

JAERI - M
93-134

加速度変動時の限界熱流束に関する実験(その2)
(加速度変動時の限界熱流束の測定：第2報)
(共同研究)

1993年7月

楠 剛・手嶋 登* 鈴木 治**

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

加速度変動時の限界熱流束に関する実験（その2）

（加速度変動時の限界熱流束の測定：第2報）

日本原子力研究所原子力船研究開発室

楠 剛・手嶋 登*・鈴木 治**

（1993年6月4日受理）

船用炉の炉心熱水力設計上，船体運動に伴う上下方向加速度が限界熱流束に及ぼす影響を明かにすることが重要である。

本研究の目的は，改良船用炉の設計研究の一環として，上下方向加速度と炉心の限界熱流束の関係を実験的に求めることにある。

実験は，日本原子力研究所と船舶技術研究所との共同研究として行われ，R-113を実験流体とした実験ループを動揺台に搭載し上下方向加速度を付加し，限界熱流束を測定した。実験から改良船用炉の運転圧力10.9MPaと気体の密度と液体の密度の比が一致するR-113の圧力1.47MPaの条件においても，上下方向加速度の振幅の増大と共に限界熱流束が低下すること，及び限界熱流束は最小加速度の $(1/4)$ 乗に比例して低下する大辻等の式（付加加速度 $< 0.5g$ ）で保守的に評価できることを確認した。

本研究は日本原子力研究所と船舶技術研究所との共同研究である。

日本原子力研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

* 船舶技術研究所

** NKK（日本鋼管株式会社）

Experimental Study on the Critical Heat Flux
in Varying Acceleration Field (Part 2)
(The Measurement of Critical Heat Flux
under Varying Acceleration Field. II)

Tsuyoshi KUSUNOKI, Noboru TESHIMA* and Osamu SUZUKI**

Office of Nuclear Ship and Development
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 4, 1993)

In designing a marine reactor, it is very important to understand the effect of varying acceleration induced by ship motion on critical heat flux.

The purpose of this study is to clarify quantitatively the relationship between the critical heat flux and vertical acceleration for designing a future advanced marine reactor. The test loop with R113 was rested on a heaving device.

The experiment was carried out as a joint study between JAERI and Ship Research institute. From the experimental results, we concluded as follows : The critical heat flux decreases with an amplitude of oscillating acceleration even at the pressure 1.47MPa of test fluid R113 which has same ratio between the density of vapor and liquid as 10.9MPa of fresh water. The operating pressure of an advanced marine reactor MRX -1 is 10.9MPa. We confirmed that it is a conservative for reactor design to apply the relation of Otsuji, that the critical heat flux decreases in proportion to a quarter power of the minimum vertical acceleration.

Keywords : Critical Heat Flux, Varying Acceleration, Marine Reactor, R-113,

A joint Study between JAERI and Ship Research Institute

* Ship Research Institute

** NKK Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	2
2.1 実験ループ	2
2.2 上下動揺装置	2
2.3 測 定	3
3. 実験結果	7
3.1 実験条件	7
3.2 動揺時の限界熱流速の低下割合	8
3.3 考 察	9
4. 結 論	18
参考文献	19

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus	2
2.1 Test Loop	2
2.2 Heaving Apparatus	2
2.3 Measurement	3
3. Experimental Results	7
3.1 Experimental Condition	7
3.2 Critical Heat Flux under Varying Acceleration Field	8
3.3 Discussion	9
4. Conclusion	18
Reference	19

1. はじめに

海洋環境下にある船用原子炉プラントは、稀に地震の際にしか加速度と傾斜を経験しない陸上炉と異なり、常にこれらの影響に曝されている。それ故、船用炉の設計では加速度と傾斜の影響を正しく評価しておかなければならない。

原子炉の安全性を評価し、運転限界を設定するうえで重要な評価項目の一つに限界熱流束がある。限界熱流束が船体運動に起因して低下することはよく知られている。船体運動は三次元空間における各方向への並進運動並びに各座標軸を軸とする回転運動の6方向の自由度を有する。このうち直線運動のヒービングと回転運動のローリング及びピッチングの影響が他の運動の影響に比べて大きい。

上下方向加速度の変動が限界熱流束に及ぼす影響については、Siegel¹⁾、Woodward²⁾、一色等³⁾、手嶋等⁴⁾、大辻⁵⁾による研究があり、上下方向加速度の変動する条件下では限界熱流束が必ず低下すること、自然循環時および高クオリティ域での限界熱流束の低下の第1の原因は流量の低下であること、低クオリティ域およびサブクール沸騰域での限界熱流束の低下の原因は気泡流からスラグ流への流動状態の遷移が促進されるためであると考えられること等が明らかにされている。

大辻は、環状流路内におけるR113の垂直上昇流を対象に0.3MPaの圧力のもとで、流量、入口サブクール度をパラメータとして、周期的な加速度変動に対する限界熱流束の低下割合を測定した。この結果、動揺時の限界熱流束に関する保守的相関式として次式を得た。⁵⁾

$$q''_c / q''_{c0} = (1 - a / g_e)^{1/4} \quad 0 \leq a / g_e \leq 0.5 \quad (1.1)$$

ここで、 q''_c 、 q''_{c0} はそれぞれ動揺時、静止時の限界熱流束を表し、 a は上下方向加速度変動の振幅を、 g_e は地球の重力加速度を表す。

これらの研究の成果を踏まえて、本研究室は、R113を作動流体として低クオリティ域およびサブクール沸騰域での気泡の挙動の観察と、船用炉の運転状態に相当する圧力での限界熱流束の低下率の測定を行った。神戸商船大学との共同研究として行った上下方向加速度変動が沸騰域での気泡の挙動に及ぼす影響を調べた実験については、既に報告を行った^{6),7)}。

神戸商船大学との共同研究では、R113を用いて0.5MPaの圧力条件にて実験を行い、上記の保守的相関式が適用できることを確認した。また、加速度変動に対する流量、出口ボイド率の変動の周波数応答関数を測定し、加速度変動は沸騰流路のある狭い区間でのみボイド率変動に強く影響すると考えられることを示した。⁸⁾

今回、船舶技術研究所との共同研究では、神戸商船大学の動揺台には重量制限の関係から搭載できなかった高圧ループを用いて、1.47MPaの圧力条件にて限界熱流束の低下割合を測定した。二種類の流体について液-蒸気系の間の相似関係を求めるときには、それぞれの系における飽和液と飽和蒸気の密度の比 (ρ_l / ρ_g) を等しくする。今回のR113を用いた1.47MPaの実験は水では10.9MPaに相当する。また、0.5MPaでの実験をあわせ行い、神戸商船大学における実験結果との比較を行った。両者の実験部はほぼ同じ形状とした。

2. 実験装置

実験装置は、R113を作動流体とする実験ループと、この実験ループを搭載して加速度を加える上下動揺実験装置からなる。

2.1 実験ループ

実験ループの概念図を図2.1に示す。

本実験ループは、供試体である模擬燃料を収納する実験容器、加圧器、凝縮器、予冷器、循環ポンプ、予熱器およびこれらを接続する配管よりなる。ループには各種弁、測定装置が接続されている。この他に、貯留タンク、真空ポンプ、充填ポンプ等の補助設備を備える。加圧器、凝縮器、予冷器における除熱は冷却水を流すことにより行う。この冷却水は、冷却塔に導かれここで冷却される。

実験容器は、模擬燃料を収納する容器で、上部と下部のフランジをシースヒータが貫通する構造である。実験容器をでた流体は配管を通して予冷器へ導かれる。実験容器で発生した蒸気は凝縮器で凝縮されて循環する流路へもどる。予冷器では流体を所定の温度まで冷却して循環ポンプへ送る。循環ポンプは、流量 $3\text{m}^3/\text{h}$ 、揚程 35m の遠心式ノンシールタイプで循環流量の調整を流量調整弁およびバイパス弁で行う。加圧器は下部に 5kW の加熱用ヒータを備えており圧力の調整を行う。

循環ポンプを出た流体は予熱器に入る。予熱器は 10kW の加熱用ヒータを備えており、実験容器入口の温度設定を行う。

実験ループは動揺実験中には補助設備による補給または排出を行うことができないので、起動、停止、実験条件の設定変更による体積変化分を吸収できる容積を有している。

実験部は内管加熱式の二重管である。ヒータは外径 10mm 、発熱長 1000mm 、出力 20kW のシースヒータで、外管は内径 22.2mm のSUS304管である。ヒータには発熱部上端より 10mm 、 100mm 、 350mm 、 600mm 、 850mm の位置に熱電対を埋め込んでおり、この熱電対の温度上昇によりバーンアウトを検出する。実験部の形状は神戸商船大学での実験で用いたものとはほぼ一致している。異なる点は、ヒータの加熱方式として今回は間接加熱方式を用い、神戸商船大学では直接通電方式を用いたこと及びバーンアウト検出方式として今回は温度式検出器を用い、神戸商船大学ではブリッジ式検出器を用いたことである。

2.2 上下動揺装置

上下動揺装置としては、船舶技術研究所にてこれまで上下動揺時の二相流動特性の測定⁴⁾等に利用されてきた装置を用いた。上下動揺装置の概念図を図2.2に示す。上下動揺実験装置の装置本体は鉄骨支柱とその間を上下動する実験台からなり、この実験台の駆動は油圧により行われる。油圧ポンプ（定容量型）の吐出油圧は、調圧弁で所定の圧力に設定されて切換弁を経て油圧シリンダに入る。切換弁の周期的な切換により油圧シリンダの上部・下部交互に油圧が切り換わり、ピストンを上下運動させる。ピストンの運動を動滑車とワイヤロープで4倍のストロークに拡大し、ワイヤロープに固定した実験台を上下運動させる。

実験台の上下動揺周期は作動油用切換弁の切換周期によって決まる。切換弁としては電気-油圧サーボ弁が用いられている。低周波発信器からの正弦波信号がサーボ増幅器をへてこの切換弁に加えられる。

実験台の搭載重量のカウンターバランス用に空気圧を用いたバランス圧シリンダおよび上下行程の上下端における緩衝用のバネ圧シリンダが油圧シリンダに並列に設けてある。サーボ増幅器に加えらる電気入力信号（振幅、周期、正弦波形）、バネ圧用空気圧力、および油圧を適切に設定することにより、必要とする上下動の行程と周期を一定範囲内で自由に得ることができる。

2.3 測定

主要な測定箇所は図2.1に示した通りである。

①圧力測定

圧力は実験部出口付近の圧力を同所に取り付けられた歪ゲージ式圧力変換器によって測定してループの圧力を代表させた。なお、加圧器での圧力制御には加圧器圧力を用いた。

②温度測定

R113温度は、実験部の入口、出口、加圧器、流量計直前にてKタイプ熱電対にて測定した。加圧器の温度測定はヒータ露出の監視を目的としている。流量計直前の温度測定は質量流量を計算するための密度補正に用いるためである。

実験部ヒータ表面温度はヒータに埋め込まれたKタイプ熱電対により測定した。

③流量測定

流量の測定は実験部入口の手前に設けたタービン流量計により行った。時間的に変化する流量を測定するためにデジタル演算型高速F/Vコンバータを用いた。測定された体積流量は流量計直前の温度を用いて得られた密度を乗じて質量流量とし、流路断面積 0.0003085m^2 で除して質量速度とした。

④加速度測定

実験ループの加速度は動揺台に取り付けられた歪ゲージ式加速度変換器により測定した。本報の加速度の符号は垂直上向きを正とした。重力加速度を g_e (-9.8m/s^2)、運動加速度を $a(t)$ とすると合成された重力加速度 $g(t)$ は

$$g(t) = g_e + a(t) \quad (2.1)$$

で与えられる。従って、合成された加速度は $\frac{a}{g_e}$ が正の場合（作用する方向が同じ場合）には大きくなり、負の場合（作用する方向が逆の場合）には見かけの重力加速度は小さくなる。

⑤熱流束測定

熱流束 q_{BO} は、投入電力と伝熱面積より近似的に次式により求めた。

$$q_{BO} = \frac{VI/1000}{4\pi DL} \quad (\text{kW/m}^2) \quad (2.2)$$

ここで、 V , I : 電圧、電流

⑥ボイド率の測定

光ファイバー式ボイド計によるボイド率の測定を試みたが、本装置自体が上下動揺時に大きなノイズを信号内に発生するため適切な測定が行えなかった。今回の実験ではボイド率の測定は行っていない。

⑦限界状態の検出

限界状態の検出は、実験部ヒータに埋め込まれた熱電対の温度をA/D変換によりデジタル値に変換して、常時マイクロコンピュータに取り込み、温度および温度上昇率を監視することにより行った。温度または温度上昇率が下記の条件を越えた場合に限界状態が発生したと判定した。

	最高温度	温度上昇率
0.5MPa	150 °C	7 K/s
1.5MPa	180 °C	7 K/s

測定したデータは、50msecの周期でA/D変換し収録した。

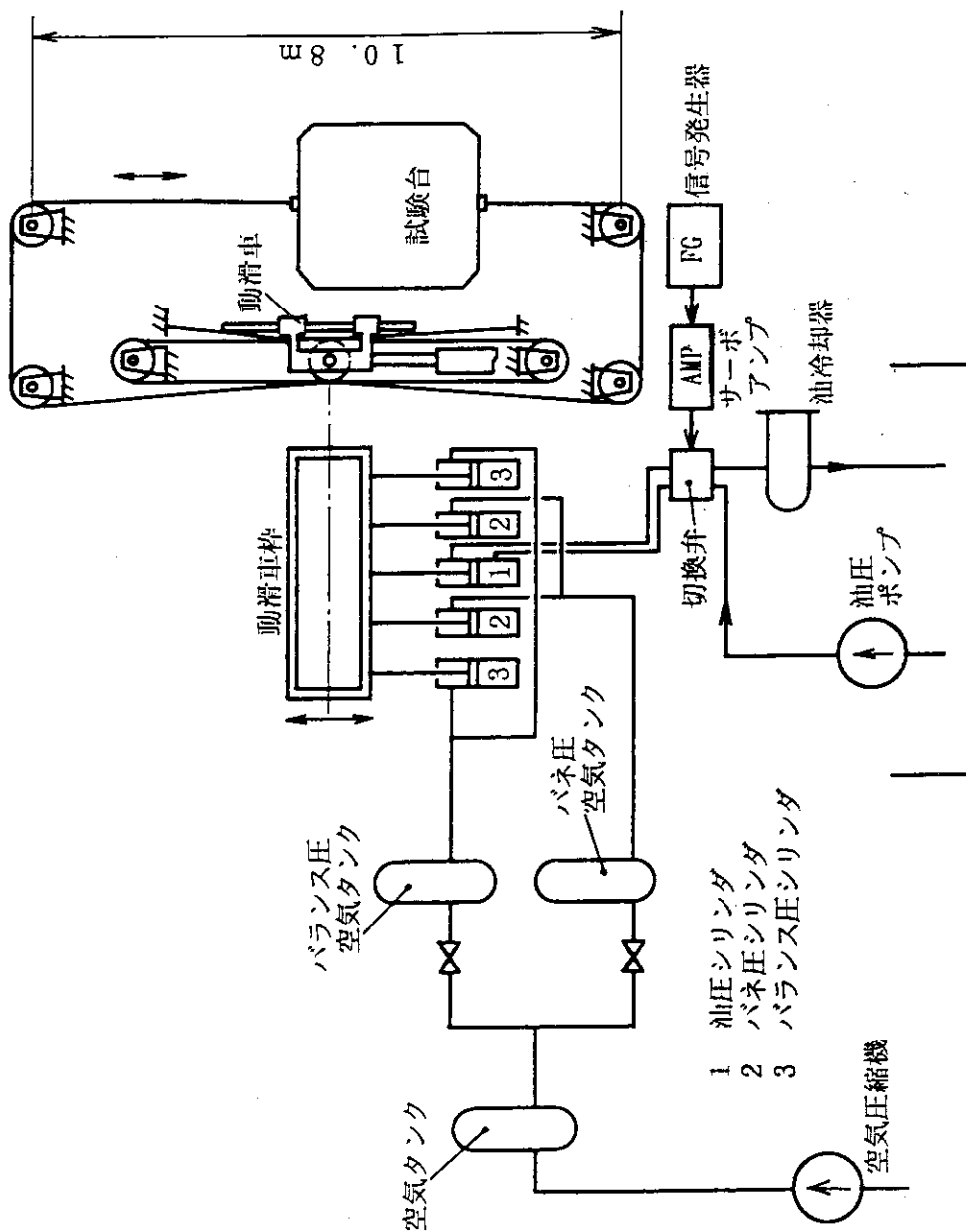


図2.2 上下動揺装置概念図

3. 実験結果

3.1 実験条件

実験パラメータは次の通りである。

圧力（2ケース）	0.5 , 1.47 MPa
質量速度	1000 kg/m ² s
入口サブクール度	25 K
加速度振幅（基本周期）	~0.28g
加速度周波数	0.18 Hz
作動流体	R 1 1 3

圧力0.5MPaでの実験は神戸商船大学にて実施した限界熱流束の測定実験との比較のための実験である。入口サブクール度および入口流量は実験期間が限られていたことから1種類とした。

圧力1.47MPaの実験は、流体の相似則を用いて船用炉の運転条件に近い状態をR-113で模擬した限界熱流束低下割合測定の実験である。著者らによるこれまでの研究は、加速度変動が限界熱流束に影響を及ぼす物理的な機構を解明することを目的としており、相似則の適用を意図したものではなかった。今回のR-113を用いた実験では、Ahmadの提唱した相似則⁹⁾を用いて実機のプラント運転条件に近い状態を模擬して限界熱流束の低下割合を求めた。限界熱流束に関するこの相似則を極めて簡単にまとめれば、実機とモデルで形状が同じで、 $\frac{L}{D}$ 、 $\frac{\rho_l}{\rho_v}$ 、 $\frac{\Delta H}{\lambda}$ 、 ϕ_{CHF} (CHF modeling parameter)をあわせれば、 $\frac{q''}{(G \cdot \lambda)}$ は流体の種類が違って同じ値が得られるということである。

ここで、L：加熱長、D：水力等価直径、 ρ_l ：飽和液密度、 ρ_v ：飽和蒸気密度、

ΔH ：サブクール度、 λ ：蒸発潜熱

今回の実験の流路形状は神戸商船大学での実験で用いた流路形状と同じで、 $\frac{L}{D}$ は約82である。原子力第1船「むつ」炉心では、約73であり、改良船用炉MRX¹⁰⁾の炉心設計は数回の変更が行われ、現在は約119であるので、船用炉炉心を模擬した試験部といえる。R-113の圧力1.47MPaでの $\frac{\rho_l}{\rho_g}$ は10.93であり、水で

同じ値をとる圧力は10.9MPaである。これは、「むつ」およびMRX炉心の運転圧力に相当する。「むつ」およびMRX炉心の $\frac{\Delta H}{\lambda}$ と一致させる入口サブクール度は15Kであるが、実験では神戸商船大学での実験および今回の0.5MPa実験との比較のために前と同じ25Kとした。 ϕ_{CHF} は下記の式で記述される。

$$\phi_{CHF} = \left[\frac{GD}{\mu_l} \right] \cdot \left[\frac{\gamma^{1/2}}{D \rho_l^{1/2}} \right]^{2/3} \cdot \left[\frac{\mu_l}{\mu_v} \right]^{1/8} \quad (3.1)$$

ここで、G：質量速度、 μ_l ：液粘性係数、 μ_v ：蒸気粘性係数、

$$\gamma : \left| \frac{\delta(\rho_l/\rho_v)}{\delta P} \right|_{\text{saturation}}、$$

式から明らかのように、流体の組み合わせと気液密度比が決まれば ϕ_{CHF} を一致させる流体間の流量比(FG)が決まる。R-113と水の組み合わせで気液密度比が10.93の場合には、 $FG=1.319$ となり、水の質量速度をこのFGで除した質量速度がR-113で両者の ϕ_{CHF} を一致させる値となる。R-113を用いる場合、「むつ」炉心の質量速度は炉心平均で約580kg/cm²、流量の低いところで約615kg/cm²である。昭和63年設計のMRX炉心では炉心平均で約1260kg/cm²、流量の低いところで約890kg/cm²である。入口質量速度は、神戸商船大学で行った実験の条件のうち、改良船用炉の炉心入口質量速度をR113で模擬した場合の

流量に近い $1000\text{kg/m}^2\text{s}$ とした。付加加速度(a/g)は、得られた加速度振幅スペクトルの基本周波数での加速度振幅にて代表した。

実験は静止時限界熱流束測定と動揺時限界熱流束を同じ実験条件(加速度を除く)にして行った。予備実験として静止時の限界熱流束を測定し、概略の限界熱流束を把握した。

本実験の静止時限界熱流束の測定では、まず所定の圧力、流量、サブクール度、及び限界熱流束の約5%低い実験ヒータ出力で系を安定させたのちに、実験ヒータによる熱入力を徐々に増加した。限界状態計測後直ちに、系をもとの状態に安定させ、動揺装置により所定の加速度を与えつつ、2周期に約0.5%ずつ(約0.1kW)を目標に段階的に実験ヒータ出力を増加させ、限界熱流束の測定を行った。

3. 2 動揺時の限界熱流束の低下割合

静止状態での限界熱流束は以下の通りである。

圧力	限界熱流束	出口クオリティ
0.5 MPa	$276.91 \pm 2.9 \text{ kW}$	0.018
1.47 MPa	$250.81 \pm 1.04 \text{ kW}$	-0.042

神戸商船大学で実施した0.5 MPa、流量 $1000\text{kg/m}^2\text{s}$ 、入口サブクール度25 Kの条件での静止時限界熱流束は以下のとおりである。

圧力	限界熱流束	出口クオリティ
0.5 MPa	$264.9 \pm 1.8 \text{ kW}$	0.014

動揺時および静止時の実験結果を表3.1及び表3.2にまとめた。

静止状態において圧力、流量、入口サブクール度等を等しくしても限界熱流束には数%のばらつきが存在する。これは、実験条件の再現性が十分でないことと限界状態の発生には統計的な発生確率があるためと考えられる。しかし、間隔をおかず続けて測定した静止時限界熱流束の再現性は良好であることが経験的に分かっているので、静止時および動揺時の限界熱流束の測定実験を常に続けて測定するようにした。

圧力0.5MPaでの加速度振幅が0.20gおよび0.16gの場合の測定結果の一部を図3.1および図3.2に示す。圧力1.47MPaでの加速度振幅が0.27gおよび0.21gの場合の測定結果の一部を図3.3および図3.4に示す。

図には、付加加速度(a/g)、ヒータ表面温度(加熱部終端より10mm)、流量変動率($(W-Wav)/Wav$)が示されている。図において限界状態の発生は、ヒータ表面温度の急速で連続的な上昇が示している。限界状態が検出されるとヒータ電源が自動的に切られるのでヒータ表面温度は急速に低下する。

これらの図の観察より以下のことがわかる。

- ①ヒータ表面温度は、0.5MPaの実験では、加速度が小さくなった時に上昇し、加速度が大きくなった時にもとの温度にもどるが、ある時点で限界状態が発生して連続的に上昇する。
- ②1.47MPaの実験では0.5MPaほど顕著ではないが同様の傾向が見られる。
- ③入口流量は動揺によってほとんど変化しない。

神戸商船大学で行った0.5MPa、出口クオリティ0.014の実験では、CHF検出器の出力の振動は観察されなかった。神戸商船大学での実験では、ヒータの上端より約15mm下側に電圧タップをロウ付けして、この

電圧タップの両側にヒータを2分割して外部抵抗と組み合わせて抵抗ブリッジ回路を作った。限界状態が起こる前の状態で外部抵抗を調整してブリッジの平衡をとっておく。ヒータ上部で限界状態が発生すると、その部分の温度が急激に上昇し電気抵抗が増加する。この電気抵抗の増加を観察しているの、間接的にヒータ温度の上昇を知ることができる。この方法は、限界状態の検出には極めて有効であるが、ヒータの2分割した一方の平均的な温度挙動を観察していることになる。今回のヒータ温度の測定は熱電対による局所的な温度の測定であるので、神戸商船大学の実験では明確に観察されなかったヒータ温度の振動が観察されたと考えられる。一方では、ヒータ表面温度の測定によるCHF検出を用いた場合、局所温度を測定しているために限界状態の発生が測定場所からずれた場合には状態の伝播の時間だけ温度の上昇が遅れている可能性がある。

各圧力条件において、基本周波数における加速度振幅(a/g_e)の関数として、静止時限界熱流束に対する動揺時の限界熱流束の比(q''_c/q''_{co})をプロットした結果を図3.5および図3.6に示す。図より以下のことが確認された。(q''_c : 静止時限界熱流束、 q''_{co} : 動揺時限界熱流束) ここで、 a は、基本周波数における加速度振幅を用いた。

④いずれの圧力条件でも動揺時の限界熱流束は、静止時の限界熱流束に比べて低下する。

⑤いずれの圧力条件でも低下割合は式(1.1)で示される保守的な相関式が適用できる。

また、図3.7に神戸商船大学で行った0.5MPaでの実験結果を示す。図3.7は公称加速度振幅により整理されているが、この加速度振幅は今回の実験範囲においてほぼ基本周波数での付加加速度振幅に一致している。両者の比較より

⑥基本周波数での付加加速度振幅で整理した場合に限界熱流束の低下の傾向は両者において一致することがわかった。前回の実験に比べてややばらつきが大きく、動揺時の限界熱流束の低下割合がやや小さいが、傾向は両者において一致している。

3.3 考察

(1) 神戸商船大学で実施した実験との比較

0.5MPaの圧力条件で行った今回の実験と神戸商船大学での実験を比較する場合には次の2点について留意する必要がある。

①動揺装置が異なるために付加される加速度の時系列が異なる。また、付加加速度の整理方法が異なる。

②CHF検出方法が異なる。

まず、神戸商船大学の動揺装置が与える公称加速度0.2gの場合の実測加速度波形を図3.8に、加速度スペクトルを図3.9に示す。公称加速度振幅は、ループの振幅と動揺周波数から便宜的に求めた加速度の振幅であり、理想的な作動を仮定した理論加速度振幅と比較するとピーク値で約(1/1.16)倍となる。図3.8に見られるように、実測加速度波形は加速度が正の領域で鋸状のいびつな形状を示すが、限界状態が発生すると考えられる加速度の負の領域では比較的滑らかな形状を示す。付加加速度の最小値は-0.25g程度であり、公称加速度振幅と実測ピーク値との差はあまり大きくない。図3.9に見られるように、基本周波数での付加加速度振幅は公称加速度振幅とほぼ一致している。

船舶技術研究所の動揺装置が与える基本周波数での加速度が0.2gの場合の実測加速度波形を図3. 10に、加速度スペクトルを図3. 11に示す。実測加速度波形は、正の領域でも、負の領域でもかなり顕著なピークを有している。表3. 1に見られるように、実測加速度のピーク値の基本周波数での付加加速度振幅に対する比は大きい場合には約2となる。船舶技術研究所の動揺装置では、公称加速度振幅に相当する値を計算することが困難であり、また、求めてもこれをもって神戸商船大学の実験結果と同じ意味を有するわけではない。非常に短い時間のみ作用している実測加速度のピーク値は、流動現象の変化を介して限界熱流束に与える影響を代表させるパラメータとしては不適當と考えられる。事実、負の最大加速度で両実験を比較した場合には限界熱流束の低下割合は大きく離れてしまう。今回の実験範囲では、両者を基本周波数での付加加速度振幅で整理して比較することが現実的である。神戸商船大学の動揺装置では、公称加速度振幅と基本周波数での付加加速度振幅がほぼ一致することから図3. 5と図3. 7は直接比較することが可能であり、両者は同様の傾向を有していることが確かめられる。

次に、CHF検出方法であるが、神戸商船大学での実験で用いたブリッジ式検出方法は、いずれの場所で限界状態が発生した場合にも、確実に検出できる長所があるが、局所的な小さな温度の振動は測定されない。今回利用した局所温度の測定による検出は、限界状態が局所的に発生して伝播していく場合には、正確に限界状態の発生時期を検出できない可能性があるので測定された温度のみから限界状態の発生状況を把握できない。このことが、測定された限界熱流束の低下率のばらつきがやや大きいことと関係している可能性がある。しかし、この方法でも動揺時のヒータ表面温度の一時的な上昇等は観察され、動揺時に限界熱流束が低下する現象は確認された。今後、限界状態の発生時期を正確に検出し、局所的なヒータ表面温度を測定するためには両方法を併用するべきである。

(2) 船用炉運転圧力を模擬した実験

R-113を用いて、改良船用炉の運転圧力を模擬した実験を行った。低クオリティ域およびサブクール沸騰域での限界熱流束の低下は、見かけの重力加速度の低下が巨大気泡の生成、すなわち気泡流からスラグ流へのフローパターンの遷移を促進し、このことが熱流束の低下をもたらす⁵⁾と考えられている。スラグ流における蒸気スラグ下液膜のドライアウトによる限界状態の発生機構は比較的、低圧で、サブクール度、質量流速が低いときに起こるとされていることから、圧力が船用炉の運転圧力程度に高い状態を模擬した場合について実験を行った。実験の結果は、R-113を用いた1.47MPaの実験でも、0.5MPaでの実験と同程度に限界熱流束が低下することが示された。今回の実験では、圧力と温度条件の制限から実験部を観察することができなかったが、限界熱流束の低下の様子がほぼ同じであったことから、1.47MPaの実験でも神戸商船大学での実験で観察された流動状態と似ていたと考えられる。

(3) 今後の課題

加速度変動が、限界熱流束の低下に与える影響を整理する場合に、神戸商船大学および船舶技術研究所の動揺台で与えられる加速度振幅条件では、基本周波数での付加加速度振幅で整理すれば、良い結果が得られることがわかったが、加速度変動としてどの程度に低い周波数の変動が限界熱流束に影響を与えるかは明確にされていない。このことは、限界熱流束の低下の機構と密接に関連している。

船用炉の運転圧力に相当する実験でも、動揺によって限界熱流束が低下し、その低下割合は(1.1)式の保守的相関式が適用できることが確認された。ただし、この式の適用範囲は、 $(0 \leq a/g \leq 0.5)$ であり、今後の改良船用炉の設計条件¹⁰⁾を満たしていない。また、加速度振幅の大きな領域では低下率を過大に評価することが予測される。

従って、上下加速度変動に起因する限界熱流束の低下現象を解明し、今後の船用炉への適用を考えた場合には以下のような課題がある。

- ①限界熱流束の低下を引き起こす加速度変動の周波数の上限を把握する。あわせて、加速度変動が限界熱流束の低下の原因と考えられる気泡の巨大化を促進する物理的な過程を把握する。

見かけの重力加速度が減少した時に、気泡が大きくなる現象はすでに確認されている⁸⁾が、限界熱流束の低下の物理的な過程は十分に解明されていない。今回の実験においても、基本周波数域(0.2Hz程度)の加速度変動が限界熱流束を低下させることが確認できたにとどまる。

- ②加速度振幅範囲を拡大した実験を行い、改良船用炉の設計条件を適用範囲に含めた相関式を求める。

今回の実験を含めて従来の実験自体が、改良船用炉の設計条件に対してかなり小さな付加加速度範囲でしか行われていない。このことは、原子力第1船「むつ」の設計条件において設定された上下加速度が0.6gと、改良船用炉の設計条件0.85gに比べて小さいことに関連していると思われる。さらに、今回使用した神戸商船大学および船舶技術研究所の動揺台は「むつ」設計時代に製作されたもので、製作当時から比べても付加できる加速度が制限され、改良船用炉の設計条件である上下加速度を満足する実験は行えなかった。今後の安全審査対応を考慮して、十分な加速度変動条件下での実験が期待される。

- ③より実機を正確に模擬して水を用いた実験、実験部を燃料バンドル体系とした実験等を行う。

今回の実験では、水とR-113の相似則を適用して、船用炉の運転圧力、流量を模擬した。形状及び入口サブクール度も船用炉運転状態の近傍にあり、船用炉炉心の運転状態をほぼ模擬している。このような運転条件下においても、限界熱流束が上下方向最低加速度の1/4乗に比例して低下する大辻等の式(付加加速度<0.5g)が適用できることを明らかにした。上下方向加速度変動が限界熱流束の低下をもたらすメカニズムは明確にされていないが、プール沸騰についてのZuberら¹¹⁾の理論的研究Siegel¹²⁾による実験的研究、強制対流沸騰についてのBergel'son¹³⁾の研究、Shah¹⁴⁾の実験的研究の結果もまた、限界熱流束が上下方向最低加速度の(1/4)乗に比例することを示唆しているので水においても同様の限界熱流束の低下が観察されることが予想される。しかし、これらの検討はSiegelの研究を除いて導出にあたって実際に重力加速度を変化させた実験に基づいていない。また、流体間の相似則は、強制沸騰熱伝達において実際的な問題では重力が限界熱流束に及ぼす影響は無視できると仮定して導出されており、加速度が変動する場を想定して得られたものではない。今後の安全審査では、燃料及び集合体形状を正確に模擬した実験データに基づく評価が要求される可能性があるため、この要求に耐える実験データの蓄積が期待される。

表 3.1 静止時及び動揺時の限界熱流束 (0.5 MPa)

実験番号	静止時		動揺時		比較		熱流束比
	サグケル度	流量	サグケル度	流量	最大加速度	基本加速度	
5001	25.63	991.4	273.80	1007.7	0.014	0.017	0.973
5002	25.10	1002.7	268.70	997.2	0.011	0.011	0.967
5003	25.99	988.3	277.30	1002.2	0.014	0.020	0.980
5004	24.84	997.0	271.57	999.4	0.017	0.019	0.965
5005	24.67	995.5	270.93	999.0	0.018	0.022	1.002
5006	24.25	995.3	273.80	1001.1	0.018	0.020	0.997
5007	24.69	998.9	272.52	997.0	0.017	0.029	1.016
5008	24.80	1001.7	273.16	988.5	0.017	0.023	0.990
5009	25.15	989.3	276.98	983.6	0.020	0.026	0.983
5010	24.70	1001.3	275.71	1000.7	0.019	0.020	0.986
5011	24.90	995.9	273.80	989.7	0.018	0.020	0.974
5012	25.29	987.9	274.75	980.3	0.019	0.024	0.984
5013	25.05	994.3	279.21	1000.6	0.020	0.023	1.001
5014	25.06	999.0	275.71	995.2	0.018	0.018	0.977
5015	25.12	1003.7	279.21	997.2	0.020	0.020	0.987
5016	25.03	998.7	279.85	995.0	0.022	0.020	0.968
5017	24.97	996.4	282.08	993.7	0.024	0.024	0.986
5018	25.11	1003.5	275.71	994.2	0.017	0.011	0.968
5019	25.16	996.0	283.67	995.4	0.018	0.017	0.970
5020	25.26	999.1	276.98	995.9	0.018	0.019	0.993
5021	24.87	1004.2	279.21	998.6	0.021	0.018	0.979
5022	25.18	1002.0	277.94	1000.0	0.017	0.014	0.970
5023	24.93	1011.1	278.89	998.4	0.016	0.012	0.959
5024	24.99	1012.2	281.76	997.4	0.020	0.019	0.984
5025	24.94	1000.4	283.67	1002.6	0.023	0.016	0.982
5026	24.92	1007.5	283.67	996.6	0.024	0.013	0.955
5027	25.13	1005.5	276.28	991.6	0.011	0.024	0.999
5028	25.18	1003.0	273.77	1007.0	0.015	0.010	0.992
5029	25.23	995.9	278.70	993.9	0.016	0.019	0.988
5030	25.18	999.8	277.91	996.6	0.016	0.011	0.968
平均	25.04	999.25	276.91	996.54	0.018	0.019	
標準偏差	0.32	5.94	2.90	7.85	0.001	0.004	

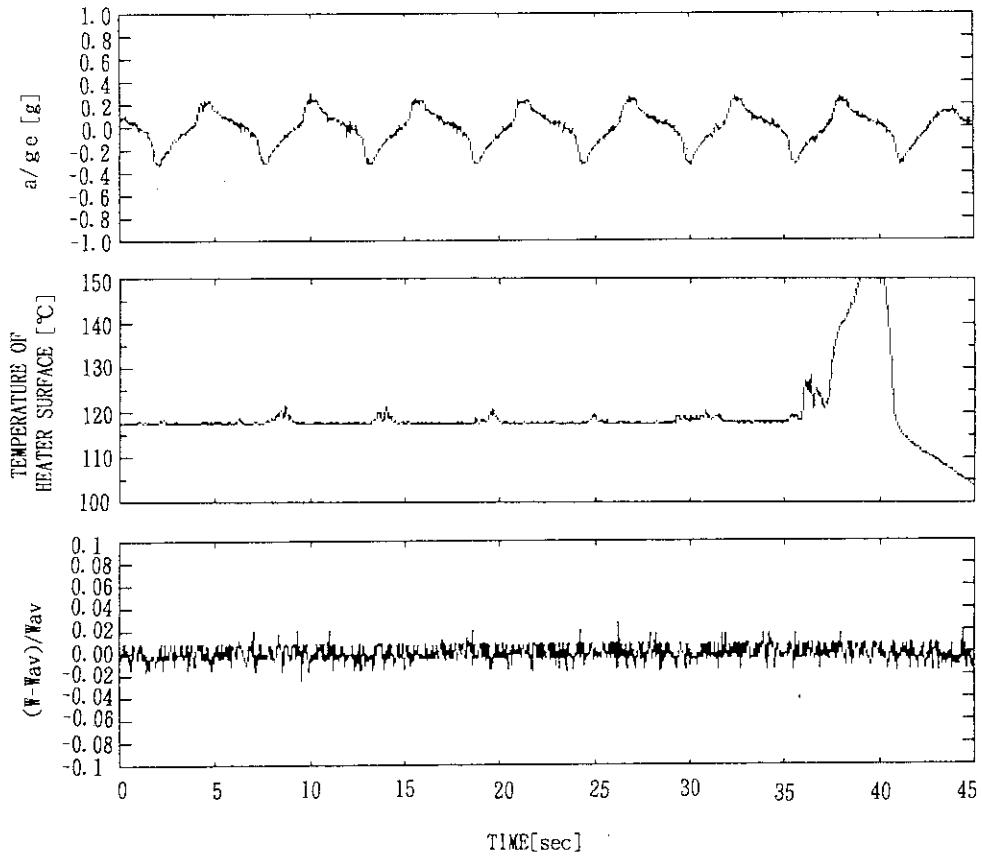


図 3.1 加速度，ヒータ表面温度，流量変動の測定結果（0.5 MPa, 0.2 g）

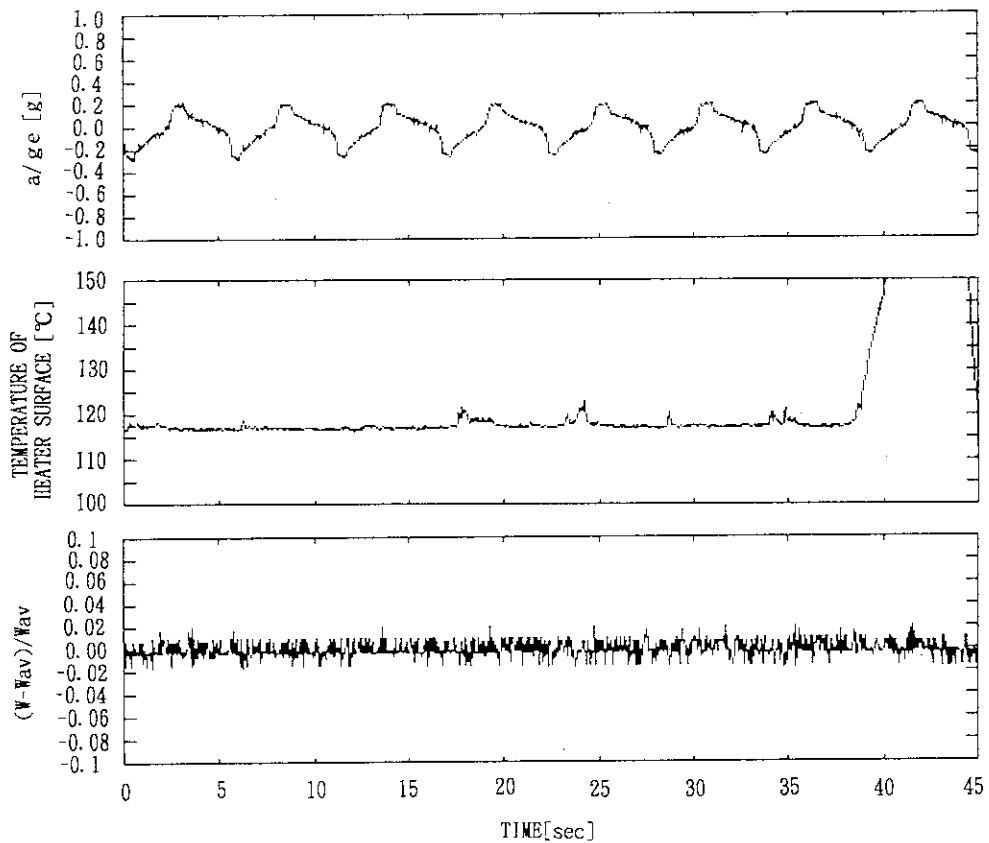


図 3.2 加速度，ヒータ表面温度，流量変動の測定結果（0.5 MPa, 0.16g）

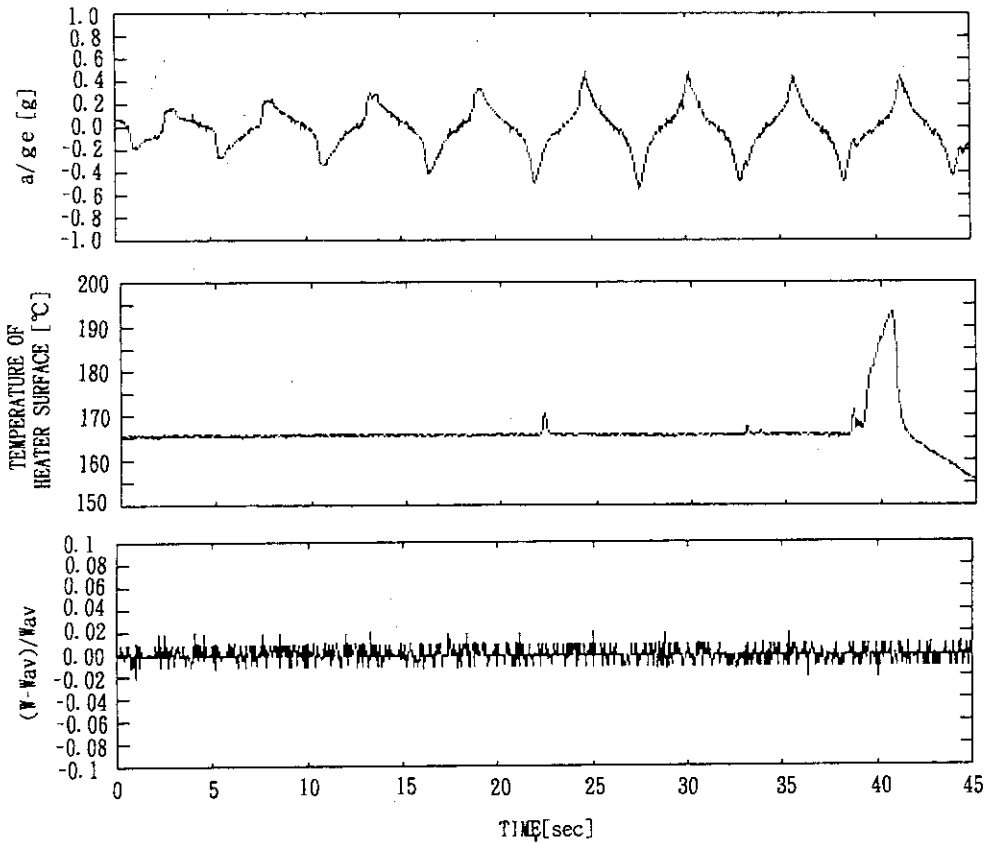


図 3.3 加速度, ヒータ表面温度, 流量変動の測定結果 (1.47 MPa, 0.27 g)

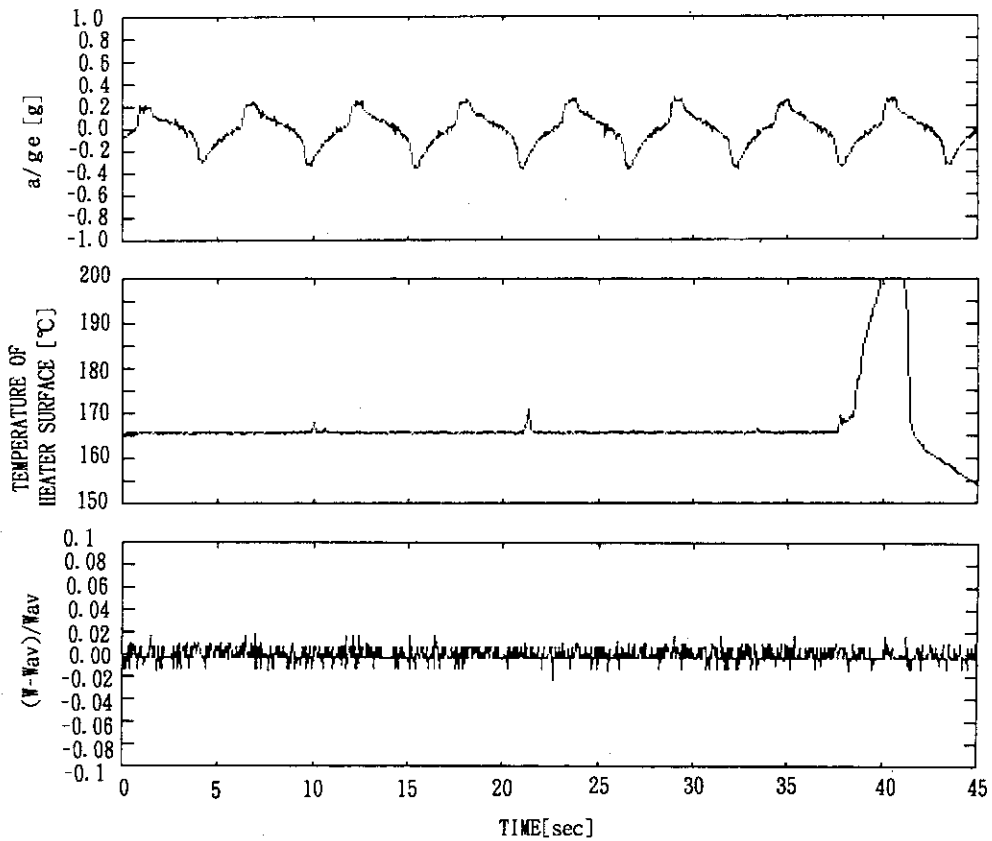


図 3.4 加速度, ヒータ表面温度, 流量変動の測定結果 (1.47 MPa, 0.21 g)

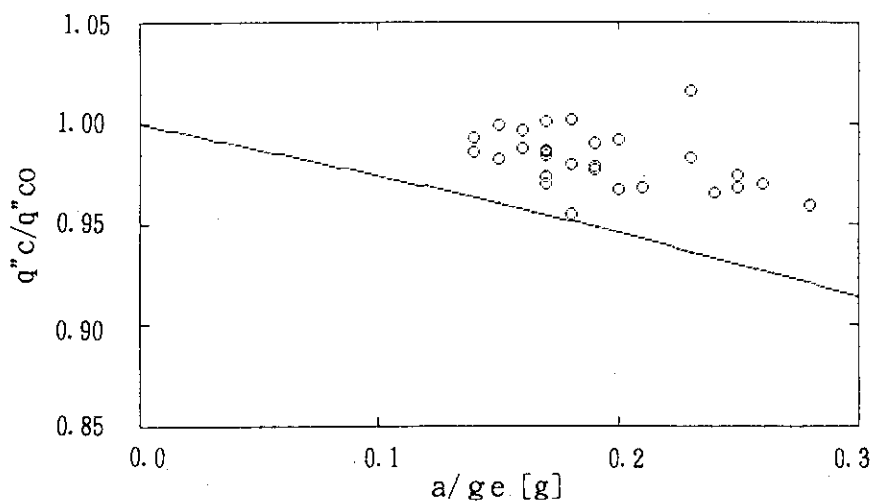


図 3.5 静止時と動揺時の限界熱流束の比 (0.5 MPa)

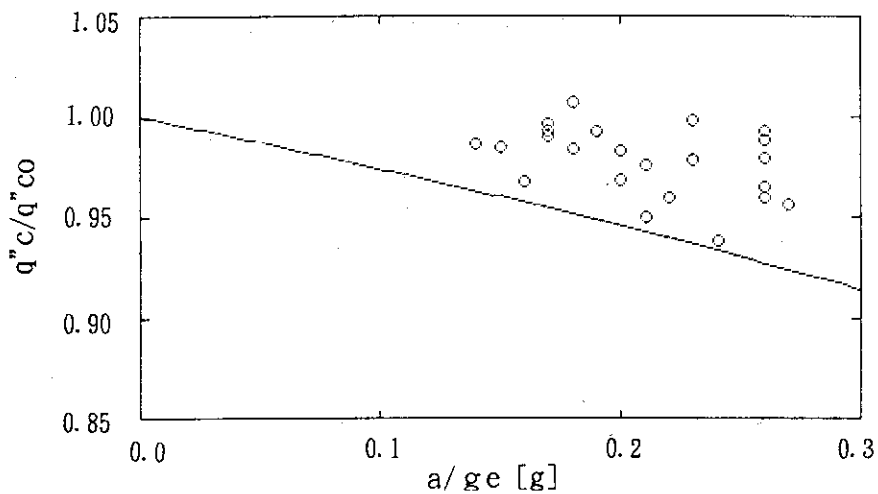


図 3.6 静止時と動揺時の限界熱流束の比 (1.47a)

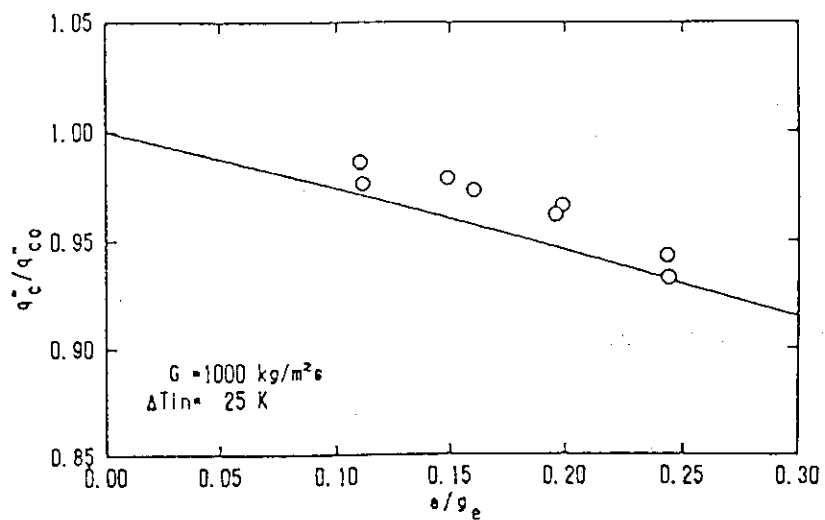


図 3.7 静止時と動揺時の限界熱流束の比 (0.5 MPa, 神戸商船大学での実験)

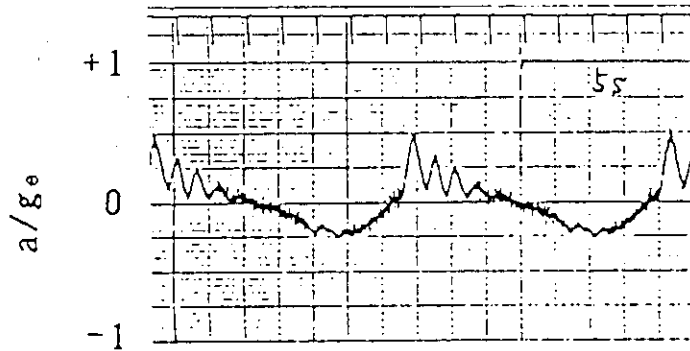


図 3.8 実測加速度 (神戸商船大学の動揺装置)

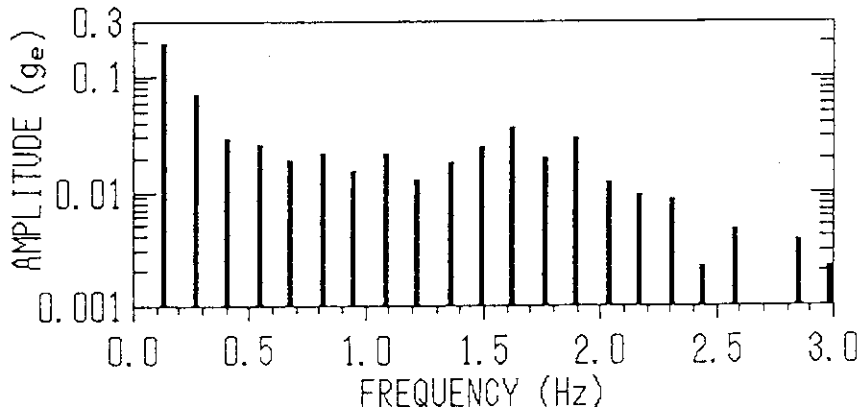


図 3.9 加速度振幅スペクトル (神戸商船大学の動揺装置)

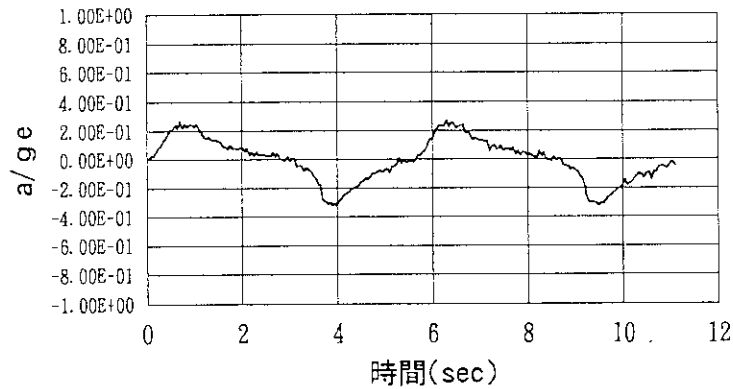


図 3.10 実測加速度 (船舶技術研究所の動揺装置)

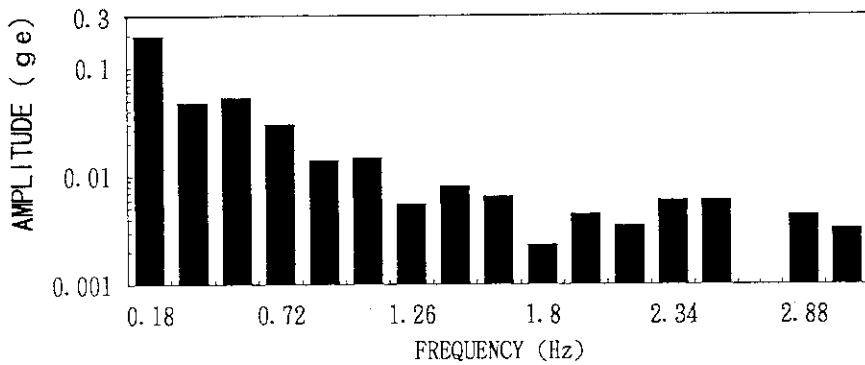


図 3.11 加速度振幅スペクトル (船舶技術研究所の動揺装置)

4. 結 論

圧力0.5MPa及び1.47MPaのもとで、二重管流路におけるR-113の強制対流垂直上昇流について、上下方向加速度変動による限界熱流束の低下率を実験により測定した。圧力0.5MPaの実験結果については、神戸商船大学で実施した実験結果⁷⁾と比較した。圧力1.47MPaの実験は、R-113を用いた改良船用炉の運転圧力模擬実験として実施した。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- ①異なった動揺装置を用いた0.5MPaの実験結果は、基本周波数での付加加速度の振幅で整理した場合に、限界熱流束の低下傾向が一致する。
- ②実機の運転圧力に相当する高圧条件でも、加速度振幅の増大と共に限界熱流束は低下する。静止時限界熱流束に対する動揺時限界熱流束の比は見かけの重量加速度の最低値 $(1-a/ge)$ の1/4乗に比例するという相関式で保守的に表現することができる。ここで、 a は基本周波数での付加加速度振幅、 ge は重力加速度である。

実際の船用炉への適用にあたっては、さらに、加速度振幅を大きくし、燃料バンドル体系の実験部による、水を用いた実験が行われることが望ましい。その実験にあたって、今回の実験が参考になることを期待する。

参 考 文 献

- 1) R. Siegel, "Effects of reduced gravity on heat transfer", Advances in Heat Transfer Vol. 4(1967)143
- 2) J. B. Woodward, "Natural circulation experiments in an oscillating force field", Ph. D. Thesis, Univ. of Michigan, Ann Arbor(1965)
- 3) 一色、村山、塚原、和田、川俣、山口、御手洗、横村、堀田 「舶用水冷却原子炉の熱限界と流力特性に及ぼすヒービング、傾斜の影響とその対策」、船舶技術研究所報告 Vol. 2 No. 1 (1965)
- 4) 手嶋 登、山口 勝治、「上下動揺時の二相流動特性の測定—上下動揺実験装置による実験結果—」、船舶技術研究所報告 第15巻第5号 (1978)
- 5) 大辻友雄、「限界熱流束におよぼす加速度変動の影響に関する研究」、東京大学学位論文 (1982)
- 6) 楠剛、伊藤泰義、横村武宣、大辻友雄、黒沢昭 「加速度変動時の限界熱流束に関する実験(その1) (加速度変動がサブクール沸騰域の気泡の挙動に及ぼす影響 第1報: 実験装置及び予備実験)」、JAERI-M 86-087 (1986)
- 7) 楠剛、横村武宣、大辻友雄、黒沢昭 「加速度変動時の限界熱流束に関する実験(その1) (加速度変動がサブクール沸騰域の気泡の挙動に及ぼす影響 第2報: 静止時及び動揺時の気泡挙動)」、JAERI-M 88-244 (1988)
- 8) 楠剛、大辻友雄、井川博雅、黒沢昭、岩堀宏治、横村武宣「加速度変動時の限界熱流束に関する実験(その2) (加速度変動時の限界熱流束の測定: 第1報)」、JAERI-M 89-216 (1989)
- 9) S. Y. Ahmad, "Fluid to Fluid Modeling of Critical Heat Flux: A Compensated Distortion Model", Atomic Energy of Canada Limited, Report No. AECL-3663(1971)
- 10) 原子力船研究開発室 「改良舶用炉MR Xの概念設計」、JAERI-M 91-004 (1991)
- 11) N. Zuber, "Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer", AEC Report No. AECU-4439(1959)
- 12) R. Siegel, "Effects of reduced gravity on heat transfer", Advanced in Heat Transfer Vol. 4(1967)143
- 13) B. R. Bergel'son, "Burnout under conditions of subcooled boiling and forced convection", Thermal Eng. 27(1)(1980)48
- 14) M. M. Shah, "A generalized graphical method for predicting CHF in uniformly heated vertical tubes", Int. J. Heat Mass Transfer 22(1979)557