

# 一体型船用炉の横揺れ自然循環における炉心部熱伝達特性

澤田健一\*、村田裕幸\*、小林道幸\*

## Heat Transfer Characteristics in the Core of an Integrated Type Marine Reactor during Natural Circulation with Rolling Motion

By

Ken-ichi SAWADA, Hiroyuki MURATA and Michiyuki KOBAYASHI

### Abstract

A series of natural circulation experiments, using a physical model of an integrated type marine reactor mounted on a rolling bed, was performed in order to investigate effects of the ship motion on heat transfer characteristics in the core. The experiments were conducted at several different rolling periods, core heater power levels and amplitudes of the rolling motion.

At the beginning, the average Nusselt numbers at upright attitude were compared with other experimental data. The present data agree well with El-Genk's natural convection data within 10 percent. Then, heat transfer rates in slant situation of the core were examined. The average Nusselt numbers at inclined attitudes have not differed any noticeably from those at upright attitude with the angles of inclination  $|\theta| < \pi/8$ . Finally, heat transfer characteristics in the core were investigated for the rolling motion. It has been found that the heat transfer is enhanced by the motion and its change is well correlated with the Richardson number for rolling motion  $Ri_R = Gr^*/Re_R^2$ . The heat transfer during the rolling motion is classified into the following three regimes; (a) in the range of  $0.05 < Ri_R < 0.3$ , the heat transfer is dominated by the inertia force due to the rolling motion, (b)  $0.3 < Ri_R < 2$ , by both of the natural convection and inertia force due to the rolling motion, and (c)  $2 < Ri_R < 11$ , by the natural convection.

---

\* 原子力技術部

原稿受付 平成11年3月9日

審査済 平成11年5月19日

## 目 次

1. まえがき
2. 実験装置と実験条件
  - 2.1 実験装置
  - 2.2 実験条件
3. 実験結果と考察
  - 3.1 正立時
  - 3.2 定傾斜時
  - 3.3 横揺れ時
4. 結論

## 参考文献

## 記 号

- $D$  ; ヒーター直径 [m]  
 $D_e$  ; 等価直径 (4 × 流路断面積 / 発熱部周長) [m]  
 $g$  ; 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]  
 $Gr^*$  ; 修正グラスホフ数,  $D_e^4 g \beta q / \lambda \nu^2$   
 $h_m$  ; 平均熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K],  $q / (T_{w1} - T_b)$   
 $l_{CORE}$  ; ヒーター発熱部長さ [m]  
 $Nu_m$  ; 平均ヌセルト数,  $h_m D_e / \lambda$   
 $P$  ; ピッチ [m]  
 $Pr$  ; プラントル数,  $\nu / k$   
 $q$  ; 熱流束 [W/m<sup>2</sup>]  
 $Q$  ; ヒーター出力 [kW]  
 $r$  ; 動揺中心からの距離 [m]  
 $R$  ; 動揺中心からヒーター発熱部中央までの距離 [m]  
 $Ra^*$  ; 修正レイリー数,  $Gr^* Pr$   
 $Re$  ; レイノルズ数,  $u D_e / \nu$   
 $Re_R$  ; 動揺のレイノルズ数,  $4 \theta R D_e / \nu$   
 $Ri$  ; リチャードソン数,  $Gr^* / Re^2$   
 $Ri_R$  ; 動揺のリチャードソン数,  $Gr^* / Re_R^2$   
 $t$  ; 時間 [sec]  
 $T_b$  ; 一次冷却水炉心発熱部平均バルク温度 [°C],  $(T_{up} + T_{lp}) / 2$   
 $T_{lp}$  ; 一次冷却水下部プレナムバルク温度 [°C]  
 $T_{up}$  ; 一次冷却水上部プレナムバルク温度 [°C]  
 $T_p$  ; 一次冷却水温度 [°C]  
 $T_s$  ; 二次冷却水 SG 入り口温度 [°C]  
 $T_w$  ; ヒーター表面温度 [°C]  
 $T_{w1}$  ; ヒーター表面温度 (熱電対No.1) [°C]  
 $u$  ; 炉心部平均流速 [m/s]  
 $V_{SEC}$  ; 二次冷却水流量 [m<sup>3</sup>/h]  
 $y$  ; 炉心発熱部下端より上方への距離 [m]  
 $\beta$  ; 体積膨張率 [1/K]  
 $\theta$  ; 傾斜・動揺角度 [rad]  
 $\kappa$  ; 温度伝導率 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\lambda$  ; 熱伝導率 [W/mK]  
 $\nu$  ; 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]

$\tau$  ; 動揺周期 [sec]

添え字

0 正立時

## 1. まえがき

受動安全型船用炉を搭載した原子力船が座礁・沈没などの船舶事故や原子炉事故を起こした場合、炉心部を健全に保つために原子炉停止時の崩壊熱を自然循環によって除去することが要求される。しかし船用炉における崩壊熱除去能力は船の姿勢や運動の影響を受けることが考えられる。特に傾斜や横揺れは複数の一次循環系流路における循環流量のアンバランスや脈動を引き起し、その影響は循環流量の多い正常時よりも循環流量が少ない自然循環時の方が顕著であると予想される。このため、船体運動及び船体姿勢が自然循環炉心冷却における炉心流量や熱伝達にどのように影響を及ぼすかを予測・評価することは、船用炉の安全性を評価する上で重要である。

しかしながら、自然循環に及ぼす傾斜や動揺運動については、わずかに動揺するタンク内の自然対流を二次元的に取り扱った研究<sup>(1)-(3)</sup>が見られる程度であり、これらの単純な系に対する研究結果をそのまま船用炉の自然循環に適用することは出来ない。

そこで著者らは、船用炉の自然循環に及ぼす船体傾斜・横揺れ運動の影響に関して確かな見通しを得るため、船用炉を模擬した実験装置を用いた自然循環実験を行い、船用炉の定傾斜及び横揺れ時自然循環特性を明らかにした<sup>(4)-(11)</sup>。これらの実験で得られたデータは、既存の原子炉熱水解析コードの中で唯一船体運動を取り扱うことが可能な RETRAN-02/GRAV コードの信頼性確認データとして活用されている<sup>(12), (13)</sup>。

以上のように、定傾斜・横揺れ運動が船用炉の自然循環特性に及ぼす影響は明らかにされたが、安全評価上重要である炉心部の熱伝達に及ぼす影響に関しては、これまで十分に検討されないままであった。

原子炉の炉心部における熱伝達に関しては、類似の体系である垂直円柱群に関して幾つか研究<sup>(14)-(17)</sup>が行われているものの、船用炉に固有の定傾斜・横揺れ状態における炉心部熱伝達に関する研究は見あたらない。

本報では、こうした観点から、これまでに実施した船用炉の横揺れ自然循環実験のデータから炉心部の熱伝達を求め、定傾斜時及び横揺れ時の炉心部熱伝達特性を明らかにする。

## 2. 実験装置と実験条件

## 2.1 実験装置

Fig.1に本実験に用いた実験装置の概要を示す。本実験装置は日本造船研究協会で概念設計がなされた一体型船用炉 NSR-7<sup>(18)</sup>を、実機と実験装置との熱出力の比に合わせて縮小したものである。ただし、自然循環実験において最も重要なパラメータであると考えられている

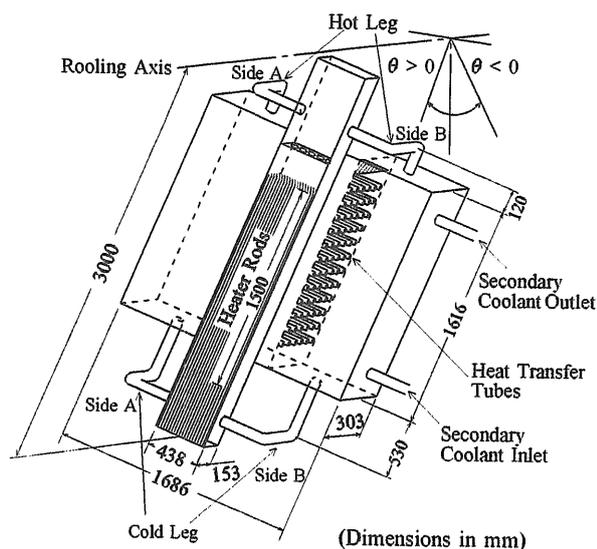


Fig. 1 実験装置概要

高さ方向は実寸法としている。本装置は、炉心部と蒸気発生器を模擬した熱交換器 (SG) から構成されているが、実機である NSR-7 は一体型であるため一次系配管をもたないのに対し、本装置では円筒形の実機炉を平板型の炉心と SG とで模擬しているため、炉心と SG の間にホット・レグ、コールド・レグ配管を配置している。

炉心部の断面図を Fig.2 に示す。炉心部は下部プレナム、炉心発熱部、上部プレナムからなっている。炉心発熱部には直径 10.4mm、発熱長さ 1500mm のシース・ヒーター (熱流束一定) がピッチ 15mm、5本×24本の配列で計 120本並んでいる (ただし 6本は非発熱)。シース・ヒーターの保持のためグリッド・スペーサーが 360mm 間隔で高さ方向に 4段設けられている。これは実機とほぼ同じ寸法である。また、上・下部プレナムには一次冷却水の攪拌を促進する目的でタイ・プレートが設置されている。ホット・レグ、コールド・レグ配管はそれぞれ装置の上下に 2本ずつ設けられ、すべて 2インチ管である。配管の途中には同一口径の電磁流量計が設置されおり、測定精度は  $0.03\text{m}^3/\text{h}$  以下である<sup>(19)</sup>。

SG 部は幅 1686mm、高さ 1616mm、奥行き 303mm のシェル・アンド・チューブ型熱交換器であり、中には外径 1インチの伝熱管が 6列、ピッチ 100mm で 12段入っている。また、上部チャンバーには一次冷却水の分散を促進する多孔板が入っている。SG 部は動揺台に搭載するための寸法的制約から平板型になっているが、先の定傾斜自然循環<sup>(4)-(6)</sup> で用いた円筒型 SG とは高さ方向・横方向の寸法、体積、伝熱面積、炉心部との相対高さなどの熱水力的特徴は同一である。

実験装置を搭載している動揺台は、電気モーターによって駆動される可変偏心クランク方式の動揺装置であり、動揺の中心から下部プレナム下端までの距離は 3000

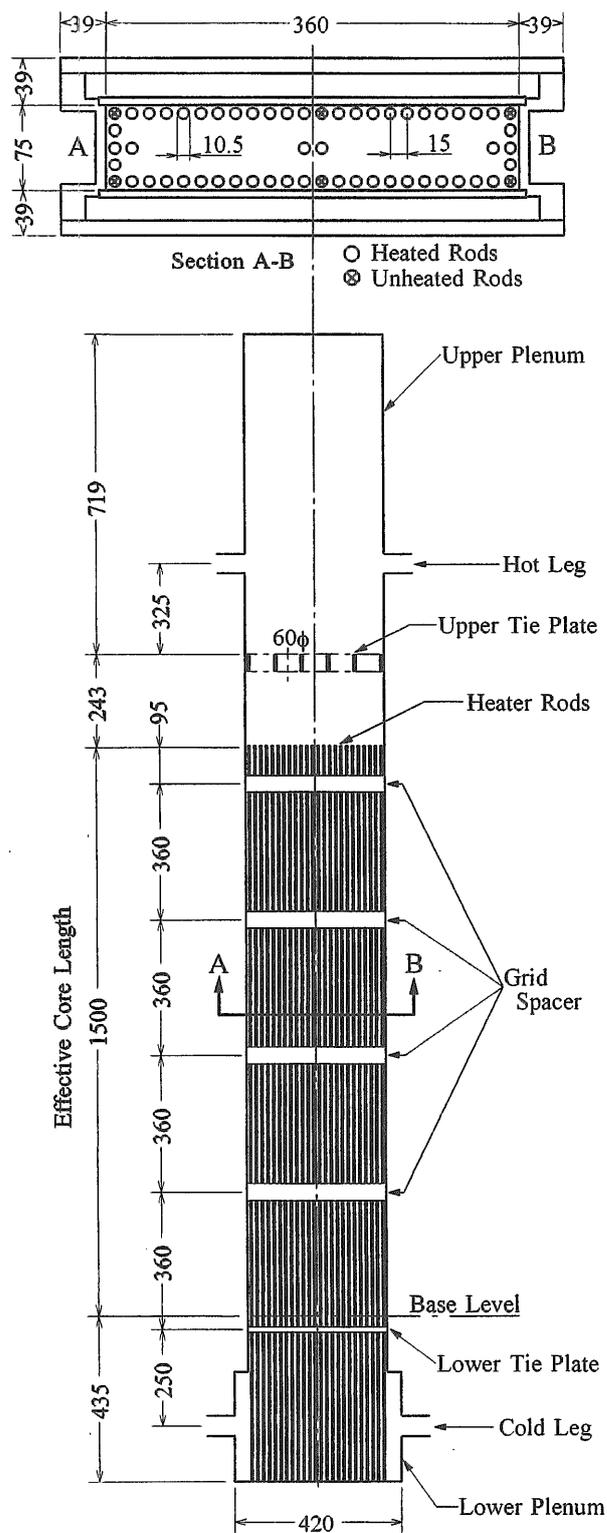


Fig. 2 炉心部概略

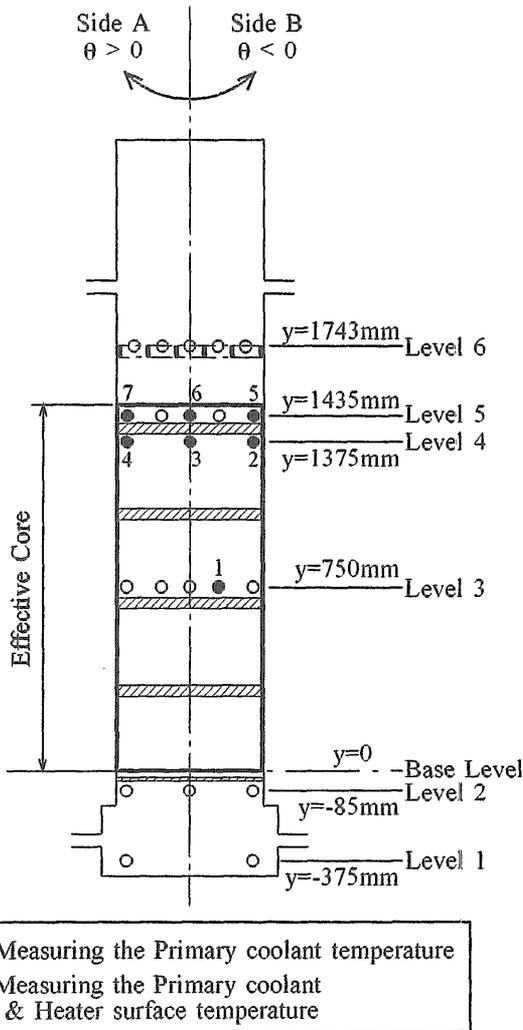


Fig. 3 炉心部の温度測定点

mm である。

本実験において、Fig. 2のように炉心部からSG部をみるような位置で左側をA側、右側をB側とする。また、この位置において鉛直軸から時計方向の角度を正の横揺れ角、反時計方向を負の横揺れ角とする。

Fig. 3に炉心部における熱電対設置位置を示す。測定点は炉心部厚さ方向中心に、高さ方向レベル1～6にわたって計23点設けられ、それぞれに一次冷却水温度測定用として外径1mmのC-C熱電対が取り付けられている。このうち、図中に●で示したレベル3～5にあるNo.1～7の7つの測定点で、ヒーター表面温度測定用のC-A熱電対がヒーター表面に埋め込まれている。ここでレベル1～6はそれぞれ下部プレナム (y=-375mm)、下部タイ・プレート (y=-85mm)、炉心発熱部中央 (y=750mm)、炉心発熱部上端付近 (y=1375mm, 1435mm)、上部タイ・プレート (y=1743mm) に対応している。ただし、yは炉心発熱部下端より上向きに測った距離である。なお熱電対の測定精度は、C-C熱電

対が±0.6℃、C-A熱電対が±0.9℃である。

## 2.2 実験条件

実験は大気圧下で行われた。炉心部の傾斜時および動揺時における熱伝達の変化を調べるために以下の条件で実験を行った。

- (1) 正立時自然循環実験 (3ケース)  
ヒーター出力 Q: 40, 60, 80kW
- (2) 定傾斜自然循環実験 (12ケース)  
ヒーター出力 Q: 40, 60, 80kW  
傾斜角  $\theta$ :  $\pm\pi/8$ ,  $\pm\pi/12$
- (3) 横揺れ時自然循環実験 (35ケース)  
ヒーター出力 Q: 40, 60, 80kW  
横揺れ角度  $\theta$ :  $\pm\pi/8$ ,  $\pm\pi/12$ ,  $\pm\pi/24$   
横揺れ周期  $\tau$ : 5, 7.5, 10, 15, 20sec

ただし、 $\theta = \pm\pi/24$ の時はヒーター出力60kWのみの測定である。ヒーター表面の熱流束は、ヒーター出力40, 60, 80kWにおいてそれぞれ実機の定格値の2, 3, 4%に相当する。また、系内の一次冷却水温度をほぼ同じレベルに保つため、二次冷却水流量はヒーター出力に対応して、Q=40, 60, 80kWのときそれぞれ  $V_{SEC} = 2.0, 3.0, 4.0\text{m}^3/\text{h}$ とした。横揺れ角度は日本海事協会が船用品について定めた基準<sup>(20)</sup>に基づいて決定し、横揺れ周期は動揺台の稼働範囲により決定した。このときの横揺れ条件を、NSR-7炉を搭載するとして計画されたコンテナ船の横揺れ条件と比較する。Table.1に計画されたコンテナ船の主要寸法を示す。実船が存在しないので正確な船体運動のデータは得られないが、船の横揺れの固有周期  $\tau$ [s]は傾斜角が小さい場合、近似的に次式で計算される<sup>21)</sup>。

$$\tau = 2.01k_{xx} / \sqrt{GM} \quad \dots(1)$$

ただし、 $k_{xx}$ : 重心を通る縦軸まわりの見かけの環動半径 [m]、GM: 船体中心面上における重心からのメタセンタ高さ [m]、である。 $k_{xx}$ 、GMについては満載時のコンテナ船一般の特徴として平均的に次の関係が成立する<sup>21), 22)</sup>。

$$GM/B = -2.5 \times 10^{-4} L_{pp} + 0.0821 \quad \dots(2)$$

$$k_{xx}/B = 0.38 \quad \dots(3)$$

以上の式よりコンテナ船の横揺れの固有周期を概算すると、およそ35秒になる。動揺中心から炉心発熱部中央までの距離Rは、本実験の1.815mに対して実炉では船の断面図から約2.2mであると推測される。また炉心の等

Table.1 NSR7を搭載するコンテナ船の主要寸法

全長 (垂線間長) $L_{pp}$	m	268
幅 (垂線幅) B	m	32.2
深さ/満載吃水	m	19.5 / 9.1
満載排水量	ト	42,700

価直径  $D_e$  は、実験では0.0183m、実炉では概算で0.017m程度とほぼ同じ値である。以上のデータを踏まえて、動揺効果を表す無次元数として動揺のレイノルズ数  $Re_R$  を次式で定義し、これによって両者の横揺れ条件の比較を行う。

$$Re_R = 4\theta R D_e / \tau \nu \quad \dots(4)$$

ここで、代表長さは等価直径  $D_e$  [m]、代表速度として炉心発熱部中央での平均周速度  $4\theta R / \tau$  [m/s] を用いた。このとき実験と実船の  $Re_R$  は、実験を行った横揺れ角度の条件で

本実験 :  $Re_R = 2.0 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^4$

実船 :  $Re_R = 4.4 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^4$

となり、本実験は実船とほぼ同程度の横揺れ運動効果が得られることが分かる。

測定には64chの高速A-D変換器を用い、スペクトラム・アナライザで求めた横揺れ周期の1/64のサンプリング間隔で20周期分データを集録した。

熱伝達は炉心発熱部の平均熱伝達率  $h_m$  を用いて評価した。ただし、流体温度は炉心発熱部平均バルク温度  $T_b = (T_{up} + T_{lp}) / 2$ 、ヒーター表面温度はヒーター発熱部中央(熱電対No.1)温度  $T_{w1}$  を代表温度として定義した。 $T_{up}$ 、 $T_{lp}$  はそれぞれ上部・下部プレナムにおけるバルク温度である。

無次元数に用いる一次冷却水の物性値は、特に断らない限り膜温度  $(T_b + T_{w1}) / 2$  で評価した。また、本実験において用いる流体は水のみであり、 $Pr$  の範囲は  $2.8 < Pr < 3.7$  とその変動は小さい。

### 3. 実験結果

#### 3.1 正立時

Fig.4(a), (b)は、それぞれヒーター出力  $Q = 60\text{kW}$  における、炉心部の一次冷却水温度とヒーター表面温度のスパン方向分布である。ただし、温度は120秒の時間平均値である。Fig.4(a)を見るとレベル1(下部プレナム)ではコールド・レグから流入する一次冷却水の温度は一様であり、レベル2(下部タイ・プレート)でも同様である。しかし炉心発熱部においてはスパン方向に温度のばらつきが見られ、この傾向は炉心上部にいくにしたがって顕著になる。またレベル4とレベル5では、2つのレベルが流れ方向に60mmしか離れていないにもかかわらず、温度分布に大きな変化が見られる。特に両側壁近傍でその傾向が強く、炉心部B側ではレベル4に対してレベル5の温度は6.6°C上昇しているのに対し、A側では逆に1.6°C低くなっている。Fig.4(b)よりヒーター表面温度の分布ではこのような変化は示していないことから、この現象はレベル4とレベル5の間に設置されているグリッドスペーサや側壁が流れ場に影響を与えたためと考えられる。レベル6(上部プレナム)ではタイ・プレートによって流れが攪拌されるため温度は一様化される。 $Q = 40, 80\text{kW}$  においても、温度分布のこのような傾向は

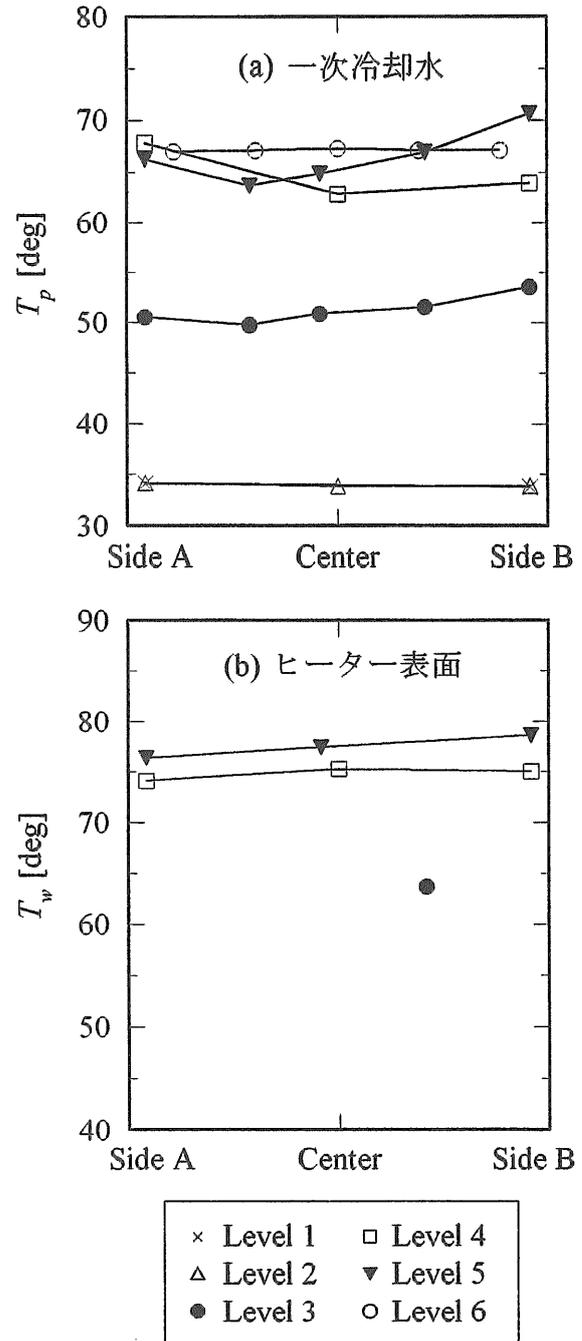


Fig. 4 正立時における炉心部スパン方向温度分布

=60kWの場合と一致しており、ヒーター出力には依存しない。よって、炉心発熱部における一次冷却水温度のスパン方向のばらつきは、本実験装置のもつ特性であるといえる。

Fig.5は、流れ方向の炉心部一次冷却水温度分布を示したものである。横軸は炉心発熱部長さ  $l_{CORE}$  で無次元化している。縦軸は外気温の影響を除くため二次冷却水SG部入口温度  $T_s$  との差をとった後、各レベルにおける平均値を示している。レベル2からレベル5の炉心発熱部における一次冷却水温度の変化はどのヒーター出力に

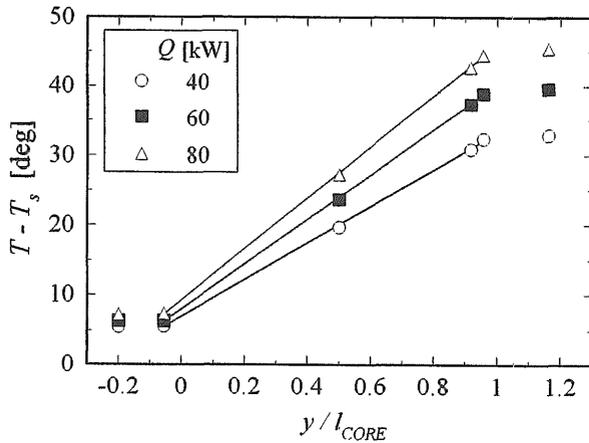


Fig.5 正立時の炉心部流れ方向一次冷却水温度分布

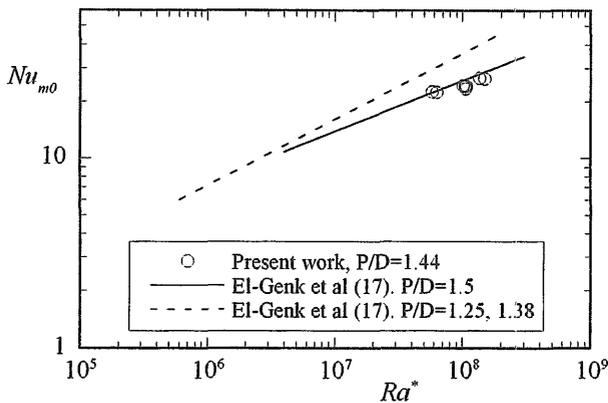


Fig.6 熱伝達データの比較

おいてもほぼ直線的であり、その勾配はヒーター出力が増加するにしたがって大きくなる。

次に炉心部の熱伝達を検討する。本実験のような閉ループにおける自然循環熱伝達においては、系全体における循環の駆動力は流体の密度差に起因する浮力である。しかし炉心部を局所的に見た場合、熱伝達は炉心部の発熱による自然対流効果の他に、見かけ上 SG 部における冷却による強制対流効果が加わる。そこでこの強制対流の効果を検討するために、El-Genk らによって行われた本実験と類似の垂直円柱群加熱上昇流実験<sup>(17)</sup> との比較を行う。El-Genk らは、外部循環ループを配した 3 × 3 格子配列の垂直円柱群による伝熱実験を行い、強制対流・複合対流・自然対流について各々の熱伝達相関式の導出及び、熱伝達の領域判別を行っている。彼らによれば、熱伝達の様式はリチャードソン数  $Ri$  によって分類でき、 $Ri=2.0$  を境として、①  $Ri < 2.0$  では強制対流、②  $Ri > 2.0$  では自然対流もしくは複合対流であるとしている。これより、本実験においてリチャードソン数は  $38.6 < Ri < 42.4$  の範囲にあることから、流れは自然対流

か複合対流の何れかであることが分かる。そこで、双方の伝熱様式に対し El-Genk らが導出した整理式と本実験結果とを比較して、本実験が自然対流・複合対流のどちらの伝熱様式であるかを検討する。

Fig.6 は本実験結果を El-Genk らの自然対流時の熱伝達相関式と比較したものである。横軸は修正レイリー数  $Ra^*$ 、縦軸は炉心部の平均ヌッセルト数  $Nu_{m0}$  である。彼らの実験は、ピッチ  $P/D=1.25, 1.38, 1.5$  の 3 種類について行われており、それぞれの  $P/D$  に対する整理式は

$$P/D=1.5 : Nu_{m0}=0.178Ra^{*0.27} \quad 4 \times 10^6 < Ra^* < 3 \times 10^8 \quad \dots(5)$$

$$P/D=1.25, 1.38 : Nu_{m0}=0.057Ra^{*0.35} \quad 6 \times 10^5 < Ra^* < 2 \times 10^8 \quad \dots(6)$$

で表されている。ただし、(5)、(6)式は物性値を流体温度によって評価しているため、本実験結果も流体温度で評価をして比較している。本実験 ( $P/D=1.44$ ) は El-Genk らの実験とはヒーター本数・ $D/l_{CORE}$ ・シユラウド形状などが異なっているが、彼らの  $P/D=1.5$  の場合と非常によく一致している。本実験値のほうが若干低い  $Nu_{m0}$  の値を示しているものの、両者の差は 10% 以内である。

一方、複合対流の場合、相関式は次式のように整理されている。

$$Nu=(Nu_N^4+Nu_F^4)^{0.25} \quad \dots(7)$$

ただし、 $Nu_N$ ：自然対流時の平均ヌッセルト数、 $Nu_F$ ：強制対流時の平均ヌッセルト数である。このとき強制対流時の相関式は

$$Nu_F=ARe^BPr^{0.33} \quad \dots(8)$$

で表されている。ただし  $A, B$  は、 $A=2.97-1.76 (P/D)$ 、 $B=0.56 (P/D) -0.006$  で計算される定数である。よって(7)式において、 $Nu_N, Nu_F$  として(5)、(8)式を用い、本実験データを代入してその平均ヌッセルト数の予測値を計算すると、実験値は予測値よりも 10~25% 程度低い値となり、Fig.6 の自然対流の場合よりも一致が悪いことが分かった。

これより本実験では、強制対流効果は弱く、熱伝達は自然対流が支配的であるといえる。

### 3.2 定傾斜時

傾斜時には、傾斜角  $\theta$  によって浮力が断面方向成分を持つために二次流れが発生し、これによって炉内の熱伝達に変化する可能性がある。

Fig.7 は  $Q=60\text{kW}$ 、 $\theta=\pm \pi/8$  における炉心部の一次冷却水温度の span 方向分布を示す。ただし各レベルにおける温度は、Fig.4 に示す span 方向温度のばらつきを排除して傾斜の影響を明確にするため正立時の温度分布との差を示している。図より炉心の傾斜の影響によって A 側端と B 側端との間に温度勾配ができてることが

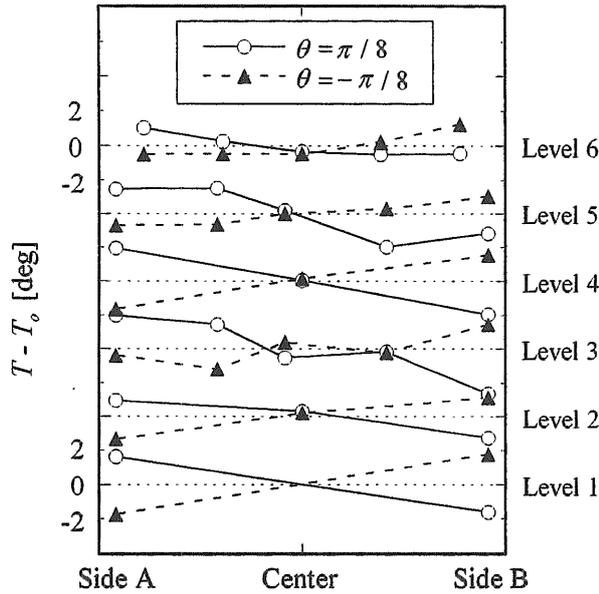


Fig.7 定傾斜時の炉心部スパン方向一次冷却水温度分布

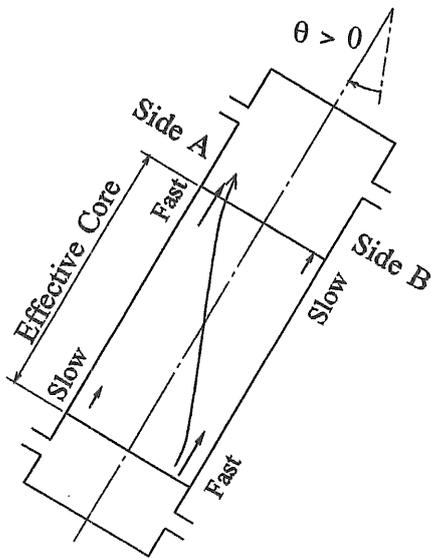


Fig.8 定傾斜時の炉心部一次冷却水流れ(概念)

分かる。各レベルにおけるA側とB側の温度差を見ると、 $\theta = +\pi/8$ においてはレベル1の下部プレナムに流入するコールド・レグの一次冷却水のA側とB側の温度差は $3.3^\circ\text{C}$ であるが、レベル3では $4.6^\circ\text{C}$ と温度差が大きくなっている。逆にレベル4, 5と炉心上部に行くに従って温度差は小さくなり、レベル6の上部プレナムでは、タイ・プレートによって流れが攪拌され温度差が $1.4^\circ\text{C}$ に減少する。 $\theta = -\pi/8$ においてもほぼ同様の傾向を示している。また $\theta = \pm\pi/12$ についても、 $\theta = \pm\pi/8$ と比較して温度差は小さいが定性的な傾向は同じである。ヒーター出力を変化させた場合にも、正立時と同様に

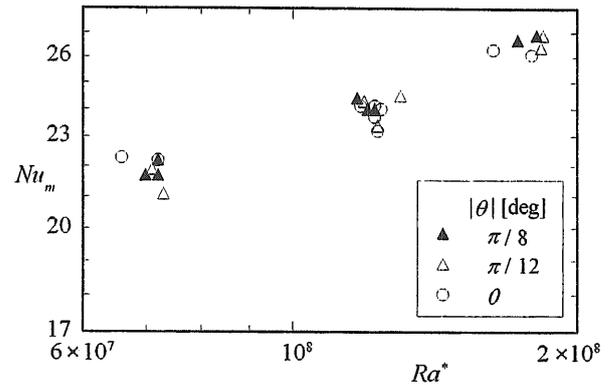


Fig.9 定傾斜時における平均ヌッセルト数

ヒーター出力の増加によって一次冷却水温度も上昇するが温度分布などの定性的な特徴は変化しない。

以上のような温度分布の傾向は先の定傾斜自然循環実験<sup>(4)-(6)</sup>と同じであり、定傾斜時の一次冷却水の流れはFig.8に模式的に示すように浮力の影響により流れ方向に緩やかにS字形を描きながら流れる<sup>(6)</sup>ものと考えられる。

Fig.9に、傾斜角度による平均ヌッセルト数  $Nu_m$  の変化を示す。正立時と傾斜時における平均ヌッセルト数に顕著な違いは見られない。よって $|\theta| < \pi/8$ の範囲では、傾斜は炉心部の熱伝達にほとんど影響を与えないことが分かる。

### 3.3 横揺れ時

横揺れ時には、 $a_r = r\{d\theta(t)/dt\}^2$ ,  $a_\theta = -r\{d^2\theta(t)/dt^2\}$  で表される横揺れによる加速度変動が炉内の一次冷却水に作用する。この加速度変動の大きさ・方向は位置によって異なるため、炉内には動揺に起因する流れが発生する。

Fig.10は、 $Q = 60\text{ kW}$ ,  $\theta = \pm\pi/8$ ,  $\tau = 5\text{ sec}$ における炉

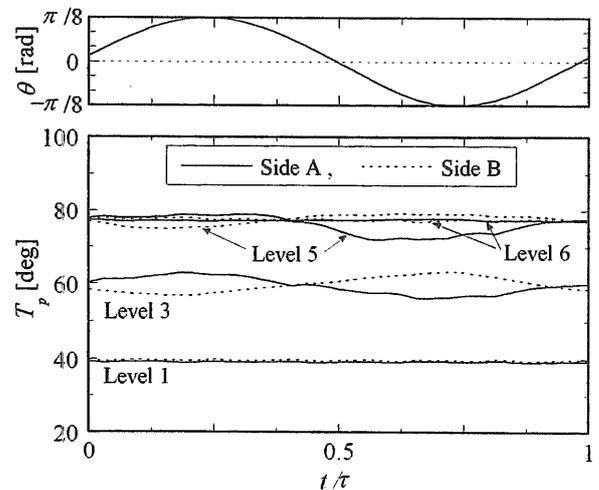


Fig.10 横揺れによる炉心部一次冷却水温度変化

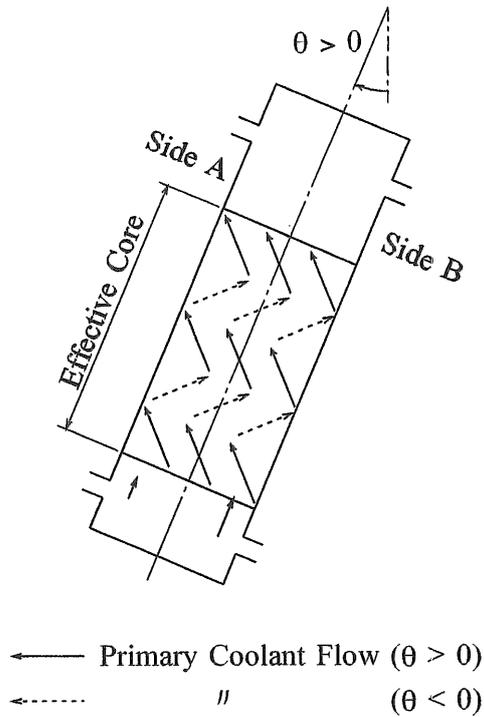


Fig.11 横揺れ時の炉心部一次冷却水流れ(概念)

心部(レベル1, 3, 5, 6)の温度変動を、横揺れ周期を基準とした周期サンプリングによりアンサンプル平均したものである。レベル1では横揺れによる温度変化は見られず一定の値を保っている。レベル3になると温度は横揺れ周期と同じ周期で変動しており、また炉心のA側とB側で位相が $\pi$ だけずれている。このときA側、B側における温度差の最大値は6.9°Cである。レベル5においても温度変動はレベル3と同じ傾向を示している。レベル6になるとA側、B側の温度差は殆どなくなり、動揺によらず一定値になる。このような傾向は実験条件が変化しても共通している。このような温度変動の特徴から、炉心部における一次冷却水の流れは模式的にFig.11のようになると考えられる<sup>(7)</sup>。炉心が動揺すると一次冷却水には横揺れによる半径方向加速度の反作用として逆向きの加速度が作用するため、横揺れ角度が正( $\theta > 0$ )の時、一次冷却水はA側に偏った流れになる。このため、炉心下部プレナムから炉心発熱部への一次冷却水流量はA側で抑制され、B側の流入量が増加する。これによってA側ではヒーターピンを横切ってきた高温の一次冷却水の割合がB側に比べて多く、B側では下部プレナムから流入する低温の一次冷却水がA側よりも多いためA側の温度が高くなる。横揺れ角度が負( $\theta < 0$ )の時にはこの関係が逆転する。

このように横揺れ時には炉心部を横切る流れが周期的に発生し、熱伝達に影響を与える。Fig.12に平均ヌッセルト数 $Nu_m$ の動揺に対する変化を示す。ただし、横軸には浮力と横揺れによる慣性力の比を表す動揺のリチャードソン数 $Ri_R = Gr^*/Re_R^2$ を用い、縦軸は平均ヌッセルト

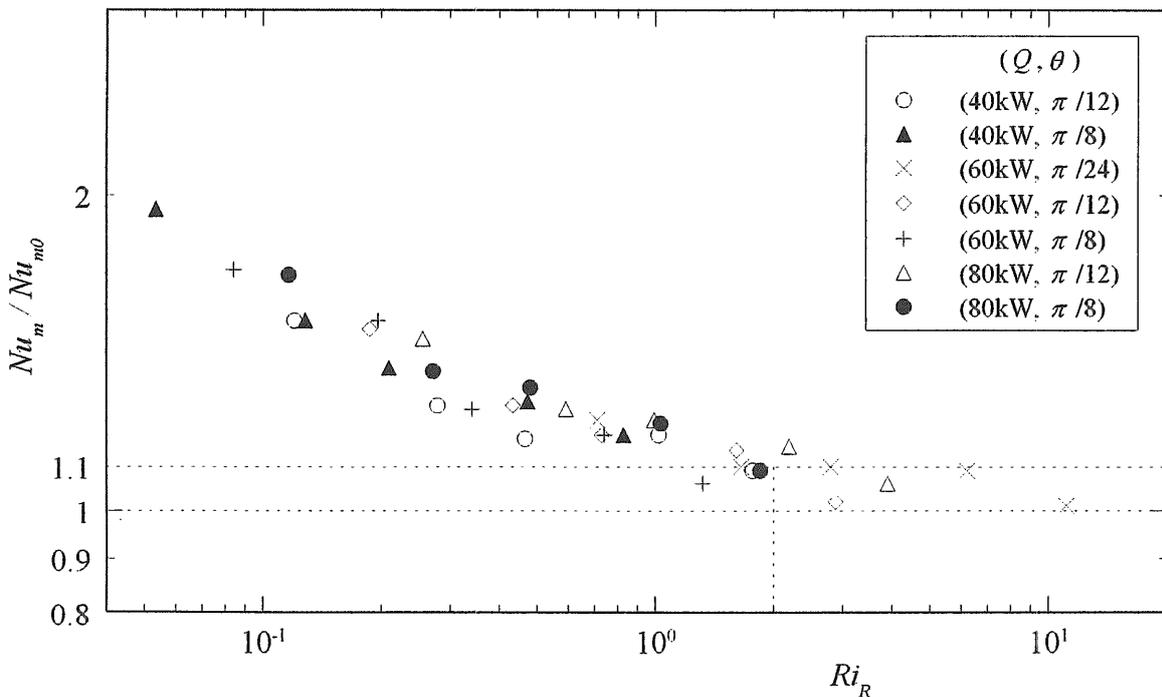


Fig.12 横揺れ時における平均ヌッセルト数

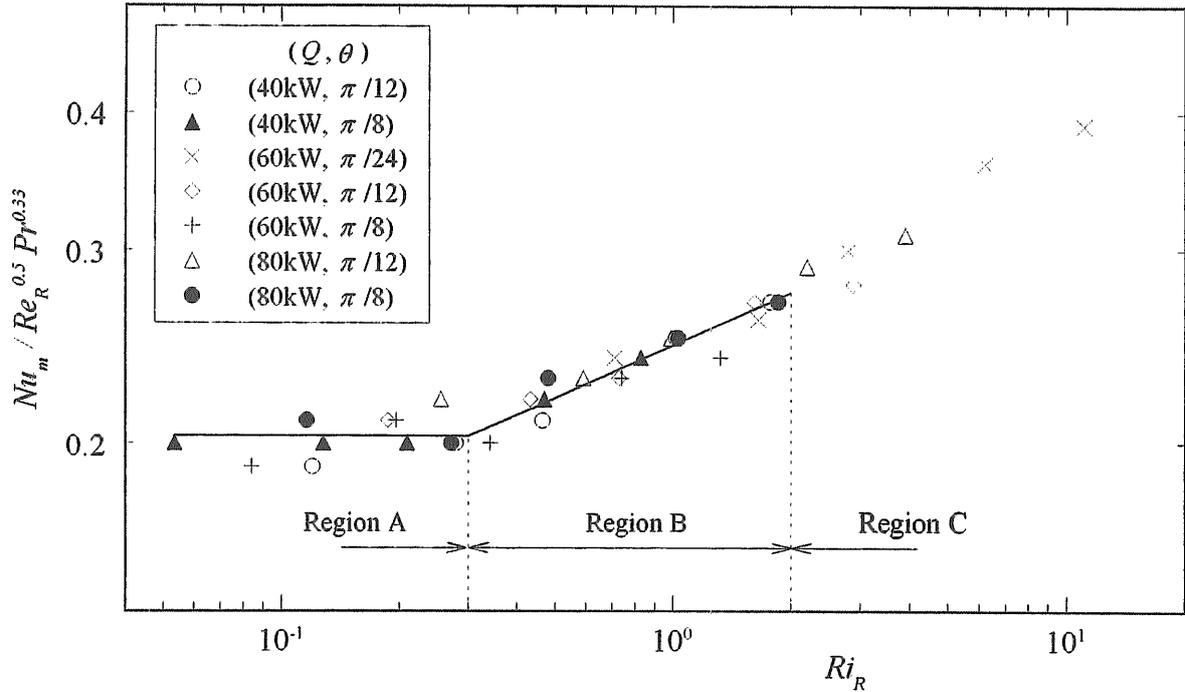


Fig.13 横揺れ時における熱伝達の領域判別

数  $Nu_m$  と正立時の平均ヌッセルト数  $Nu_{m0}$  との比を示す。本実験における  $Re_R$  と  $Ri_R$  の範囲はそれぞれ、 $17 < Re_R < 218$ 、 $0.05 < Ri_R < 11$  である。図より、 $0.05 < Ri_R < 2$  では動揺効果が増加 ( $Ri_R$  が減少) するとともに  $Nu_m$  も単調増加していることが分かる。また、 $2 < Ri_R < 11$  では  $Nu_m/Nu_{m0}$  の値は  $Ri_R$  によらずほぼ一定であり、 $Nu_m$  の正立時との差は10%以内に収まっている。これらのことより、 $2 < Ri_R < 11$  では自然対流が支配的であり、横揺れによる慣性力の影響は非常に弱いことが分かる。

自然体流領域より外れる  $0.05 < Ri_R < 2$  における熱伝達特性をより詳しく調べるために、次元解析より導かれる垂直平板に沿う複合対流の関係式

$$Nu = \sqrt{Re} \cdot f(Ri, Pr) \quad \dots(9)$$

を用いて、Fig.12の縦軸を修正したものを Fig.13に示す。ただし、プラントル数  $Pr$  の乗数は0.33とした。これより図中に領域A～Cで示すように、流れの領域をより明確に決定することができた。 $0.05 < Ri_R < 0.3$  (領域A) では、縦軸の値は横軸によらずほぼ一定値であることから、平均ヌッセルト数は動揺のレイノルズ数のみによって記述され、横揺れによる慣性力が支配的であることがわかる。また  $2 < Ri_R < 11$  (領域C) では Fig.12で示したように自然対流が支配的であることから、残された  $0.3 < Ri_R < 2$  (領域B) の範囲では、流れは自然対流と横揺れによる慣性力とが複合している領域であるといえる。以上より、領域A、Bについての相関式をまとめて示すと、

$$\text{領域A} : Nu_m = 0.203 Re_R^{0.5} Pr^{0.33} \quad \dots(10)$$

$$\text{領域B} : Nu_m = 0.246 Ri_R^{0.16} Re_R^{0.5} Pr^{0.33} \quad \dots(11)$$

と表される。それぞれの領域における誤差は、強制対流のとき  $\pm 6\%$ 、複合対流の時  $\pm 5\%$  である。

#### 4. 結 論

一体型船用炉を模擬した実験装置を用いて、船用炉の傾斜・横揺れ時における自然循環実験を行い、その炉心部における熱伝達の特徴を明らかにした。以下に本実験で得られた結論を示す。

1. 正立時の熱伝達は、EL-Genkらによって行われた垂直円柱群加熱上昇流実験の自然循環時 ( $P/D=1.5$ ) の結果と10%以内でよく一致していることから、熱交換器(SG)部での冷却による強制対流効果は非常に弱く、自然対流が支配的である。
2. 定傾斜時自然循環実験の行われた傾斜角 ( $\theta = \pm \pi/12, \pm \pi/8$ ) では、傾斜が炉心部の熱伝達に与える影響はほとんどない。
3. 横揺れ時の炉心部熱伝達は、動揺効果を表す無次元数として動揺のレイノルズ数  $Re_R$  を導入し、動揺のリチャードソン数  $Ri_R = Gr^*/Re_R^2$  を用いることで整理できた。

これによって流れ場は次のように判別される。 $2 < Ri_R < 11$  においては自然対流が支配的であり、平均ヌッセルト数  $Nu_m$  の正立時との差は10%以内で横揺れによる熱伝達促進効果は殆ど見られない。しかし  $Ri_R < 2$  では、 $Nu_m$  は動揺効果の増大につれ単調増加する。このとき、 $0.3 < Ri_R < 2$  では自然対流と横揺れによる慣性力とが複合する領域、 $0.05 < Ri_R < 0.3$  では横揺れによ

る慣性力が支配的な領域となる。

### 参 考 文 献

- 1) 赤城新介ほか2名：動揺を伴うタンク内の流動と熱伝達，第21回日本伝熱シンポジウム講演論文集，1984，K216
- 2) 加藤洋治：タンカー荷油の放熱に対する動揺の影響，日本造船学会論文集，第126号，1969，pp.421-430
- 3) Doerffer, S. et al. : The influence of oscillations on natural convection in ship tanks, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol.7, No.1, 1986, pp.49-60
- 4) Iyori, I. et al. : Basic flow rate characteristics of natural circulation of marine reactors at inclined attitude, Proc. of 2nd Intl. Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Tokyo, Apr 1986, P.1 D-2
- 5) 村田裕幸ほか2名：一体型船用炉の定傾斜時自然循環特性，船舶技術研究所報告，第25巻3号，1988，pp.251-274
- 6) Iyori, I. et al. : Natural circulation of integrated-type marine reactor at inclined attitude, Nucl. Eng. Des., 99, 1987, pp.423-430
- 7) 村田裕幸ほか1名：船用炉の横揺れ時自然循環特性，船舶技術研究所報告，第26巻1号，1989，pp.25-40
- 8) 村田裕幸ほか1名：船用炉の横揺れ時自然循環特性，原子力学会1988年秋の大会，1988-10，D43
- 9) 村田裕幸ほか1名：船用炉の横揺れ時自然循環特性（続報），原子力学会1989年春の大会，1989-4，F16
- 10) 村田裕幸ほか1名：船用炉の横揺れ時自然循環特性（第3報），原子力学会1989年秋の大会，1989-10，E53
- 11) Murata, H. et al. : Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion, Nucl. Eng. Des., 118, 1990, pp.141-154
- 12) Ishida, I. et al. : Thermal-hydraulic behavior of a marine reactor during oscillations, Nucl. Eng. Des., 120, 1990, pp.213-225
- 13) 村田裕幸ほか1名：船用炉の横揺れ時自然循環特性，第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集，1989-5，B331
- 14) Sparrow, E.M. et al. : Laminar-free-convection heat transfer from the outer surface of a vertical circular cylinder, Transactions ASME, Vol.78, 1956, pp.1823-1829
- 15) Warrington, Jr, R.O. et al. : Natural convection heat transfer between cylindrical tube bundles and a cubical enclosure, J. Heat Transfer, Vol. 103, 1981, pp.103-107
- 16) Keyhani, M. et al. : Experimental investigation of free convection in a vertical rod bundle - a general correlation for Nusselt numbers, J. Heat Transfer, Vol.107, 1985, pp.611-623
- 17) El-Genk, M.S. et al. : Experimental Studies of forced, combined and natural convection of water in vertical nine-rod bundles with a square lattice, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.36, No.9, 1993, pp.2359-2374
- 18) 入江正彦：一体型船用炉の概念設計，日本船用機関学会誌，第7巻12号，1972，pp.877-882
- 19) 日本機械学会編：流体計測法，1985，pp.202-207
- 20) 竹村数男：原子力船工学，成山堂，1975，p.239
- 21) 関西造船協会編：“造船設計便覧 第4版”，海文堂，1983，p.414
- 22) 井上義行 他：“各種貨物船の船型要素と波浪中動揺性能”，関西造船協会誌，第208号，1988，pp.11-25