Fig. 11(f, g, h) の $Re_{in} = 7,000[-]$ かつ非加熱から熱流束 26 kW/m^2 、 52 kW/m^2 の条件では、すべての流体において同様な流速分布であった。これは、Fig. 10(b) と同様に、人工海水や NaCl 溶液においても、Fig. 8 で示した強制対流領域での流速分布であるため、浮力に比べて慣性力が大きく、流速分布への浮力の影響が小さかったためと考えられる。

V. 結 言

本研究では、冷却材の物性値の変化ならびに海水塩析出物が炉心の冷却能力へ与える影響を明らかにするために、非沸騰条件における人工海水の伝熱流動特性について検証を行った。その結果、本実験においては、レイノルズ数 $2,300[-]$ 以上の強制対流領域では、純水のみならず、人工海水や NaCl 溶液においてもその伝熱流動特性は Dittus-Boelter の式で示せることが確認された。また、加熱二重管内の流速分布においても作動流体に対する違いはみられなかった。これは海水が混入し、仮に冷却材の物性値が変化しても、その物性値を把握しておけば、シビアアクシデント解析コードで使用される Dittus-Boelter の式を変更する必要がないことを意味する。自然対流が混じる共存対流の乱流領域においても、人工海水や NaCl 溶液のヌセルト数は、純水と同様にグラスホフ数やプラントル数、レイノルズ数の無次元数で整理できた。このように、海水混入による冷却材の物性値変化の観点においては、その物性値を把握しておけば、水と同様に伝熱流動特性を評価でき

る。しかしながら、これは逆にいえば、海水による物性値の変化を評価しなければ、その冷却材の伝熱流動特性を評価できないことを意味しており、炉内の現象をより正確に予測するためには海水によって変化したであろう冷却材の物性値を把握しなければならない。また、本実験条件においては、代表的な海水塩である炭酸カルシウムや硫酸カルシウム、硫酸マグネシウム等の伝熱面上での析出は確認されなかったが、今後はより濃縮された海水に対して、伝熱面上での海水塩析出の有無ならびにその析出物が伝熱流動特性に与える影響についての評価が必要と考えられる。

〔記号〕

c_b : バルク温度での比熱 [J/(kg°C)]
 D : 水力等価直径 [m]
 g : 重力加速度 [m/s²]
 Gr_b : バルク温度でのグラスホフ数 [–]
 Gr_b^* : バルク温度での修正グラスホフ数 [–]
 h : 熱伝達率 [W/(m²°C)]
 j_{in} : 入口見掛け流速 [m/s]
 L : 加熱部入口から温度計測点までの高さ [m]
 Nu_b : バルク温度でのヌッセルト数 [–]
 Pr_b : バルク温度でのプラントル数 [–]
 q : 熱流束 [W/m²]
 r : 流路中心軸からの断面方向距離 [m]
 r_1 : 流路中心軸から壁面内温度計測点までの断面方向距離 [m]
 r_2 : 流路中心軸からロッド壁面までの断面方向距離 [m]
 R : 流路中心軸からのガラス管壁面までの距離 [m]
 Re_b : バルク温度でのレイノルズ数 [–]
 Re_{in} : 入口温度でのレイノルズ数 [–]
 T_b : バルク温度 [°C]
 T_{in} : 入口温度 [°C]
 T_{out} : 出口温度 [°C]
 T_w : ロッド壁面温度 [°C]
 T'_w : 壁面内計測温度 [°C]
 V_{ave} : 時間平均した断面方向流速 [m/s]
 v_{max} : 時間平均した断面方向最大流速 [m/s]
 β_b : バルク温度での膨張率 [°C⁻¹]
 λ_w : インコネル 600 の熱伝導率 [W/(m°C)]
 μ_b : バルク温度での粘度 [Pa s]
 ν : 動粘度 [m²/s]
 ρ_{in} : 入口温度での質量密度 [kg/m³]
 ρ_b : バルク温度での質量密度 [kg/m³]

本研究は経済産業省委託事業「平成 25 年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業」および平成 25 年度補正予算「廃炉・汚染水等対策事業費補助金」補助事業の成果の一部である。

— 参考文献 —

- 1) N. Sakai, H. Horie, H. Yanagisawa, T. Fujii, S. Mizokami, K. Okamoto, "Validation of MAAP model enhancement for Fukushima Dai-ichi accident analysis with Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT)," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 951-963 (2014).
- 2) O. Miyatake, K. Murakami, Y. Kawata, T. Fujii, "Fundamental experiments of flash evaporation," *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, **26**[4], 189-190 (1972), [in Japanese].
- 3) O. Miyatake, "Mechanism and enhancement of flash evaporation," *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, **35**[5], 255-265 (1982), [in Japanese].
- 4) V. D. Yusufova, G. P. Ugrekeldidze, A. I. Bronshtein, "The rate of heat transfer of seawater and NaCl solutions under conditions of one- and two-phase flow in tubes," *Desalination*, **26**, 175-180 (1978).
- 5) T. Nakaoka, T. Nishida, J. Ohara, M. Horita, H. Yoshimura, H. Iwasa, "Design and overall heat transfer coefficient of plate-type evaporator," *OTEC*, **16**, 7-13 (2011), [in Japanese].
- 6) H. Uehara, T. Nakaoka, T. Ito, "Dynamic characteristic and identification of a shell and plater type evaporator," *OTEC*, **1**, 79-86 (1986), [in Japanese].
- 7) S. W. Lee, S. M. Kim, S. D. Park, I. C. Bang, "Study on the cooling performance of sea salt solution during reflood heat transfer in a long vertical tube," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **60**, 105-113 (2013).
- 8) M. H. Sharqawy, J. H. Lienhard V, S. M. Zubair, "Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data," *Desalination Water Treat.*, **16**, 354-380 (2010).
- 9) A. M. Rowe Jr., J. C. S. Chou, "Pressure-volume-temperature-concentration relation of aqueous NaCl solutions," *J. Chem. Eng. Data*, **15**, 61-66 (1970).
- 10) J. Kestin, H. E. Khalifa, R. J. Correia, "Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20-150°C and the pressure range 0.1-35 Mpa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **10**, 57-70 (1981).
- 11) H. Ozbek, S. L. Phillips, "Thermal conductivity of aqueous sodium chloride solutions from 20°C to 330°C," *J. Chem. Eng. Data*, **25**, 263-267 (1980).
- 12) J. C. S. Chou, A. M. Rowe, Jr., "Enthalpies of aqueous sodium chloride solutions from 32 to 350°F," *Desalination*, **6**, 105-115 (1969).
- 13) National Astronomical Observatory of Japan, *Chronological Scientific Tables 2014*, Maruzen Publishing Co., Ltd., Tokyo, 976, ISBN 978-4-621-08738-1 (2013), [in Japanese].
- 14) F. W. Dittus, L. M. K. Boelter, "Heat transfer in automobile radiators of the tubular type," *Int. Comm. Heat Mass Transf.*, **12**, 3-22 (1985).
- 15) B. Metais, E. R. G. Eckert, "Forced, mixed, and free convection regimes," *J. Heat Transf.*, **86**, 295-296 (1964).
- 16) J. D. Jackson, M. A. Cotton, B. P. Axcell, "Studies of mixed convection in vertical tubes," *Int. J. Heat Fluid Flow*, **10**, 2-15 (1989).