

JAERI-Research

JP0250510

2002-018



低減速スペクトル炉開発のための
稠密格子体系 PWR 壓力条件での限界熱流束実験

2002年10月

新谷 文將^{*}・中塚 亨・頬経 勉・吳田 昌俊
吉田 啓之・石川 信行・佐藤 隆・渡辺 博典
大久保 努・岩村 公道・秋本 肇

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002
編集兼発行 日本原子力研究所

低減速スペクトル炉開発のための 稠密格子体系 PWR 圧力条件での限界熱流束実験

日本原子力研究所エネルギーシステム研究部

新谷 文将*・中塚 亨・頼経 勉・吳田 昌俊・吉田 啓之・石川 信行・佐藤 隆
渡辺 博典・大久保 努・岩村 公道・秋本 肇

(2002年8月23日受理)

原研エネルギーシステム研究部では、プルトニウムの有効利用を図るため、硬い中性子エネルギースペクトルを有する低減速スペクトル炉の設計研究を実施している。現在の設計は、燃料棒間ギャップ幅が1mm程度の狭間隙の炉心を対象に実施している。このため、除熱能力の低下が懸念され、熱的余裕即ち限界熱流束の評価は成立性評価上重要な項目の一つとなっている。しかし、これまでのところ、ギャップ幅1mm程度の炉心に対する公開された限界熱流束データは存在しない。そこで、限界熱流束評価のための基礎データを取得すると共に限界熱流束評価手法の適用性を検討するため、ヒータピン7本バンドル、ギャップ幅1.5、1.0及び0.6mm、PWR圧力条件での基礎実験を実施した。本報は、実験に用いた実験装置と実験条件及び取得した実験データの分析結果、更に設計に用いるPWR炉心の限界熱流束評価手法の適用性の評価結果についての報告である。

実験の結果、質量流束及びサブクール度が大きいほど、限界熱流束は大きくなることが分かった。また、質量流束が $2,000\text{kg/m}^2/\text{s}$ 程度より小さな領域では、ギャップ幅が狭いほど限界熱流束は小さな値を示したが、質量流束の大きい領域では、データのばらつきによりギャップ幅に関する明確な傾向は得られなかった。CHF発生時の断面平均熱平衡クオリティはギャップ幅1.0及び0.6mmのケースにおいては0.3~0.8と高い値を示し、1.5mmのケースでは0.1~0.3の範囲であった。高クオリティ域でのCHFの発生、発熱密度が低い位置でのCHFの発生等の実験結果から、液膜ドライアウト型のCHFが含まれている可能性が示唆された。CHFに関するKfK相関式を組み込んだサブチャンネル解析コードCOBRA-IV-Iによる限界熱流束評価手法を実験解析に適用した結果、解析で得られる限界熱流束は実験値より10%から60%低い値であった。このことから、本解析手法により、対象とした狭いギャップ幅の体系に対して、限界熱流束を大きな余裕を持って評価できることが分かった。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

*安全性試験研究センター

CHF Experiments of Tight Pitch Lattice Rod Bundles under PWR Pressure Condition for
Development of Reduced Moderation Water Reactor

Fumimasa ARAYA*, Toru NAKATSUKA, Tsutomu YORITSUNE, Masatoshi KURETA,
Hiroyuki YOSHIDA, Nobuyuki ISHIKAWA, Takashi SATO, Hironori WATANABE,
Tsutomu OKUBO, Takamichi IWAMURA and Hajime AKIMOTO

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 23, 2002)

In order to improve plutonium utilization, design studies of reduced moderation water reactors which have hard neutron energy spectrum have been carried out at Division of Energy System Research of Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). At present, triangle, tight pitch lattice cores with about 1 mm gap width between fuel rods have been focused in the neutronic core design. Since a degradation of the heat removal from the fuel rods is worried, an evaluation of heat removal capability i.e. critical heat flux becomes one of important evaluation items in the feasibility study. However, any of published data base, which can be applicable to the evaluation on such narrow gap width cores, does not exist. Therefore, in the present study, in order to accumulate applicable data and to confirm applicability of an evaluation methodology of critical heat flux, basic experiments on the critical heat flux were performed using the test sections consisted of 7 heater rods bundles with the gap widths of 1.5, 1.0 and 0.6 mm under the PWR pressure conditions. The present report describes the experimental apparatus, experimental conditions and accumulated data. Analysis results of the data and the applicability of the evaluation methodology used for the design work are also discussed in this report.

As the results of the experiment, it was found that the critical heat flux increased as the mass flux and the inlet subcooling increased. In the region of the mass flux less than about 2,000 kg/m²/s, the critical heat flux decreased as the gap width decreased. In the larger mass flux region, obvious trend of effects of the gap width on critical heat flux were not observed due to data scatterings. The flow-area-averaged thermal-equilibrium quality at

* Nuclear Safety Research Center

the CHF position was in the higher ranges from 0.3 to 0.8 in the cases of gap widths of 1.0 and 0.6 mm, and 0.1 to 0.3 in the 1.5 mm case. Based on the experimental results such that the CHFs occurred in the higher quality range and in the comparably lower axial heat flux region of the heater rod, it was implied that the film dryout type CHFs might be occurred in the experiments. The experiment analysis with the evaluation methodology of critical heat flux i.e. the subchannel analysis code COBRA-IV-I incorporated the KfK CHF correlation showed that the calculated critical heat fluxes were 10 to 60 % smaller than the experimental values. Based on the calculated results, it can be said that the present evaluation methodology can evaluate the critical heat flux with enough margin for the core configurations with narrow gap widths treated in the present study.

Keywords: Reduced Moderation Water Reactor, CHF, Basic Experiment, Tight Pitch Lattice, PWR Pressure Condition, Subchannel Analysis

This is a blank page.

目次

1. 緒言	1
2. 実験装置	2
2.1 ループ概要	2
2.2 スペーサ	3
2.3 フローシュラウド	3
2.4 ヒータピン	4
2.5 データ収録装置	4
3. 実験方法及びデータ分析手順	16
4. 実験条件	17
5. 実験結果及び考察	18
5.1 ギャップ幅 1.5mm のケース	18
5.2 ギャップ幅 1.0mm のケース	18
5.3 ギャップ幅 0.6mm のケース	19
5.4 考察	19
6. サブチャンネル解析コード COBRA-IV-I による実験解析	32
6.1 入力データ	32
6.2 解析結果	32
7. 結言	36
謝辞	36
参考文献	37

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus	2
2.1 Overview of Test Loop	2
2.2 Spacers	3
2.3 Flow Shroud	3
2.4 Heater Pins	4
2.5 Data Acquisition System	4
3. Experiment Execution and Data Analysis Procedures	16
4. Experimental Conditions	17
5. Experimental Results and Discussions	18
5.1 Case of Gap Width of 1.5 mm	18
5.2 Case of Gap Width of 1.0 mm	18
5.3 Case of Gap Width of 0.6mm	19
5.4 Discussions	19
6. Experimental Analysis with Subchannel Analysis Code COBRA-IV-I	32
6.1 Input Data	32
6.2 Calculated Results	32
7. Concluding Remarks	36
Acknowledgements	36
References	37

表リスト

表 1 収録データ一覧	5
-------------	---

図リスト

図 1 従来の稠密炉心 CHF データベース	2
図 2 実験装置鳥瞰図	7
図 3 実験装置流路回路網フロー図	8
図 4(a) スペーサ形状 (ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$)	9
図 4(b) スペーサ形状 (ギャップ幅 $g=1.0\text{mm}$)	10
図 4(c) スペーサ形状 (ギャップ幅 $g=0.6\text{mm}$)	11
図 5 フローシュラウド形状	12
図 6 ヒータピン形状	13
図 7 軸方向発熱分布	14
図 8 热電対設置位置	14
図 9 データ収録・制御システム装置構成図	15
図 10 局所限界熱流束の質量流束依存性 (ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$)	21
図 11 局所限界熱流束の入口サブクール度依存性 (ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$)	21
図 12 局所限界熱流束の質量流束依存性 (ギャップ幅 $g=1.0\text{mm}$)	22
図 13 局所限界熱流束の入口サブクール度依存性 (ギャップ幅 $g=1.0\text{mm}$)	22
図 14 局所限界熱流束の質量流束依存性 (ギャップ幅 $g=0.6\text{mm}$)	23
図 15 局所限界熱流束の入口サブクール度依存性 (ギャップ幅 $g=0.6\text{mm}$)	23
図 16(a) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 ($T_{in}=240^\circ\text{C}$)	24
図 16(b) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 ($T_{in}=260^\circ\text{C}$)	24
図 16(c) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 ($T_{in}=280^\circ\text{C}$)	25
図 16(d) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 ($T_{in}=300^\circ\text{C}$)	25
図 16(e) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 ($T_{in}=320^\circ\text{C}$)	26
図 16(f) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 (全入口温度ケース)	26
図 17(a) ヒータ表面温度挙動の例($g=1.5\text{mm}$, $T_{in}=280^\circ\text{C}$, $W=1,500\text{kg/h}$)	27
図 17(b) ヒータ表面温度挙動の例($g=1.5\text{mm}$, $T_{in}=280^\circ\text{C}$, $W=4,000\text{kg/h}$)	27
図 18(a) CHF 発生位置での断面平均熱平衡クオリティ ($g=1.5\text{mm}$)	28
図 18(b) CHF 発生位置での断面平均熱平衡クオリティ ($g=1.0\text{mm}$)	28
図 18(c) CHF 発生位置での断面平均熱平衡クオリティ ($g=0.6\text{mm}$)	29
図 19(a) 限界出力の質量流束依存性 ($g=1.5\text{mm}$)	29
図 19(b) 限界出力の質量流束依存性 ($g=1.0\text{mm}$)	30

図 19(c) 限界出力の質量流束依存性 ($g=0.6\text{mm}$)	3 0
図 19(d) 限界出力の質量流束依存性 (全ケース)	3 1
図 20 COBRA-IV-I による実験解析に用いたノーディングモデル	3 4
図 21 COBRA-IV-I による解析値の実験値に対する比 ECHFR	3 4
図 22 二相混合係数の ECHFR への影響	3 5

List of tables

Table 1 List of data recorded	5
-------------------------------	---

List of figures

Fig. 1 Existing data base of CHF	2
Fig. 2 Bird's eye view of test facility	7
Fig. 3 Flow diagram of piping line of test facility	8
Fig. 4(a) Configuration of spacer (gap width of 1.5 mm)	9
Fig. 4(b) Configuration of spacer (gap width of 1.0 mm)	10
Fig. 4(c) Configuration of spacer (gap width of 0.6 mm)	11
Fig. 5 Configuration of flow shroud	12
Fig. 6 Configuration of heater rod	13
Fig. 7 Axial power distribution	14
Fig. 8 Position of thermo-couples in heater rods	14
Fig. 9 Configuration of data acquisition system	15
Fig. 10 Mass flux dependency of local critical heat flux (gap width g=1.5mm)	21
Fig. 11 Inlet subcooling dependency of local critical heat flux (gap width g=1.5mm)	21
Fig. 12 Mass flux dependency of local critical heat flux (gap width g=1.0mm)	22
Fig. 13 Inlet subcooling dependency of local critical heat flux (gap width g=1.0mm)	22
Fig. 14 Mass flux dependency of local critical heat flux (gap width g=0.6mm)	23
Fig. 15 Inlet subcooling dependency of local critical heat flux (gap width g=0.6mm)	23
Fig. 16(a) Mass flux dependency of local critical heat flux of all gap width cases ($T_{in}=240^{\circ}\text{C}$)	24
Fig. 16(b) Mass flux dependency of local critical heat flux of all gap width cases ($T_{in}=260^{\circ}\text{C}$)	24
Fig. 16(c) Mass flux dependency of local critical heat flux of all gap width cases ($T_{in}=280^{\circ}\text{C}$)	25
Fig. 16(d) Mass flux dependency of local critical heat flux of all gap width cases ($T_{in}=300^{\circ}\text{C}$)	25

Fig. 16(e) Mass flux dependency of local critical heat flux of all gap width cases ($T_{in} = 320^\circ\text{C}$)	26
Fig. 16(f) Mass flux dependency of local critical heat flux of all gap width cases (all T_{in} cases)	26
Fig. 17(a) Example of heater surface temperature behaviour ($g=1.5\text{mm}$, $T_{in}=280^\circ\text{C}$, $W=1,500\text{kg/s}$)	27
Fig. 17(b) Example of heater surface temperature behaviour ($g=1.5\text{mm}$, $T_{in}=280^\circ\text{C}$, $W=4,000\text{kg/s}$)	27
Fig. 18(a) Flow-area-averaged equilibrium quality at CHF position (gap width $g=1.0\text{mm}$)	28
Fig. 18(b) Flow-area-averaged equilibrium quality at CHF position (gap width $g=1.0\text{mm}$)	28
Fig. 18(c) Flow-area-averaged equilibrium quality at CHF position (gap width $g=1.0\text{mm}$)	29
Fig. 19(a) Mass flux dependency of critical power (gap width $g=1.5\text{mm}$)	29
Fig. 19(b) Mass flux dependency of critical power (gap width $g=1.0\text{mm}$)	30
Fig. 19(c) Mass flux dependency of critical power (gap width $g=0.6\text{mm}$)	30
Fig. 19(d) Mass flux dependency of critical power (all gap widths cases)	31
Fig. 20 Noding model for experimental analysis with COBRA-IV-I code	34
Fig. 21 Ratios of calculated values by COBRA-IV-I to experimental values, ECHFR	34
Fig. 22 Effects of Two-Phase Mixing Coefficient on ECHFR	35

1. 緒言

軽水炉の長期利用が予想される状況から、原研ではウラン資源の有効利用を目指した低減速スペクトル炉の設計研究を実施している。低減速スペクトル炉は中性子エネルギーの高い炉心とするため、燃料棒間隔を狭める必要があり、熱的に厳しい条件にさらされることになる。このため、炉心の熱的余裕（限界熱流束）の評価は、成立性評価上重要な項目のひとつとなっている。しかし、これまでのところ、核設計で対象としている燃料棒間ギャップ幅 1 mm 程度の限界熱流束評価のための公開された実験データは存在していない。そこで、ギャップ幅 1mm 前後のデータを取得し、限界熱流束評価を行う際の基礎データを取得すると共に設計に用いる限界熱流束評価手法の適用性を検討することとした。炉心核設計は、PWR と BWR の両炉型に関して実施されているが、既存の実験装置を用いる関係上、大量の蒸気が発生する BWR 条件での実験へは対応できないことから、当初 PWR 圧力条件での実験を行い、続いて装置改造後 BWR 条件の実験を行うこととした。本報告では、これまでに実施した PWR を対象とした実験について述べる。

これまでに、公開されている稠密格子体系に対する限界熱流束実験を概観すると次のようである。即ち、BAPL(Bettice Atomic Power Laboratory)¹⁾⁻³⁾での稠密体系の実験、動力炉核燃料開発事業団（現核燃料サイクル開発機構：JNC）での ATR を対象とした実験⁴⁾、BWR 産業界で実施した高転換 BWR を対象とした限界出力実験^{5),6)}及び原研で実施した高転換 PWR 研究における実験^{7),8)}のデータがこれまでに公開されている。各機関のデータの内容を概観すると以下のようである。即ち、より狭いギャップ幅までカバーしている BAPL での実験はギャップ幅 0.38 mm まで実施されているが、このギャップ幅の実験は本研究で対象とするグリッド型スペーサとタイプの異なる突起状スペーサ（Warts）で行われたものであり、低減速スペクトル炉の評価用データとしては使用できない。一方、JNC のデータは、ギャップ幅が 2.1mm から 0.6mm までのものを含んでいますが、ATR を想定した実験である事から、圧力条件が 7MPa と BWR 相当の低いものである。BWR 産業界で実施した実験は、ギャップ幅 2mm から 3mm とやや広いものである。更に、最近低減速スペクトル炉の設計で対象とするギャップ幅 1.3mm のものも実施されているが⁶⁾、詳細な情報は公開されていない。このデータに関しては、今後の BWR 型炉の設計検討に直接適用できる情報として有用であるが、今回対象としている PWR 条件とは圧力条件が異なっている。最後に、原研の実験は、高転換軽水炉の研究時に実施されたものであることから、圧力条件は一致しているものもあるが、1990 年当時の設計は現在のギャップ幅より広い 1.9mm 以上の準稠密炉心を対象としたものである。以上述べた実験の条件を、燃料棒ギャップ幅と水力等価直径について、PWR 条件でのデータをまとめて示すと図 1 のようである。ここから分るように、これらの実験は、かなり広い範囲で実施されているようであるが、低減速スペクトル炉の核設計で対象としており、今回の実験で想定している、ギャップ幅 1mm 程度の公開されたデータは存在していない。

以上のように、これまでに実施された実験のデータベースを見ると、現在設計が進行中の低減速スペクトル PWR 炉心のギャップ幅 1.0mm 程度の限界熱流束評価には不充分なものとなっている。そこで、燃料棒間ギャップ幅 1.5mm 及び 1.0mm、0.6mm の基礎実験を実施し、評価の基礎データを取得することとした。本報は、平成 10 年度及び 11 年度、12 年度に実施したギャッ

幅 1.5mm、1.0mm、0.6mm のケースについて、実験に用いた装置仕様及び実験条件、取得したデータの分析結果及び低減速スペクトル炉の PWR 炉心熱設計に用いる限界熱流束評価手法 (KfK CHF 相関式を組み込んだサブチャンネル解析コード COBRA-IV-I) の適用性評価のための実験解析の結果を報告するものである。

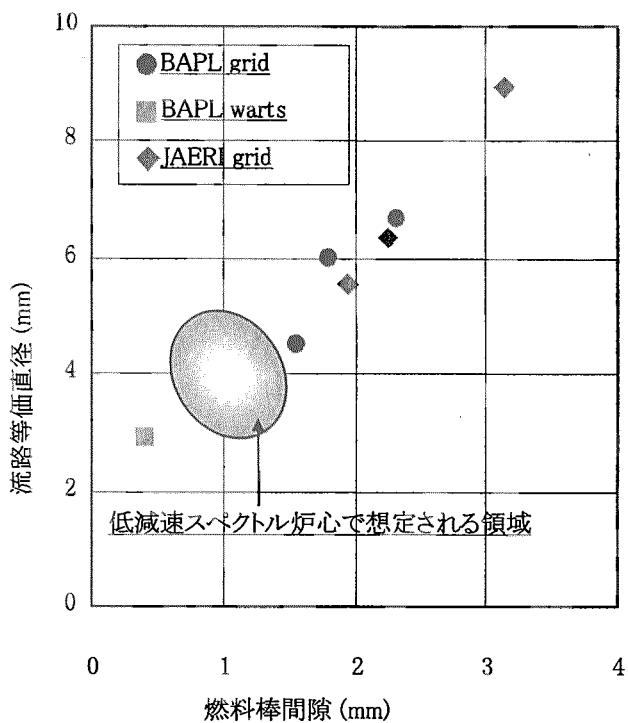


図 1 従来の稠密炉心 CHF データベース

2. 実験装置

2.1 ループ概要

実験に用いた装置は、PWR の圧力及び温度条件等を模擬可能な既存の熱流動テストループである高圧小型水ループである。本装置主要部の鳥瞰図を図 2 に、流路網フロー図を図 3 に示す。本実験では本既存ループを用い、流路を形成するフローシュラウドとヒータピンを所定の位置関係に固定するスペーサのみを、新たに製作して実施した。高圧小型水ループの主要諸元を以下に記す。

最高使用圧力 : 16.0 MPa

最高使用温度 : 350°C

ポンプ揚程 : 180mH₂O

ヒータ本数 : 7 本

ヒータ電力供給能力 : 1.1MW (周辺ヒータ 6 本 = 1MW、中心ヒータ 1 本 = 100kW)

本装置は、定常限界熱流束実験の流動条件として、圧力、流量、テスト部入口温度を自由に設

定できるように作られている。即ち、圧力は、圧力制御タンクのヒータとスプレイにより、流量は循環ポンプの回転数と流量調整弁の開度により、テスト部入口温度は余熱ヒータと冷却器とこれをバイパスするバイパス弁の調整により設定可能である。圧力及びテスト部入口温度は手動運転と共に自動運転の機能も備わっている。ヒータピンの加熱量は手動で変更する。

また、本装置は定常実験と共に流量及びヒータ加熱量を計算機で制御可能な過渡実験も可能である。これらの制御能力は次の通りである。

流量制御能力：75%/s（ポンプ回転数制御による流量減少時初期値に対する割合）

加熱量変動制御能力：75%/s（初期値に対する割合）

2.2 スペーサ

本実験で用いたスペーサ形状を、ギャップ幅 1.5mm, 1.0mm, 0.6mm に対応して図 4(a)～(c)に示す。これらは、本実験のために新たに製作したもので、核設計と同様にハニカム型グリッドタイプのスペーサとした。

スペーサはヒータピンを所望の位置に固定するグリッドと、これを保持し、流路を形成するフローシュラウドに固定するためのブロックより構成される。グリッドは、厚さ 0.3mm の SUS316 製六角セルユニット 7 個から構成される。このグリッド部は、流路軸方向厚さ 20mm、平径 45mm の SUS316 製四角形ブロックで保持される。このような構造のスペーサは、フローシュラウドに流路軸方向に 300mm 間隔で 7 個設置される。ブロックに開けられた流路外壁の形状は、中心ピンの周りにできるヒータ 1 本当たりの等価的な正六角形の単位流路を 7 個つなぎ合わせてできる外周壁で構成するものとした。

本スペーサは、グリッド部にディンプルを設ける事により、ヒータピンを六角形グリッドの幾何中心に保持できるように、その位置決めを行っている。組み立て後のディンプルに内接する円の中心間隔の誤差は ±0.02mm 程度で、最大でも ±0.05mm の誤差範囲に収まっている。

2.3 フローシュラウド

フローシュラウドは、流路外壁形状を形成すると共に、スペーサを保持する役割を持っている。本実験で用いたフローシュラウドを図 5 に示す。フローシュラウドの流路形状はスペーサ部流路の外壁と同一の輪郭と共に、周辺ヒータとシュラウド壁で形成する流路の水力等価直径を中心部流路と同一に設定することにより、流路壁の影響を極力低減する設定とした。このため、シュラウド壁は、対応するスペーサ流路外壁より 1mm 程度（ヒータピン間ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$ の場合 1.33mm, $g=1.0\text{mm}$ の場合 1.0mm, $g=0.6\text{mm}$ の場合 0.75mm）広がった流路となっている。

本実験においては、テスト部の組み立て及び流路壁寸法の精度向上を考慮して、本実験以前の実験で製作した、長尺の半割型フローシュラウドとは異なり、110mm と 190mm の単尺の SUS306 製円筒の中心部を流路形状に割り抜いた 13 個の部分品を製作し、これらを竹筒状につなぎ合わせることにより長尺のフローシュラウドを形成することとした。このためスペーサはフローシュラウドの部分品の繋ぎの間に設置することとした。

2.4 ヒータピン

ヒータピンは間接発熱方式で、線出力密度の最大値は 75kW/m である。その構造は、図 6 に示すように、中心コア部及び絶縁部には比較的熱伝導率の高い窒化ボロン(BN)を用い、そこにニクロム製(NCH-1)の発熱体を埋め込み、その周りをインコネル(NCF600)製のシース材で密閉した構造としたものである。ヒータピンは、図 4 及び図 5 に示される流路内に、7 本が三角配列で設置されている。これらのうち、中心の 1 本のヒータピンの発熱量を他のものより 20%（ヒータピン 7 本の平均出力に対する比（ピーピング係数）として 1.17）高く設定する事により、中心ピンで CHF が発生するような設定とした。実験に用いたヒータピンの軸方向発熱分布は、図 7 に示すようにピーピング係数 1.35 のチョップトコサイン分布である。

実験での CHF 発生の検出は、シース材内に埋め込んだ熱電対により計測するヒータ表面の温度の上昇を以って行っている。熱電対の設置位置を図 8 に示す。熱電対の設置個数は、CHF の発生が予想される中心ピンで 9 個、周辺ピンでは 4 個である。熱電対は、シース径 0.5mm のクロメル—アルメル非接地型熱電対である。

2.5 データ収録装置

データの収録は、図 9 に示すように、システムデザインサービス社製データ収録装置 DASBOX Model-1000 を用い、これをサンマイクロシステム社製ワークステーション SUN Spark Station-20 により制御することにより行っている。本システムでは、データ収録と同時に、装置の制御を行う機能を備えており、データ収録可能チャンネル数は 128、制御用チャンネル数は 16 である。データ収録の周波数 (10kHz 以下) 及び計測時間はワークステーション上に移植した制御プログラムにより変更可能である。AD 及び DA 変換機の変換分解能は 16 ビット（ギャップ幅 1.5mm の実験では 12 ビットのものを使用）である。

本実験で収録しているデータのリストを表 1 に示す。実際の実験中の収録では、収録周波数 10Hz として、CHF の発生が予想されるヒータ出力に到達する少し前から手動で収録を開始し、CHF 検出器による CHF 発生の確認の後、手動で収録を停止することとした。収録データ量が多過ぎないように、収録時間を最大 10 分間に設定し、これを超えても CHF の発生に至らなかった場合には、再度収録をやり直す事にした。

表 1 収録データ一覧

チャ ンネ ル No.	名称	収録装 置タグ ID	入力 信号 種別	計測スパン	アンプ ゲイン	備考
1	周辺ヒータ温度(1.395m)	TE-S4	熱起電 力	0~500 °C	×100	L1-09-05
2	中心ヒータ温度(1.695m)	TA-4	"	"	"	H2-02-08
3	中心ヒータ温度(1.595m)	TA-8	"	"	"	H2-05-07
4	中心ヒータ温度(1.495m)	TA-10	"	"	"	H2-06-06
5	中心ヒータ温度(1.395m)	TB-1	"	"	"	H2-07-05
6	中心ヒータ温度(1.295m)	TF-2	"	"	"	H2-09-04
7	中心ヒータ温度(1.195m)	TA-5	"	"	"	H2-08-03
8	中心ヒータ温度(1.095m)	TA-9	"	"	"	H2-10-02
9	中心ヒータ温度(0.995m)	TS-1	"	"	"	H2-11-01
10	周辺ヒータ温度(1.695m)	TS-5	"	"	"	L1-05-08
11	流量計入口温度:TE-5	TS-6	"	"	"	
12	テスト部出口温度:TE-1	T-1	"	"	"	TI-1
13	下部プレナム水温:TE-7	T-7	"	"	"	TIC-1
14	中心ヒータ温度(EL=1.790m)	TA-1	"	"	"	H2-01-9
15~						
16	(not used)					
17	周辺ヒータ温度(EL=1.395m)		"	"	"	L2-03-05
18	周辺ヒータ温度(EL=1.790m)	TS-12	"	"	"	L4-07-09
19	周辺ヒータ温度(EL=1.495m)	RS-13	"	"	"	L4-11-06
20	周辺ヒータ温度(EL=1.095m)	TS-14	"	"	"	L5-01-02
21	周辺ヒータ温度(EL=1.695m)		"	"	"	L6-05-08
22	(not used)					
23	周辺ヒータ温度(EL=1.295m)	TS-2	"	"	"	L2-07-04
24	周辺ヒータ温度(EL=1.595m)	TS-3	"	"	"	L3-05-07
25~						
32	(not used)					
33	試験体差圧:DP1-2	DPT-1-2	1~5V	-0.75~2.25 m	×1	計測区間: 115cm
34	試験体差圧:DP1-4	DPT-1-4	"	-10~30 m	"	計測区間: 531cm
35	試験体出口差圧:DP1-7	DPT-1-7	"	-17.5~52.5 m	"	計測区間: 122.6cm
36	(not used)					
37	水温換算流量	FT-1	"	0~6000 kg/h	"	
38	圧力制御タンク内圧力	PT-2	"	0~19.6 MPa	"	PIC-2
39	(not used)					
40	試験体入口差圧:DP1-6	DPT-1-6	"	-3.75~ 11.25 m	"	計測区間: 440.4cm

表1 収録データ一覧（続き）

41	試験体入口差圧:DP4-3	DPT-4-3	//	-3.75~ 11.25 m	//	計測区間: 430cm
42	圧力制御タンク内水位	LT-1	//	0~2.5 mH ₂ O	//	
43	試験体出口圧力	PT-1	//	0~19.6 MPa	//	PIC-1
44	主循環ポンプ大流量（差圧）	FT-L	//	0~5 mH ₂ O	//	FIC-1
45	主循環ポンプ小流量(差圧)	FT-S	//	0~5 mH ₂ O	//	FIC-1
46	周辺ヒータピン電力	P-P	0~5V	0~1000 kW	//	
47	中心ヒータピン電力	P-C	1~5V	0~138 kW	//	
48	中心ピン電流	AMP-C	//	0~600 A	//	
49	試験体差圧:DP1-1	DPT-1-1	//	-7.5~22.5 m	//	計測区間: 210cm
50	試験体差圧:DP1-3	DPT-1-3	//	-3.25~9.75 m	//	計測区間: 370cm
51	試験体差圧:DP1-5	DPT-1-5	//	-15~45 m	//	計測区間: 655.1cm
52~ 128	(not used)					

(註) 備考の記号 L1-xx-xx 及び H2-xx-xx 等は計測器 ID を表す。

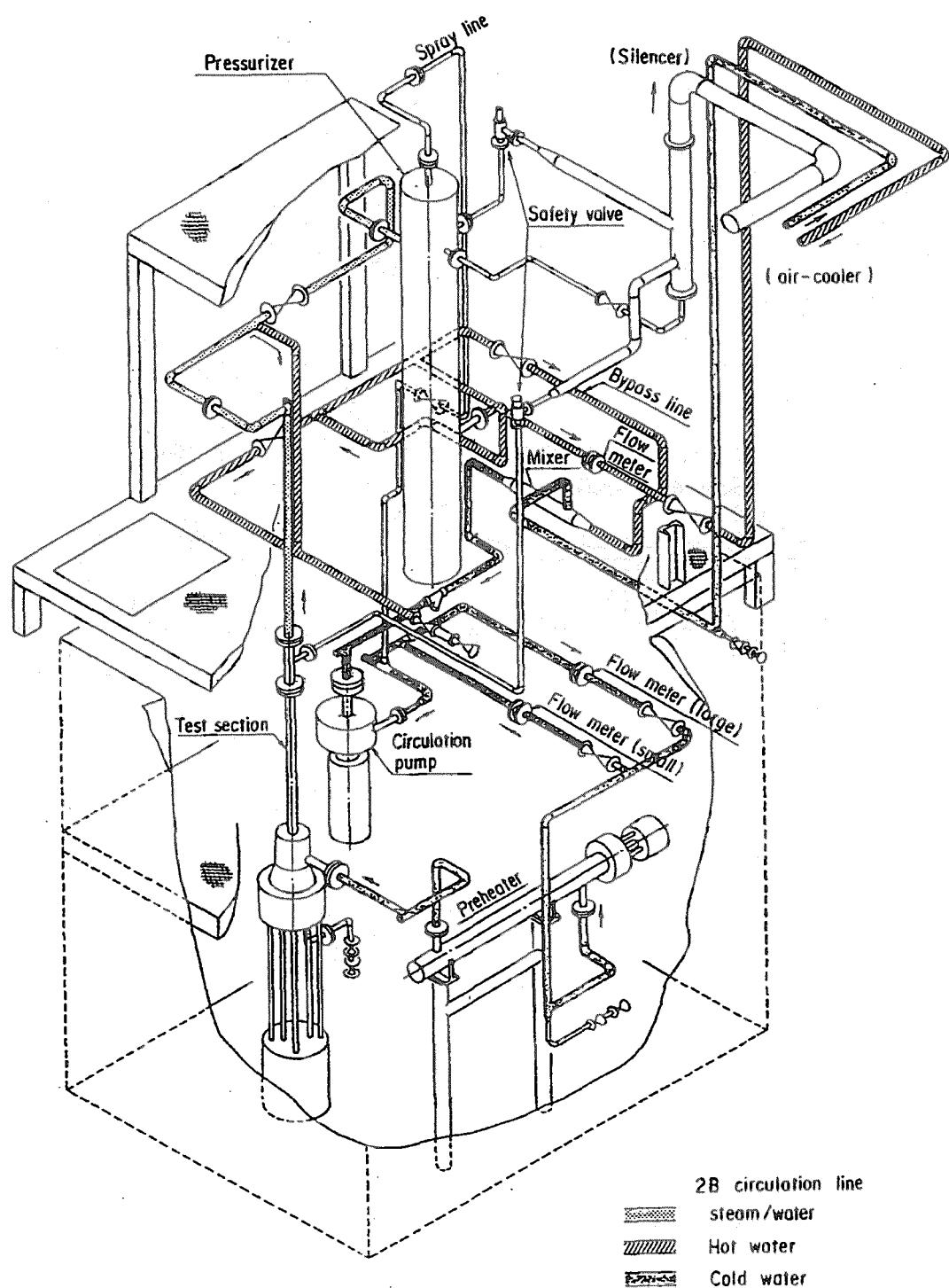


図2 実験装置鳥瞰図

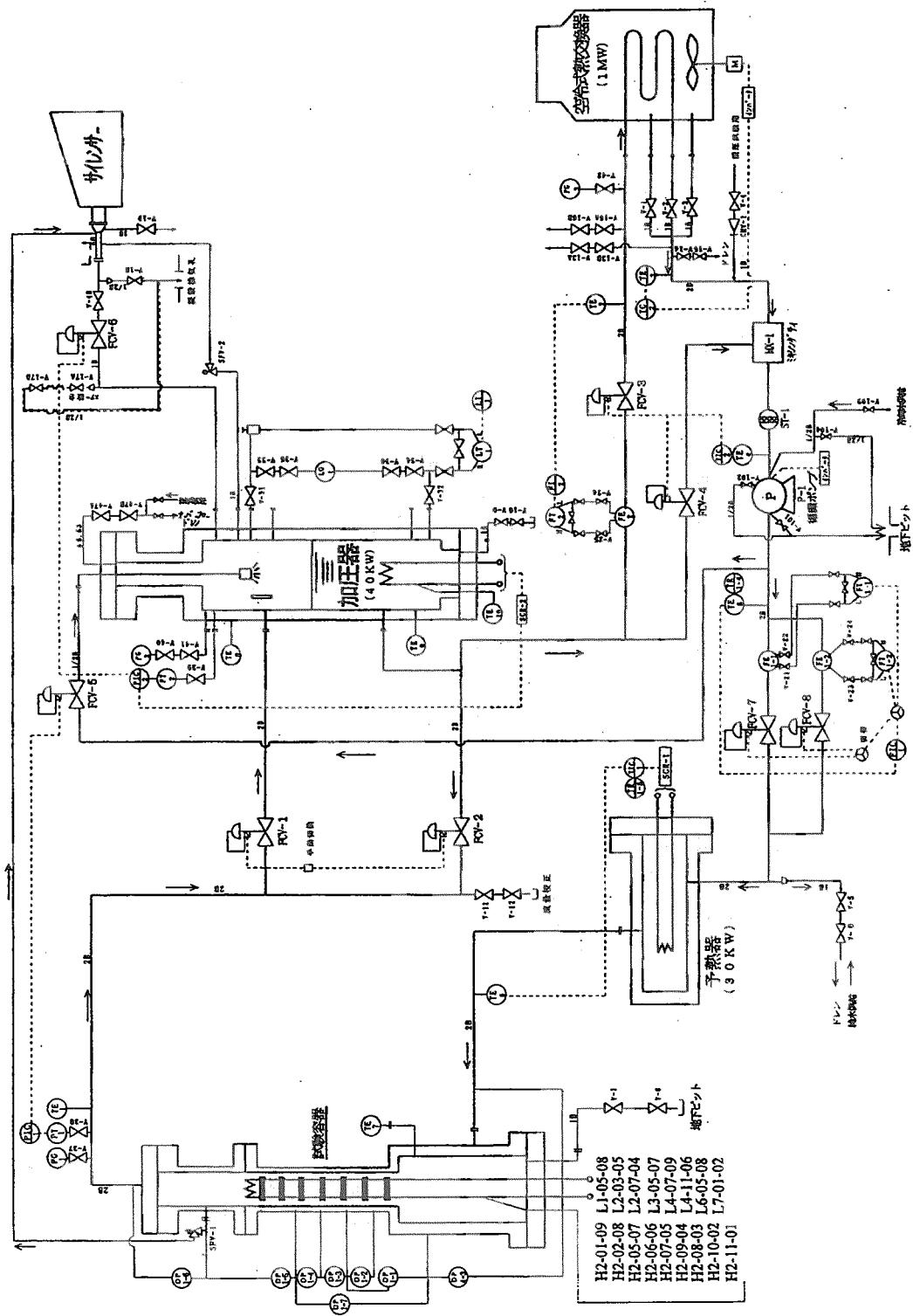
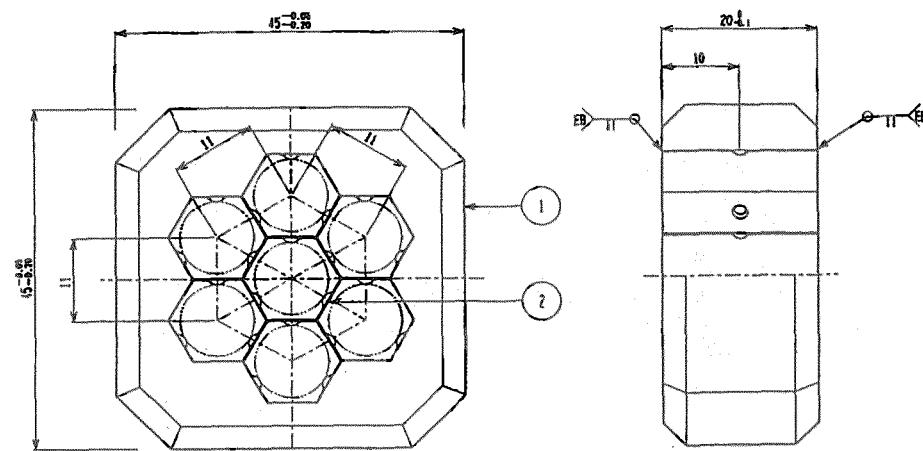
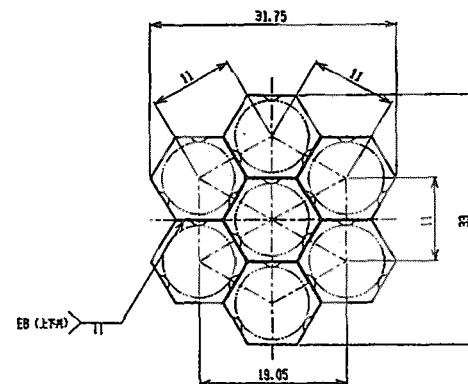


図3 実験装置流路回路網フロー図

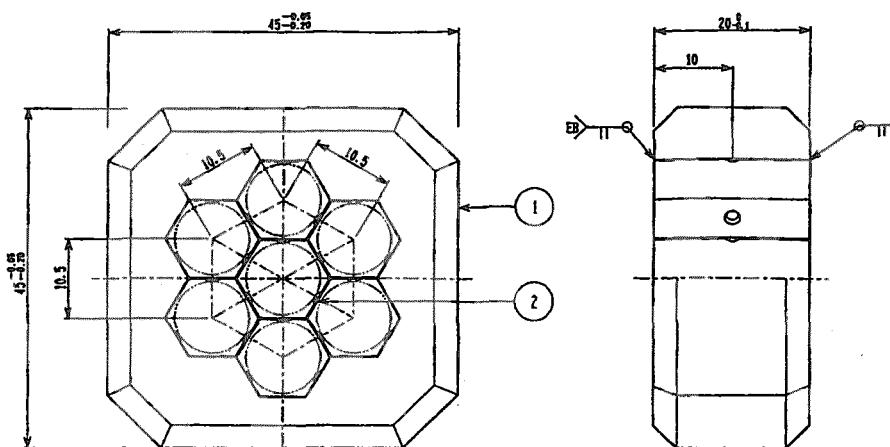


スペーサ全体

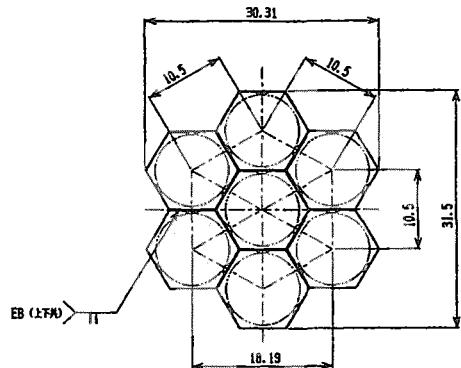


グリッド部詳細

図 4(a) スペーサ形状 (ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$)

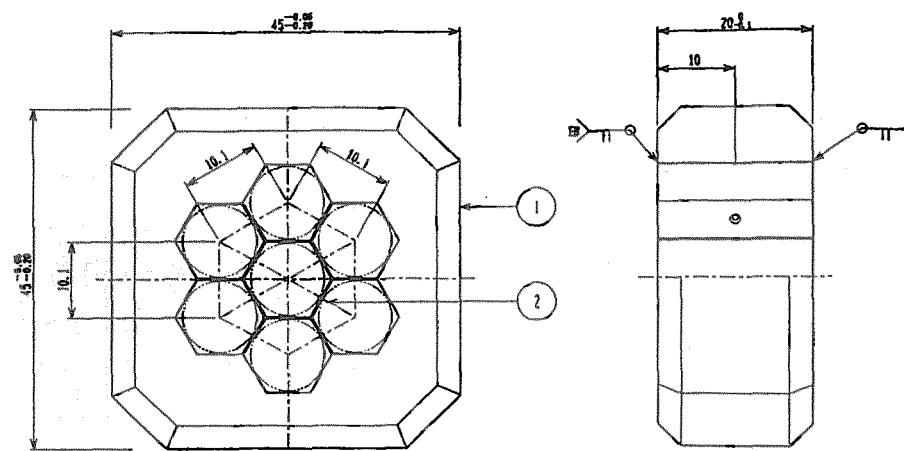


スペーサ全体

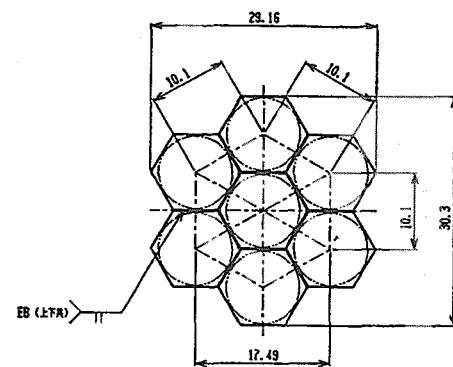


グリッド部詳細

図 4(b) スペーサ形状 (ギャップ幅 g=1.0mm)



スペーサ全体



グリッド部詳細

図4(c) スペーサ形状 (ギャップ幅 g=0.6mm)

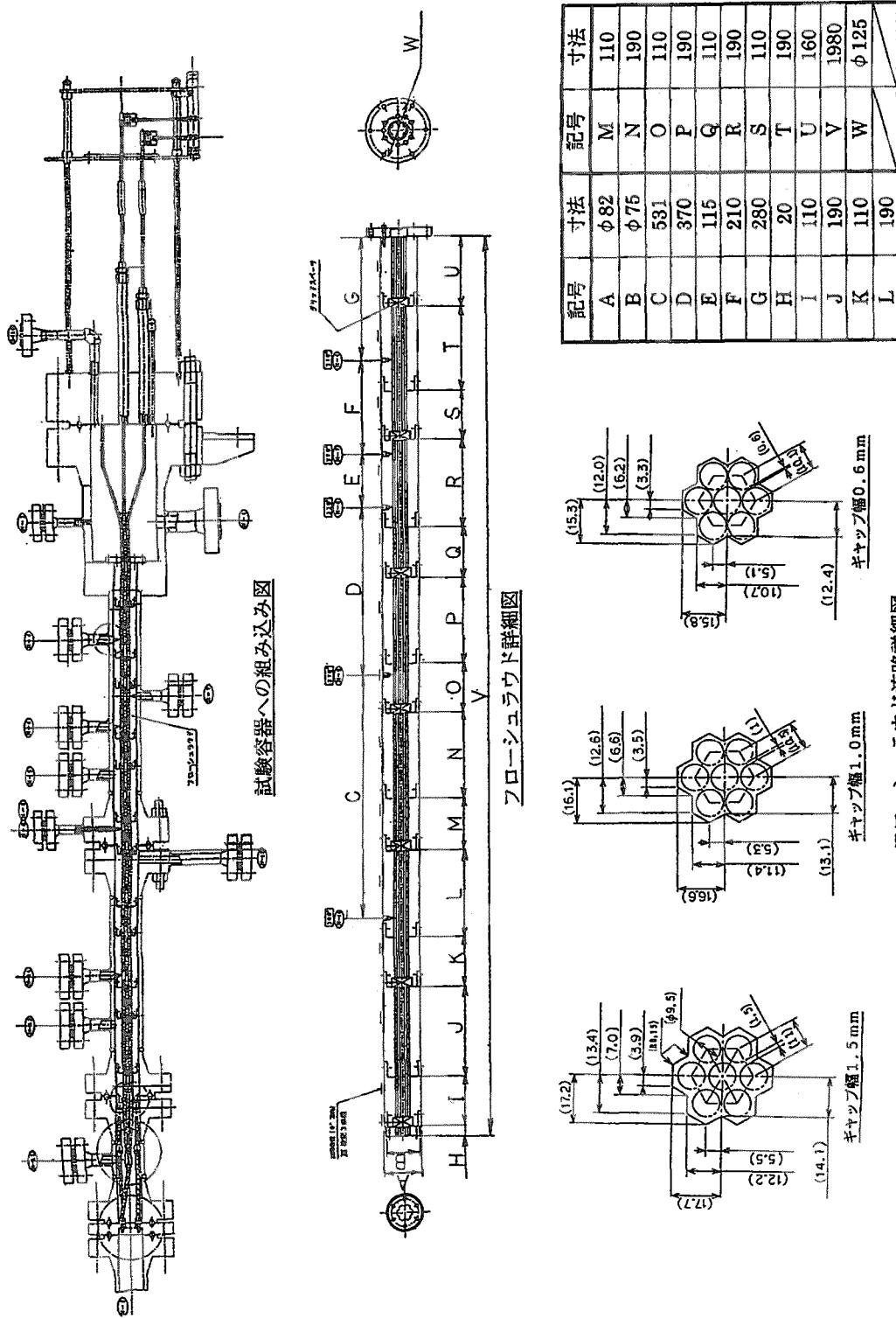


図 5 フローシュラウド形状

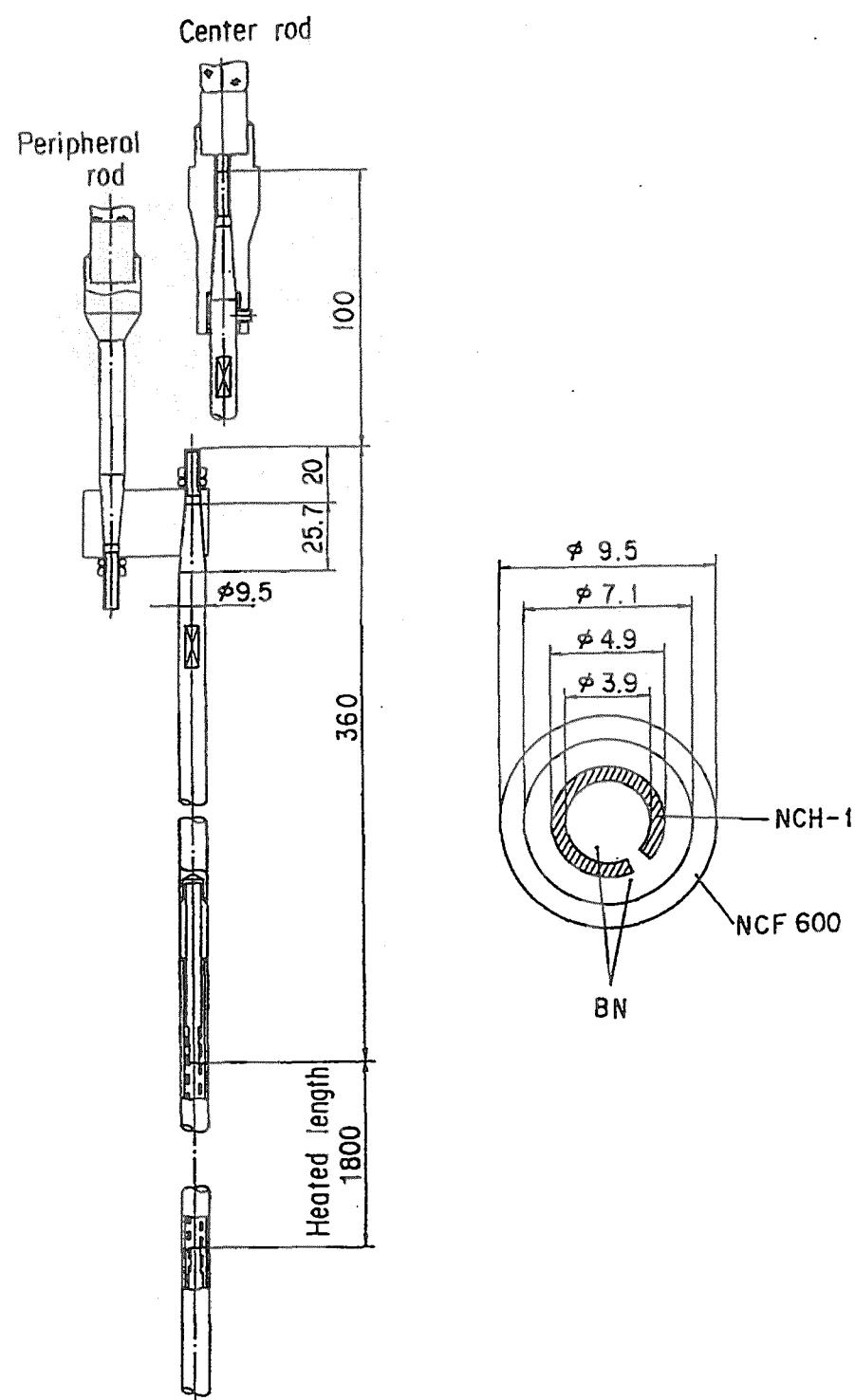


図6 ヒータピン形状

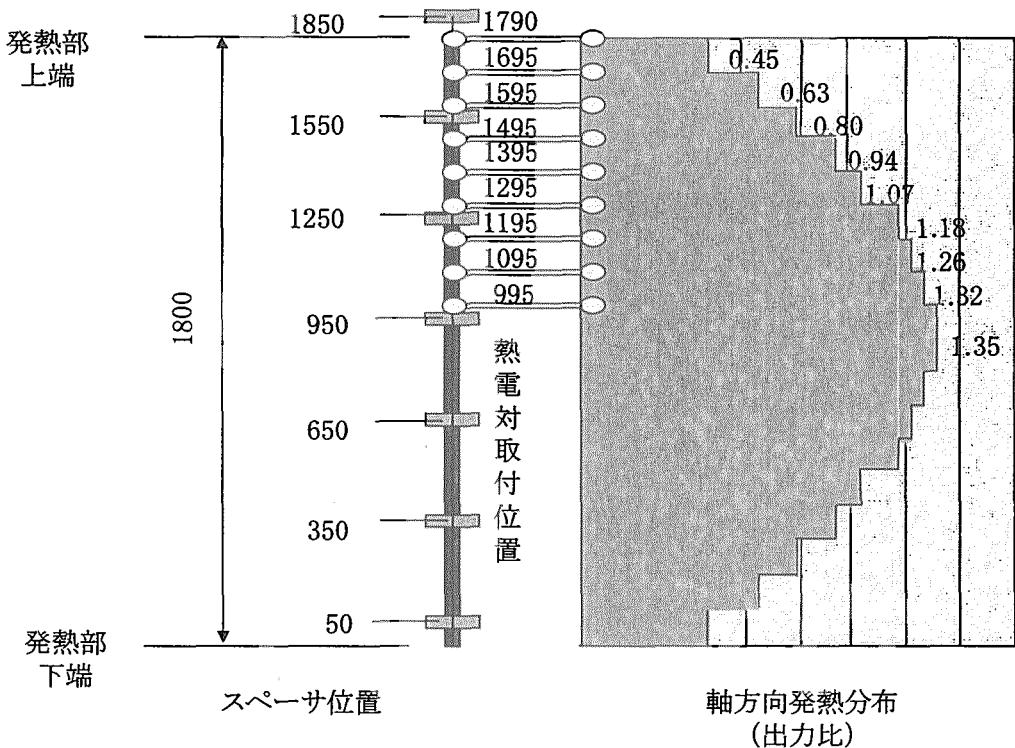


図 7 軸方向発熱分布

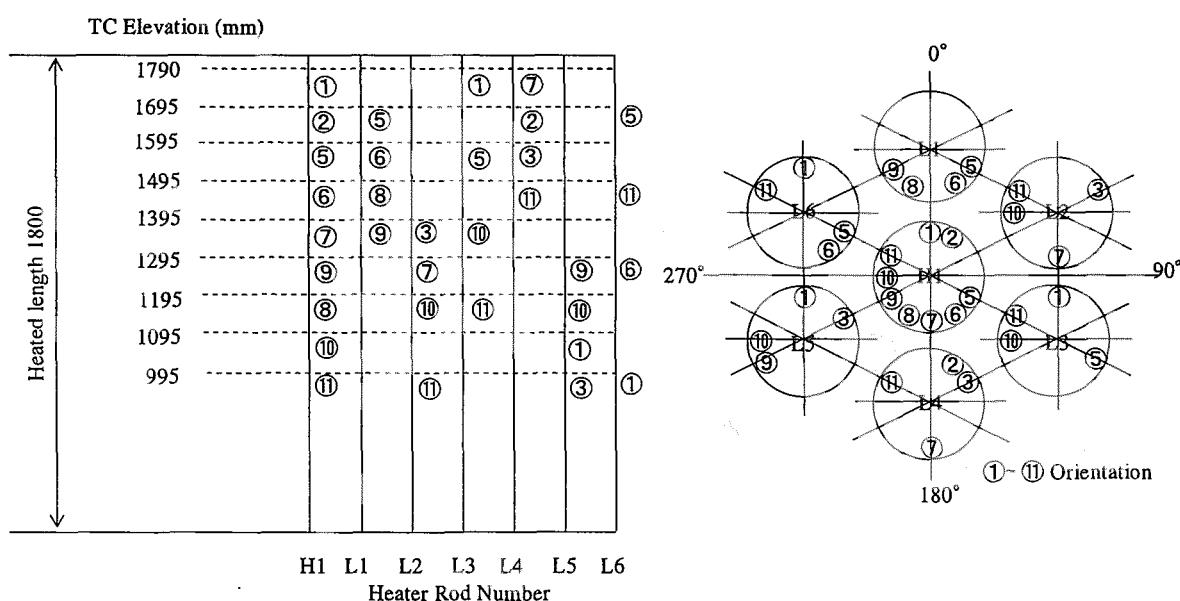


図 8 热電対設置位置

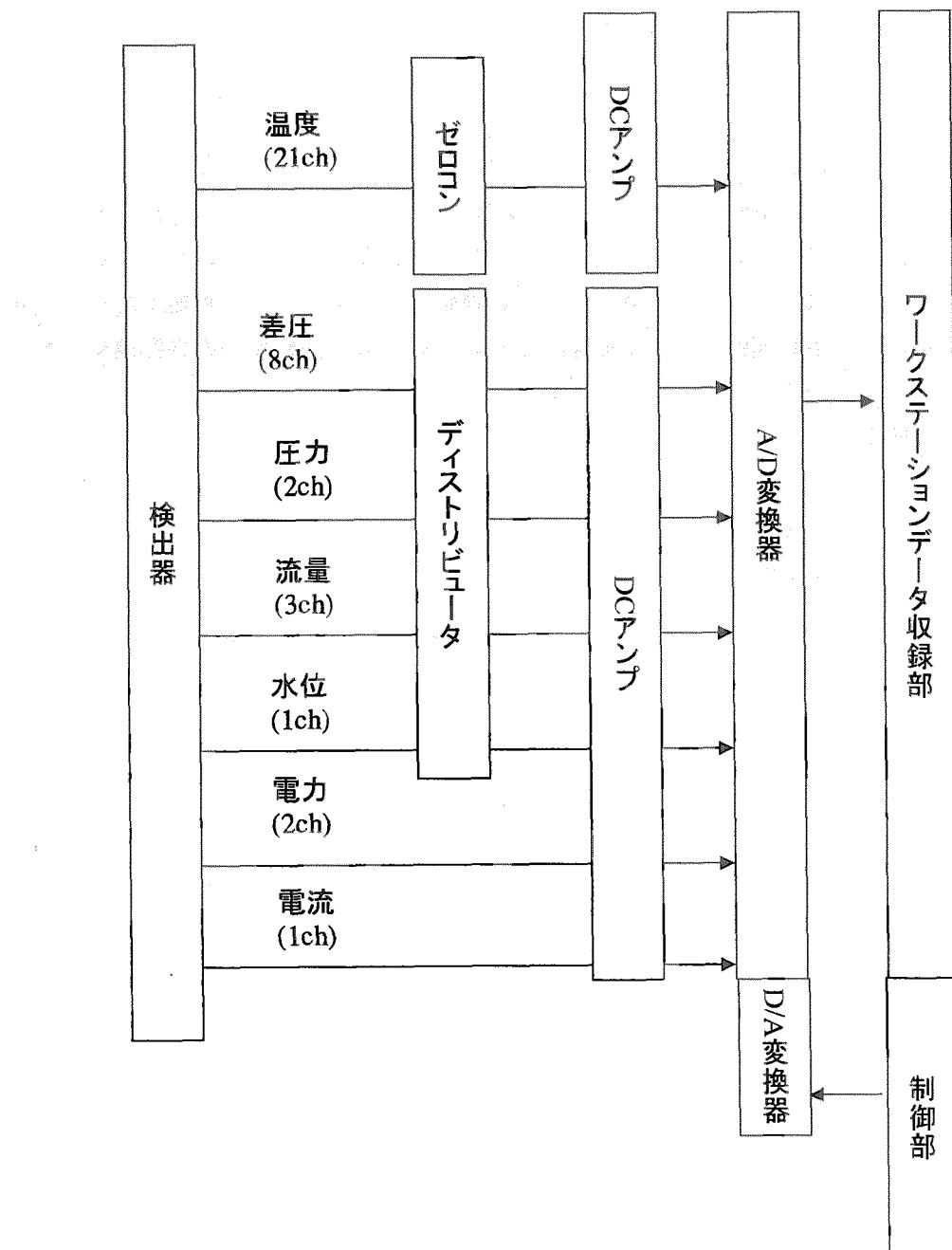


図9 データ収録・制御システム装置構成図

3. 実験方法及びデータ分析手順

実験の実施及びデータの分析は以下の手順で実施した。

(1) 実験条件の設定

所望の実験条件（圧力、流量、テスト部入口温度）の設定は、加圧器ヒータ及びスプレイ、循環ポンプ、与熱器及び冷却器により行う。圧力は実験条件設定時及び実験中ともに自動運転機能により調整することとした。流量は、循環ポンプ回転数により設定するが、この際必要になる流量の計測には、設置されている大流量計と小流量計の内、小流量計を可能な限り用いることとした。テスト部入口温度の調整には、本装置では、手動運転と自動運転ともに可能であるが、調整の早さから実験中は全て手動運転とし、実験条件設定のための昇温運転中のみ自動運転とした。

(2) CHF データの取得

CHF データの取得実験は以下の手順で行った。

- ・実験条件（圧力、流量、温度）を上記(1)の手順により設定する。
- ・実験条件が整ったら、制御盤のテスト部ヒータピンの加熱量を粗調整するボタンを手動で操作し、緩やかに上昇させる。1回の操作で全加熱量が約 10kW 増加する。
- ・CHF の発生予想加熱量に近づいたら（前回の実験で得られた CHF 発生時加熱量より 30kw 程度低い加熱量に到達したら）、ワークステーション上のデータ収録プログラムによるデータ収録を開始する。
- ・加熱量を微細調整ボタンにより緩やかに手動で上昇させ、CHF 検出器が作動し、加熱が自動停止するまで、この操作を継続する。1回の操作で全加熱量が約 1.2kW 増加する。
- ・CHF 検出器が作動し、加熱を停止したら、データ収録プログラムによる収録を停止し、実験を終了する。

(3) 収録データの分析

収録した実験データは、以下の手順で物理データに変換し、これをグラフ化して、データの分析に用いる。

- ・収録したデータは、計測器からの信号をデジタル変換した生の形（一次データ）で保存されている。これを、各チャンネル毎に変換式により物理量に変換する必要がある。現在は、この操作を一次データと同一ファイル上に記述された変換係数を用いて物理量に換算したデータをテキスト形式でディスク上に書き出し、これを表計算プログラム(EXCEL 等)により加工し、グラフ化した。
- ・CHF の発生場所及び時刻は、得られたグラフ及びテキストファイル上から、ヒータ表面温度の上昇が最も早かった熱電対チャンネルを選択する事により決定した。
- ・得られた CHF 発生位置及び時刻から、ヒータピン発熱量を決定し、それを基に、局所限界熱流束を求めた。また、その時点のテスト部入口条件データ（流量、圧力、温度）を CHF 発生時の入口条件として以後のデータの分析に用いた。

4. 実験条件

実験条件の範囲は、実験装置を用いて、圧力 16MPa 条件下で実現可能な CHF 発生条件を包絡するように設定した。即ち、本実験では中心ヒータピンの発熱分布に基づくホッテストポイントが最大線出力密度の設計値 75kW/m に制限されることにより決まる発熱量までの加熱を行い、この発熱量で CHF の発生を実現できる流量の最大値まで流量を増加させた。従って、下記の流量上限値より多くの流量を供給する条件では、本装置では CHF を発生させる事はできない。また、流量条件の下限値は、本装置で安定的に供給可能な流量の下限値に設定したものである。本装置では、ポンプの特性から約 800kg/h 以下になると安定的に流量を供給できなくなるため、本実験では、この流量よりやや大きめの 1,000kg/h 程度を流量下限値として設定した。

入口温度に関しては、サブルール度約 100K 以下の条件とした。これは、炉心核設計では炉心入口サブクール度が約 60K であることから、これを包絡していると共に、これ以上大きなサブクール度では、前述のヒータ線出力密度の設計制限値以内での加熱量では CHF を実現できないためである。サブクール度の下限値は約 24K(テスト部入口温度で 593K (320°C))とした。これは、本装置で安定的に運転可能な下限値となっている。即ち、本装置ではポンプの下流に位置する予熱器の加熱容量が小さいため、テスト部入口温度を高くするためには、ポンプを通過する水の温度を高くする必要が生じ、ポンプの NPSH によって、テスト部入口サブクール度を小さくできなくなるためである。

以下に本実験で実施した実験条件を記す。

・ギャップ幅 1.5mm の条件

圧力 : 158.1 kg/cm² (15.5MPa)

流量 : 1,500, 2,000, 3,000, 3,500, 4,000, 5,000, 6,000 kg/h

(1,102, 1,469, 2,204, 2,571, 2,939, 3,674, 4,408 kg/m²/s)

テスト部入口温度 : 240, 260 280 300, 320 °C

(513, 533, 553, 573, 593 K)

・ギャップ幅 1.0mm の条件

圧力 : 158.1 kg/cm² (15.5MPa)

流量 : 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, 3,000 kg/h

(1,035, 1,552, 2,069, 2,586, 3,104 kg/m²/s)

テスト部入口温度 : 240, 260 280 300, 320 °C

(513, 533, 553, 573, 593 K)

・ギャップ幅 0.6mm の条件

圧力 : 158.1 kg/cm² (15.5MPa)

流量 : 900, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 kg/h

(1,381, 1,535, 2,023, 3,069, 3,837 kg/m²/s)

テスト部入口温度 : 240, 260 280 300, 320 °C

(513, 533, 553, 573, 593 K)

5. 実験結果及び考察

5.1 ギャップ幅 1.5mm のケース

ギャップ幅 1.5mm の 112 ケースの実験結果を図 10 及び 11 に示す。図 10 は、テスト部入口温度をパラメータとした局所限界熱流束の質量流束依存性を示したものである。ここから、以下の傾向のあることがわかる。

- ・質量流束の増大と共に限界熱流束は増大する。
- ・質量流束が $2,000 \text{kg/m}^2/\text{s}$ 程度より小さい領域では、限界熱流束と質量流束には、比較的ばらつきが小さく線形の関係が見られる。
- ・質量流束が大きい領域ではデータのばらつきが見られ、線形性が崩れる。

図 11 は、質量流束をパラメータとして、限界熱流束のテスト部入口サブクール度依存性を示したものである。この図から以下の傾向を読み取ることができる。

- ・サブクール度の増大と共に限界熱流束は増大する。
- ・質量流束が小さい領域では、限界熱流束とサブクール度には線形の関係が見られる。

上記の質量流束の大きい領域で観測されたデータのばらつきの原因について見ると、以下のようにある。質量流束の小さい領域では、CHF の発生を示している熱電対が、ほとんどの実験点で発熱上端から上流側へふたつ目（発熱下端から 1,695mm の位置）であるのに対し、ばらつきの見られる領域では発熱上端から上流側へ 3 つ目及び 4 つ目の熱電対（発熱下端からそれぞれ 1,595mm 及び 1,495mm の位置）で発生する実験点が現れるようになる。このため、発熱分布から決まる局所熱流束はこの領域では上流側ほど大きいため、限界熱流束が大きくなり、線形性の崩れとともにばらつきとして現れたものである。

また、CHF が発生しているヒータピンの周方向位置の傾向については、同一軸方向位置に複数の熱電対が周方向に設置されてはいないので、正確な傾向を知ることはできないが、実験で得られている結果についてのみ記述すると、以下のようである。CHF は図 8 に示す中心ヒータピン H1 の②及び⑥の位置で多く発生している。これらの周方向位置は、広い流路に面している。これに対し、ヒータピンと隣り合わせの狭い流路に面している位置（図 8 中の中心ヒータピン H1 の⑤）での CHF の発生は少ない。H1 の⑤で CHF の発生が少ない理由として、その位置がグリッドスペーサ直上（下流側）であること（図 7 及び図 8 参照）も考えられる。一般に、グリッドスペーサの直上は、直下に比べて CHF が発生しにくいことが知られている。

5.2 ギャップ幅 1.0mm のケース

ギャップ幅 1.0mm の 240 ケースの実験結果を図 12 及び 13 に示す。図 12 は、テスト部入口温度をパラメータとした局所限界熱流束の質量流束依存性を示したものである。また、図 13 は、質量流束をパラメータとして、限界熱流束のテスト部入口サブクール度依存性を示したものである。これらの図から以下の傾向を読み取ることができる。

- ・1.5mm のケースと傾向は類似しており、線形性がより強く現れている。
- ・質量流束の増大と共に局所限界熱流束は線形的に増大する。
- ・サブクール度の増大と共に局所限界熱流束は線形的に増大する。

ギャップ幅 1.0mm のケースは 1.5mm のケースと比較すると、殆どのケースで CHF が発熱下

流端近傍（発熱上端近傍であり、下端から 1,790mm の位置）で発生している。このことから、1.5mm のケースに比べて局所限界熱流束のばらつきが少なくなっている。ただし、入口温度 320°C(593K)で、流量の大きなケースにおいて、若干データのばらつきが見えるが、これはギャップ幅 1.5mm のケースと同様に CHF の発生する位置が下流端より上流側で発生するケースが観測されたためである。また、CHF が発生する周方向位置の傾向は、殆どの場合発熱部下流端で、狭い流路に接する面（図 8 の中の中心ヒータピン H1 の①）であり、ギャップ幅 1.5mm の場合のように広い流路に面した熱電対で起こりやすいという傾向は必ずしも見られない。

5.3 ギャップ幅 0.6mm のケース

ギャップ幅 0.6mm の 255 ケースの実験結果を図 14 及び 15 に示す。図 14 は、テスト部入口温度をパラメータとした局所限界熱流束の質量流束依存性を示したものである。また、図 15 は、質量流束をパラメータとして、限界熱流束のテスト部入口サブクール度依存性を示したものである。これらの図から以下の傾向を読み取ることができる。

- ・両図の全体的な傾向は前述の他のふたつのギャップ幅 1.5mm と 1.0mm のケースと類似しているが、より 1.5mm のケースに近い。
- ・局所限界熱流束は質量流束の増加と共に増大する。
- ・CHF の発生する位置は質量流束が大きいほど、入口サブクール度が小さいほど上流側へ移る傾向が強い。この傾向は、1.0mm よりむしろ 1.5mm のケースに近いものとなっている。

CHF の発生するヒータピンの周方向位置は、流量の低い時には発熱部最上端で隣接するヒータピンと隣り合う狭い流路に面した位置（図 8 の中の中心ヒータピンの①）であるが、質量流束が増加するにつれて発熱部上端から 4 つ目（図 8 の中の中心ヒータピンの⑥）の広い流路に面した位置へ移る傾向が見られる。これらの間にある熱電対位置（図 8 の中の中心ヒータピンの②及び⑤）では CHF は殆ど発生していない。

5.4 考察

CHF の発生状況のギャップ幅依存性を理解するために、各入口温度毎に、全ギャップ幅ケースのデータの比較を行う。図 16(a)～(e)に、テスト部入口温度毎に限界熱流束の質量流束依存性を、図 16(f)には全データをまとめて示した。図中、白抜きの記号がギャップ幅 1.5mm、黒塗りが 1.0mm、薄塗りが 0.6mm のデータを示している。本図から以下のことが言える。

- ・質量流束が 2,000kg/m²/s 程度以下の質量流束の低い領域では、すべてのギャップ幅で限界熱流束は質量流束に線形的に変化し、ギャップ幅が狭いほど小さな値を示している。
- ・質量流束が 2,000kg/m²/s 程度より大きい領域では、CHF 発生位置が流量の増加と共に上流側へ移ることから、局所限界熱流束値のばらつきが大きくなり、ギャップ幅の影響が明確に現れなくなっている。

次に、CHF 発生位置の発熱密度について見ると、図 7 に示す軸方向出力分布から分かるように、局所限界熱流束の流量依存性はあるものの、全てのケースで、発熱部上端に近い、比較的線出力密度の低い位置（下流側の 4 個の熱電対、即ち発熱部下端から 1790mm～1495mm の間にある熱電対で CHF を検出）で CHF が発生している。このため、CHF 発生後のヒータ表面の温

度上昇が緩やかで振動的な挙動を示すケースが多く観測された。本実験で見られた特徴的なヒータ表面温度挙動を図 17(a)及び(b)に示す。これらの例は、どちらもギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$ 、入口温度 280°C の条件であるが、流量がそれぞれ $1,500\text{kg/h}(1,102\text{kg/m}^2/\text{s})$ と $4,000\text{kg/h}(4,408\text{kg/m}^2/\text{s})$ のケースのものである。図 17(a)は、上から二つ目の比較的軸方向出力の低い位置の熱電対(図 7 に示されている加熱部下端から $1,695\text{mm}$ の位置の熱電対)の温度挙動を示している。この図では、200 秒頃一旦温度上昇が始まると比較的スムーズに上昇を続け、 20°C 程度上昇した後、201.7 秒にヒータの加熱量を低下するまでの間に、すでに温度上昇は緩やかになっている事を示している。このような挙動は、流量が低いケースで比較的多く見られた。一方、図 17(b)では、約 290 秒に見られる急激な温度上昇に先立って、180 秒頃から振動しながら緩やかに温度が上昇する期間が長く続いている事が示されている。このような挙動は、必ずしも流量が高い場合のみ発生する訳ではないが、流量が高いケースで比較的多く見られた。

続いて、CHF 発生時の流体のクオリティを整理すると次のようである。図 18(a)～(c)に、ギャップ幅 1.5mm 、 1.0mm 、 0.6mm の各ケースにおける CHF 発生位置での流路断面平均の熱平衡クオリティを示す。これらの図から、以下の事が言える。

- ・ギャップ幅 1.0 及び 0.6mm のケースでは、クオリティはほぼ同程度で 0.3 から 0.8 の高い値を示した。このような高いクオリティー領域においては、通常の PWR で想定される DNB 型の限界熱流束現象とは異なる、液膜ドライアウト型の CHF の発生が示唆される。このことは上記の CHF 発生位置（比較的出力密度の低い発熱部上端付近）やヒータ表面温度の挙動（緩やかな温度上昇）からも推察される。
- ・ギャップ幅 1.5mm のケースは、クオリティ 0.1 から 0.3 程度を示し、他のギャップ幅ケースより低い値である。このため、液膜ドライアウト型 CHF の発生は無い様に思われるが、装置設計上の特徴（周辺部の水力等価直径を中心部に合わせるために、フローシュラウド壁とヒータピンの間隙をやや広目に設定していること、中心ヒータピンの出力を周辺ヒータピンの 1.2 倍に設定していること）を考慮し、中心ヒータピンと周辺ヒータピンで囲まれた中心部のサブチャンネルでのクオリティを、周辺部との流体の混合を無視して推定すると、 0.3 から 0.8 となることから、液膜ドライアウト型の CHF の可能性を全くは排除できないと考えられる。後述するサブチャンネル解析コード COBRA-IV-I による解析結果は、中心サブチャンネルでのクオリティが同程度の高い値を示していることからも、この推定が裏付けられる。

以上の議論から、液膜ドライアウト型の CHF 発生の可能性が示唆されるので、BWR で用いられている限界出力を整理するとどのような特性になっているかを検討する。CHF 発生時の加熱量（限界出力）を入口質量流束に対して図示すると図 19(a)～(d)のようである。ここで、図 19(a)～(c)はギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$, 1.0mm , 0.6mm のそれぞれに対して、入口温度をパラメータとして示したものである。図 19(d)は、これら全てのデータを一つの図にまとめたものである。これらの図から、全てのギャップ幅に対して、限界出力にはばらつきが無く、しかもきれいな線形の関係が得られていることが分かる。

以上のように、CHF の発生位置が出力密度の低い位置であること、CHF 発生位置のクオリティが 0.8 まで至る高い値であること、CHF 発生後の温度上昇が緩やかなこと、限界出力によってもデータの整理がきれいにできることから、圧力条件を PWR の運転圧力に設定した実験ではあるものの、液膜ドライアウト型の CHF 現象と推定できる挙動が含まれている可能性が強い。

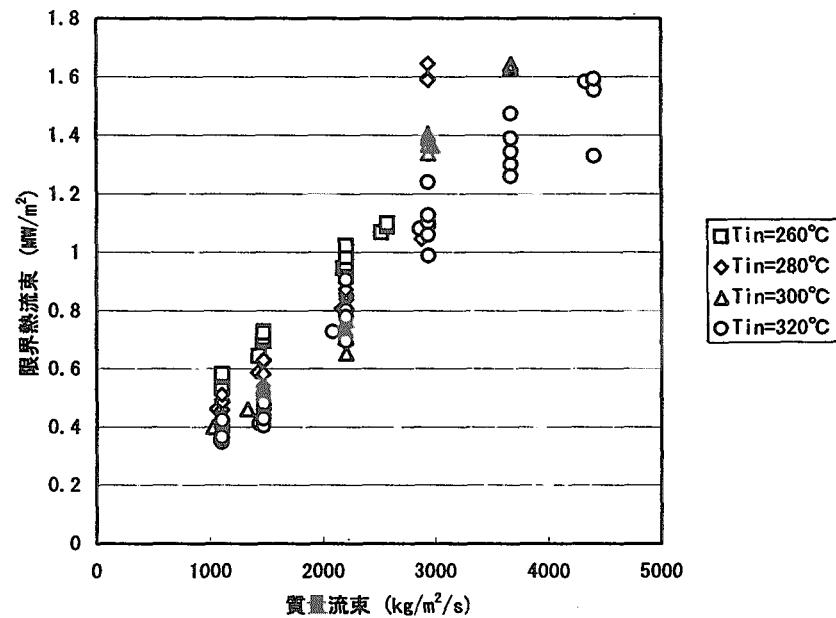


図 10 局所限界熱流束の質量流束依存性(ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$)

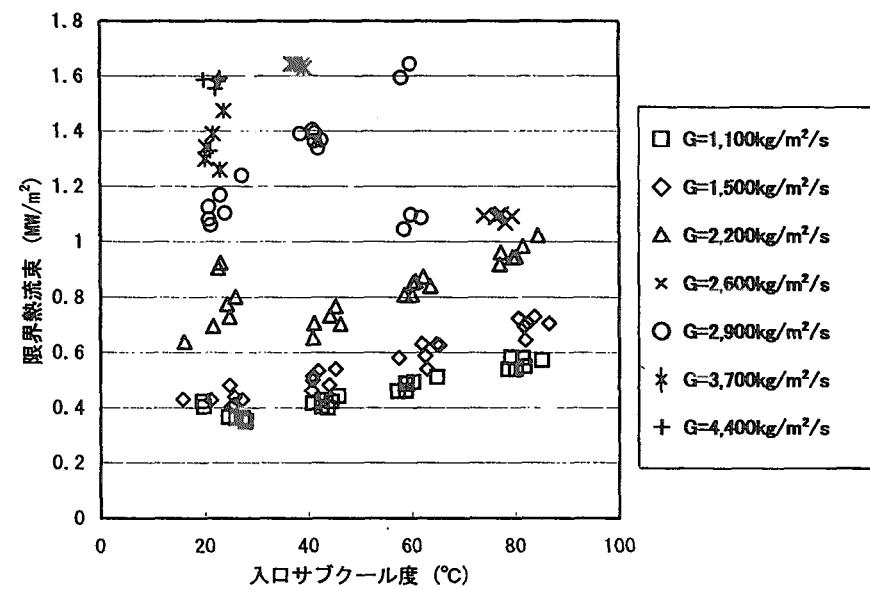


図 11 局所限界熱流束の入口サブクール度依存性(ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$)

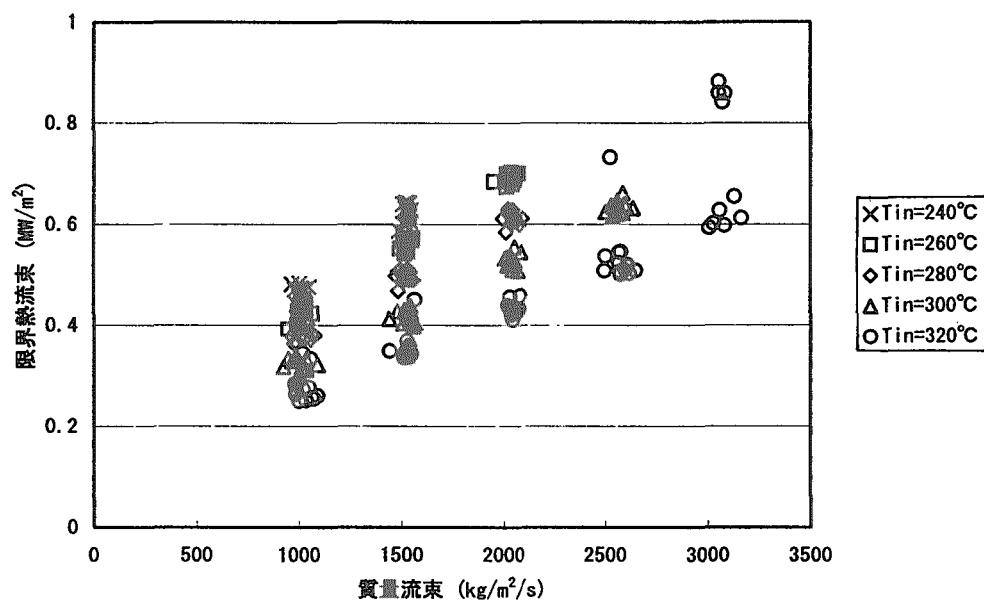


図 12 局所限界熱流束の質量流束依存性 (ギャップ幅 $g=1.0\text{mm}$)

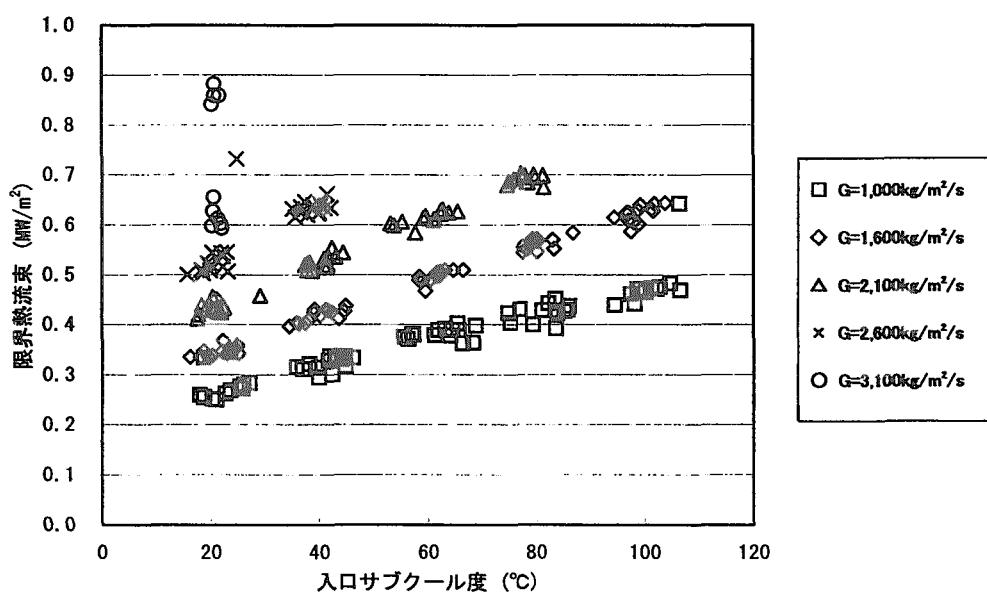
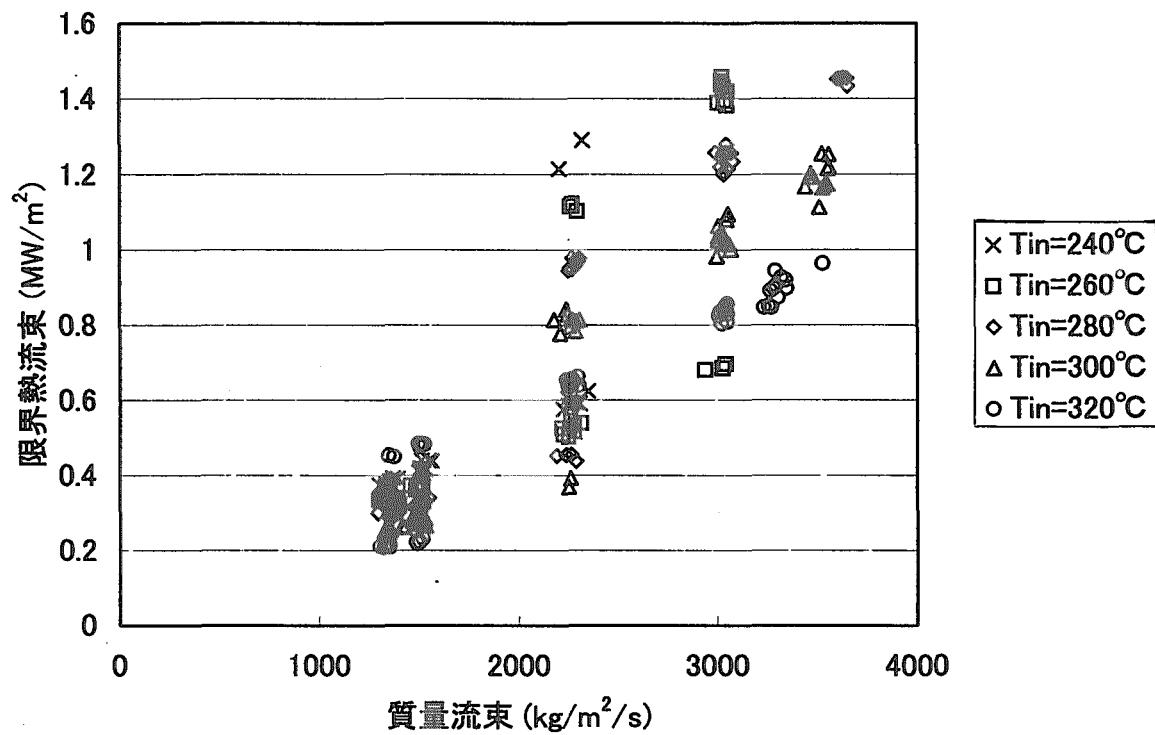
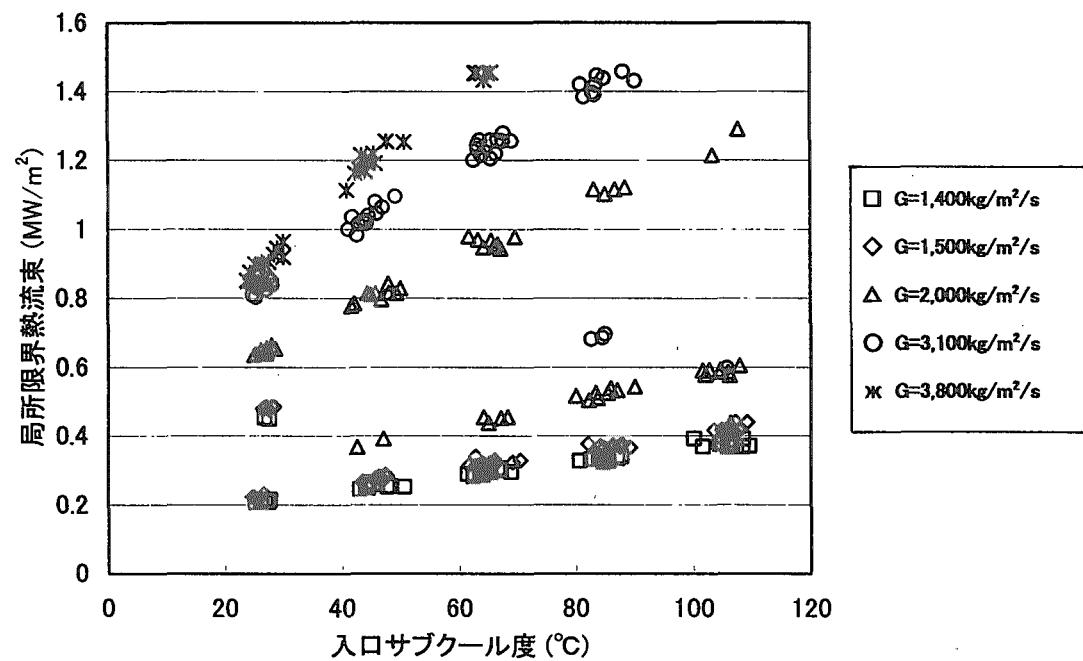
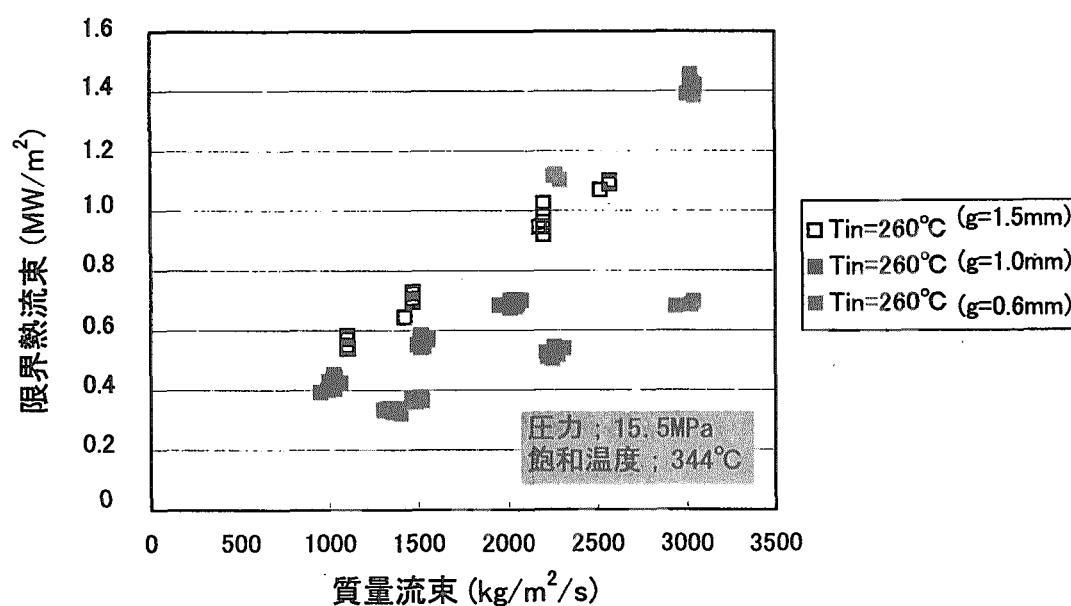
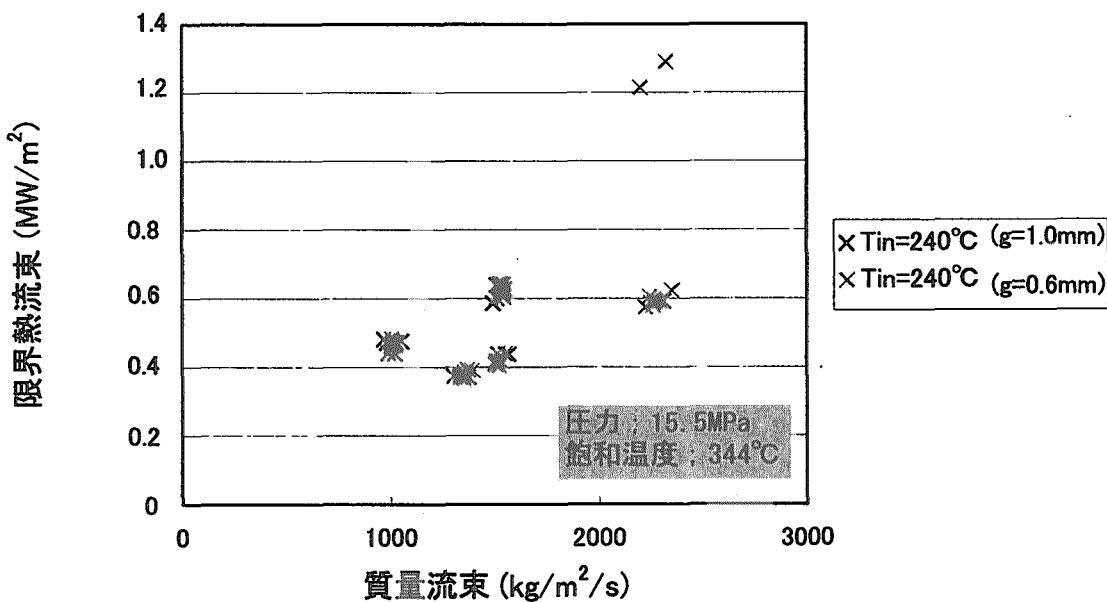


図 13 局所限界熱流束の入口サブクール度依存性 (ギャップ幅 $g=1.0\text{mm}$)

図 14 局所限界熱流束の質量流束依存性 (ギャップ幅 $g=0.6mm$)図 15 局所限界熱流束の入口サブクール度依存性 (ギャップ幅 $g=0.6mm$)



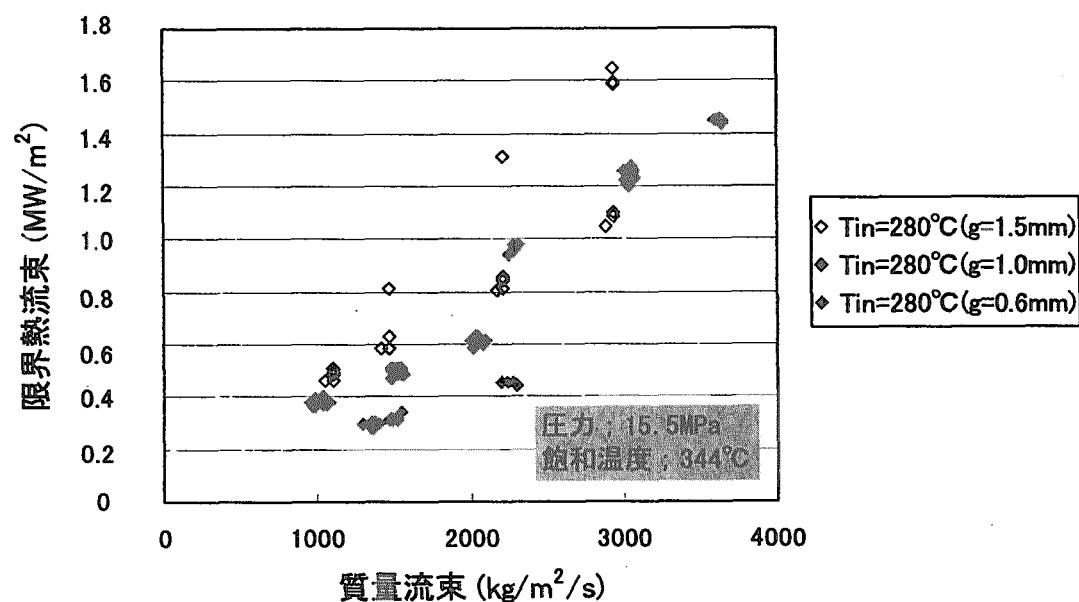


図 16(c) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 (T_{in}=280°C)

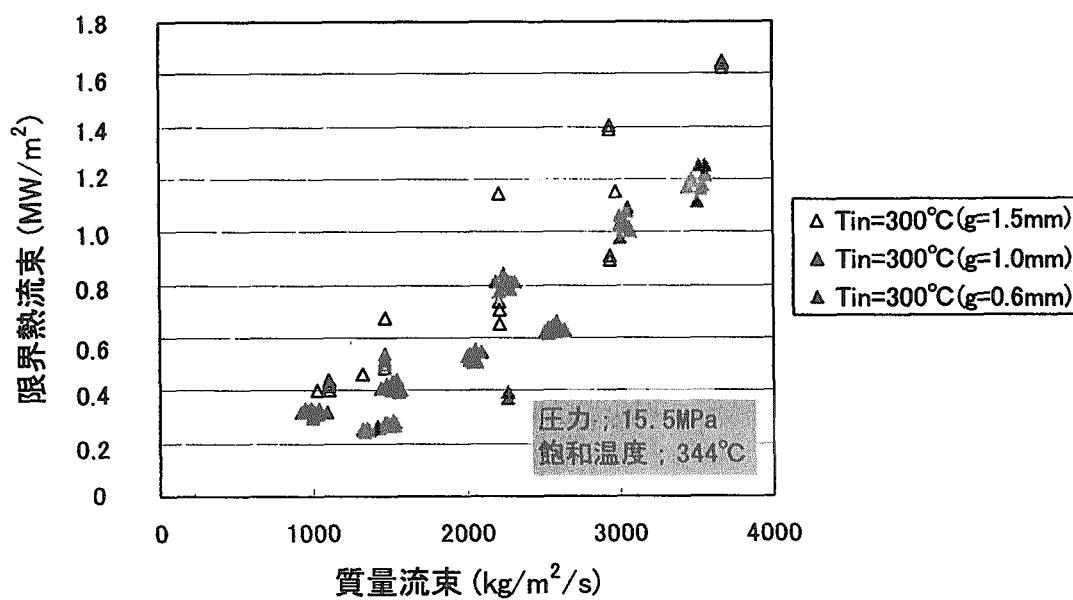
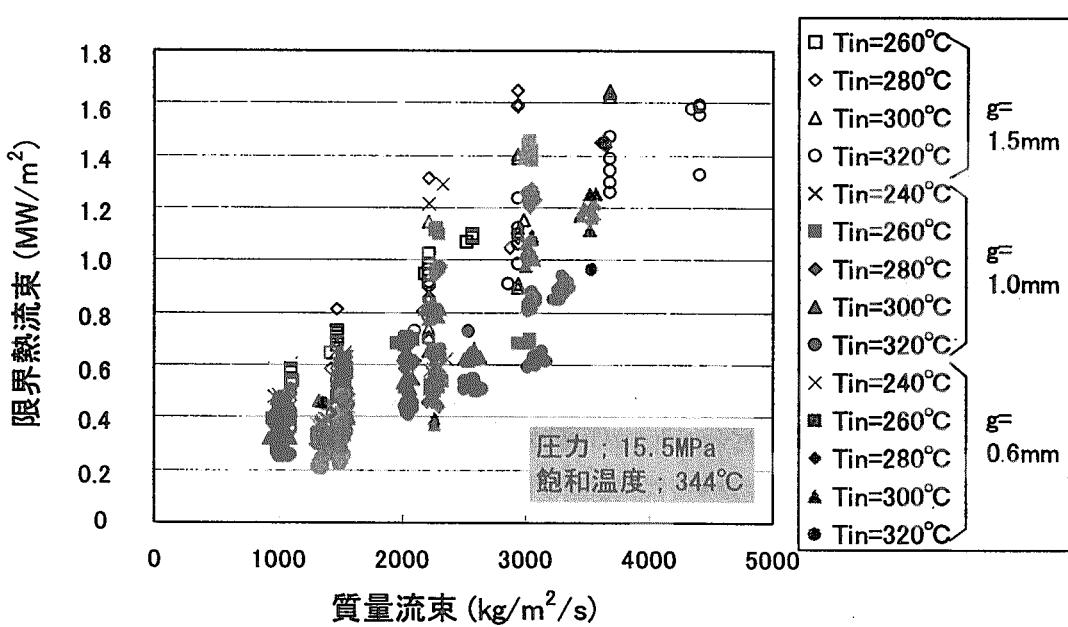
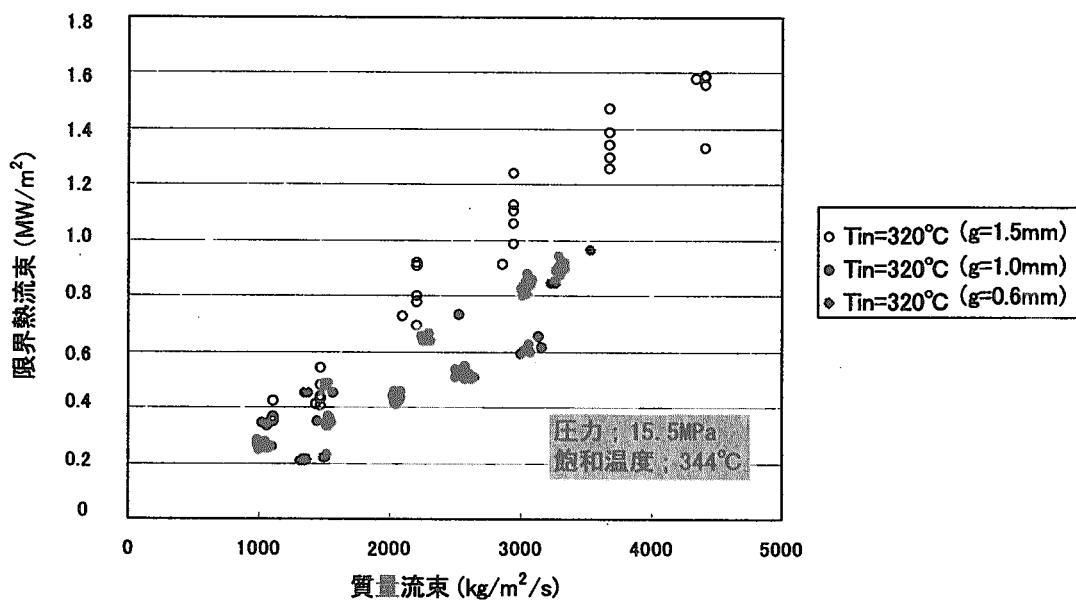


図 16(d) 全ギャップ幅での局所限界熱流束の質量流束依存性 (T_{in}=300°C)



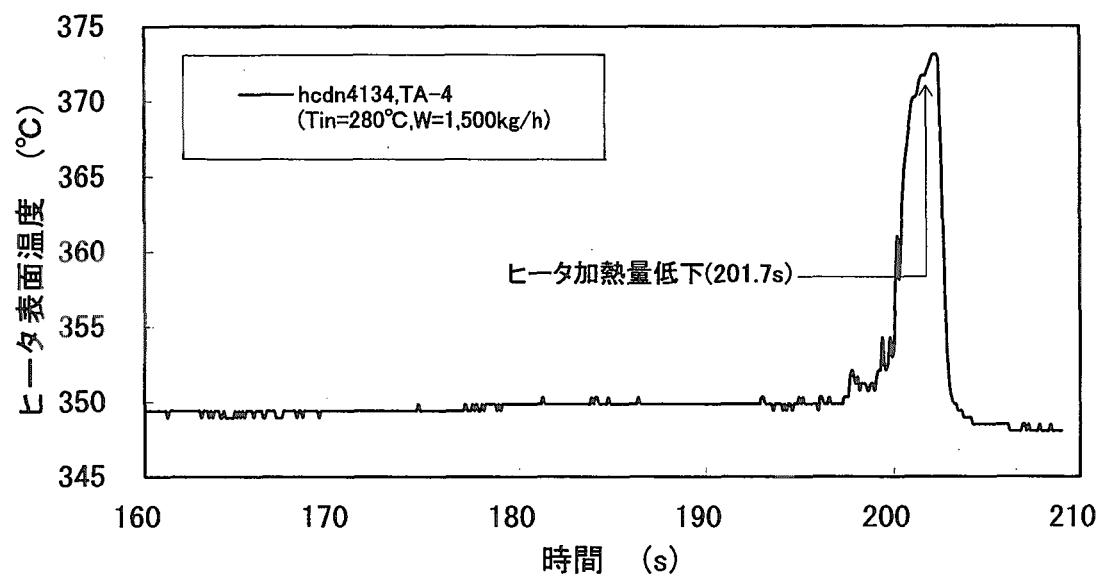


図 17(a) ヒータ表面温度挙動の例 ($g=1.5\text{mm}$, $T_{in}=280^\circ\text{C}$, $W=1,500\text{kg}/\text{h}$)

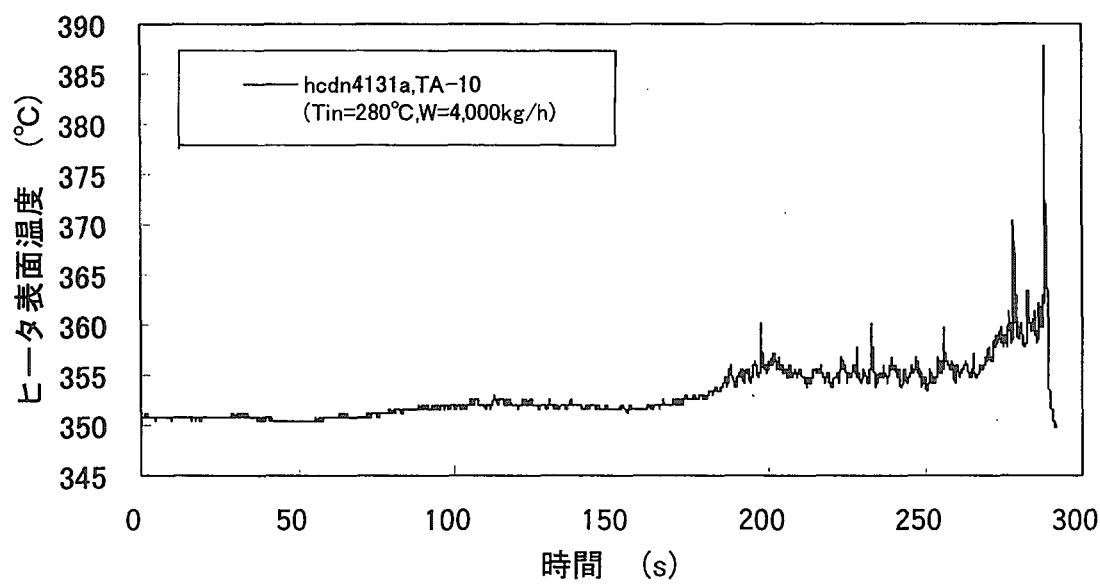


図 17(b) ヒータ表面温度挙動の例 ($g=1.5\text{mm}$, $T_{in}=280^\circ\text{C}$, $W=4,000\text{kg}/\text{h}$)

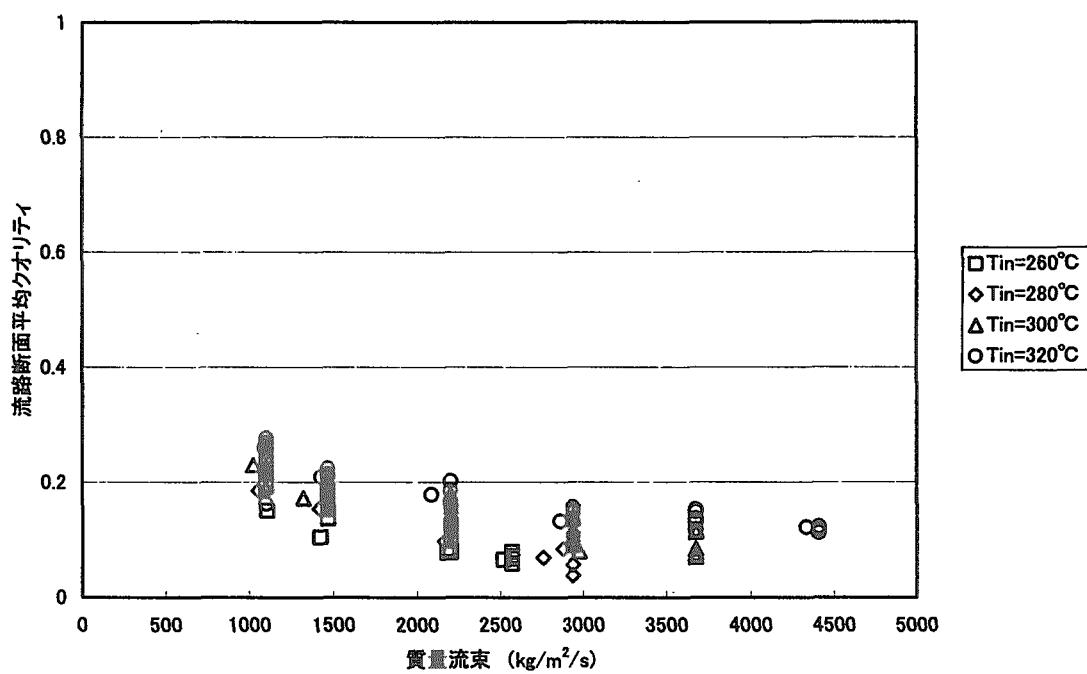


図 18(a) CHF 発生位置での断面平均熱平衡クオリティ ($g=1.5\text{mm}$)

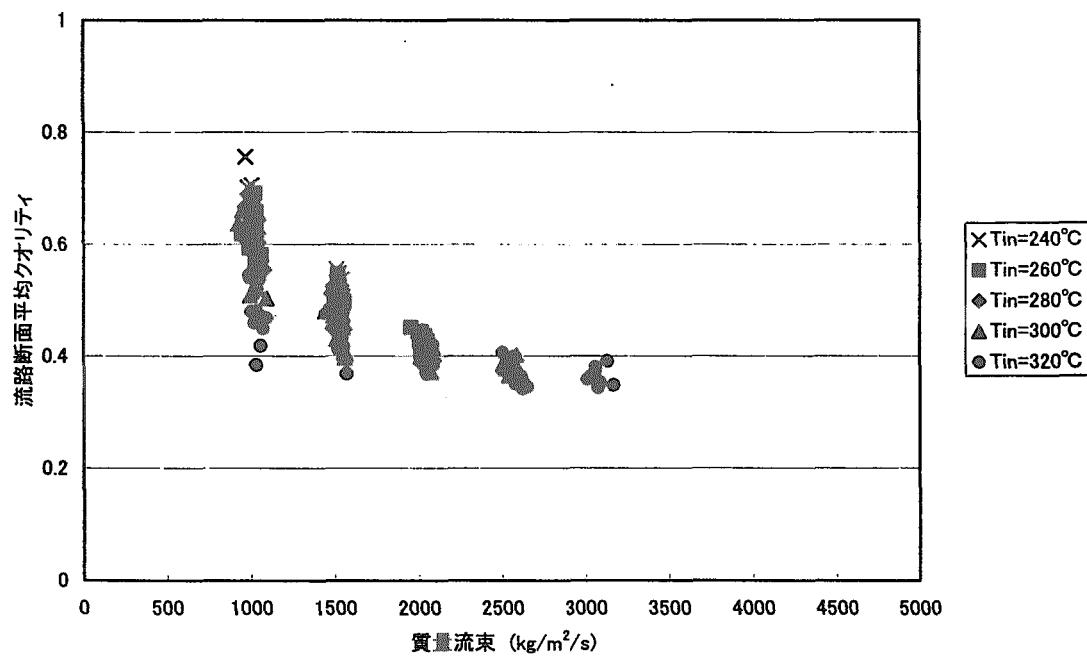


図 18(b) CHF 発生位置での断面平均熱平衡クオリティ ($g=1.0\text{mm}$)

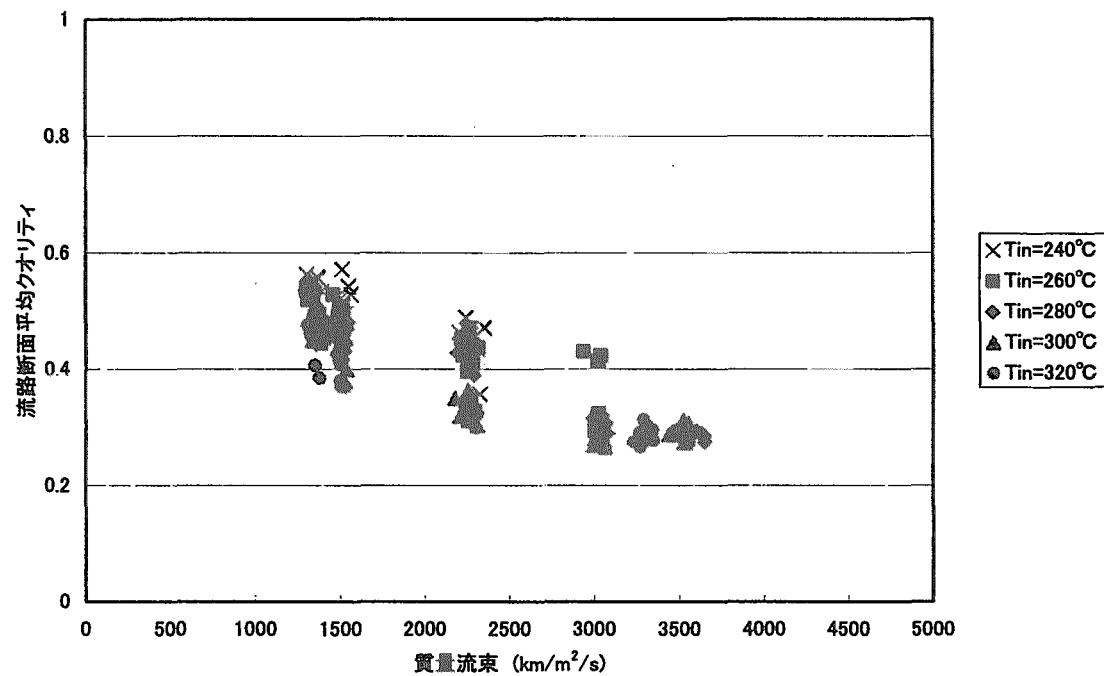


図 18(c) CHF 発生位置での断面平均熱平衡クオリティ ($g=0.6\text{mm}$)

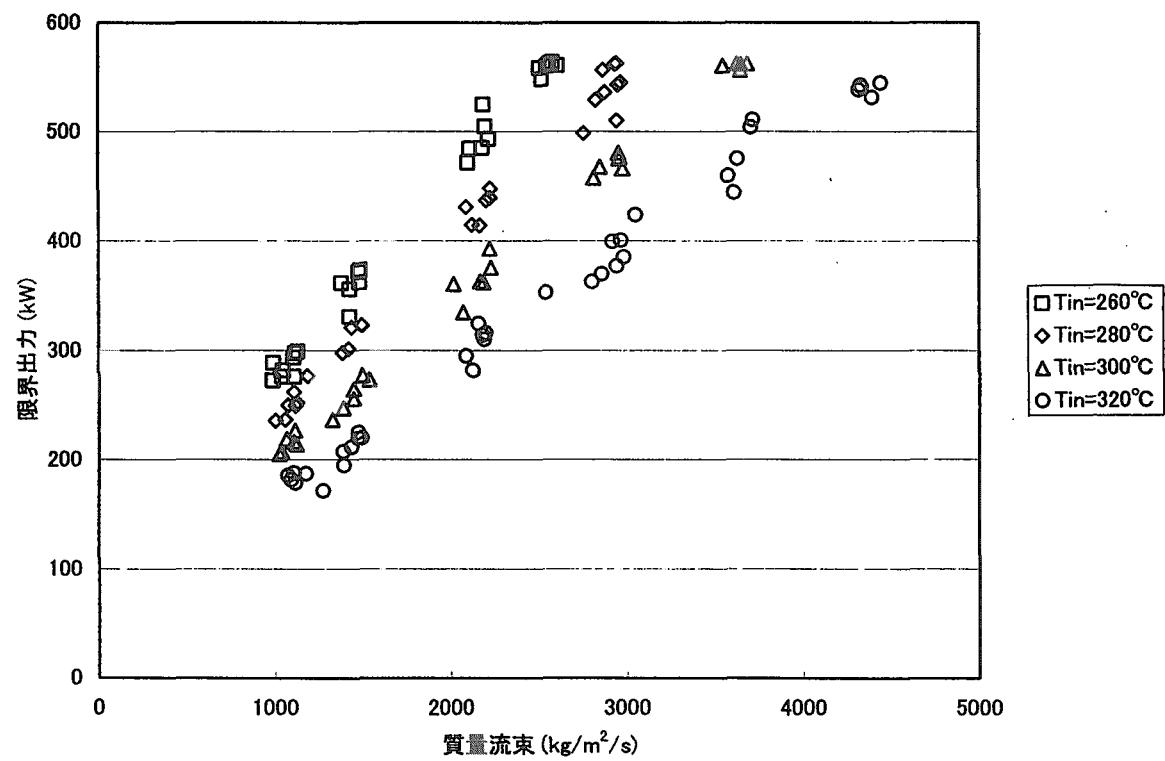


図 19(a) 限界出力の質量流束依存性($g=1.5\text{mm}$)

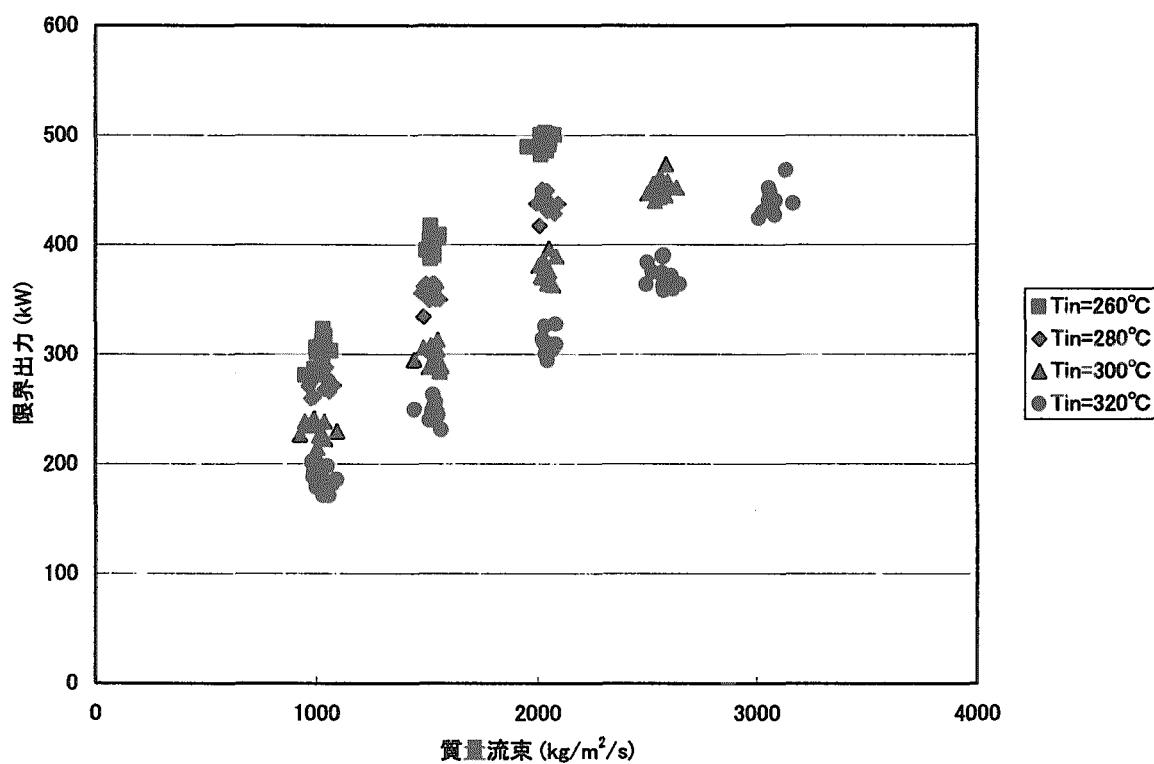


図 19(b) 限界出力の質量流束依存性($g=1.0\text{mm}$)

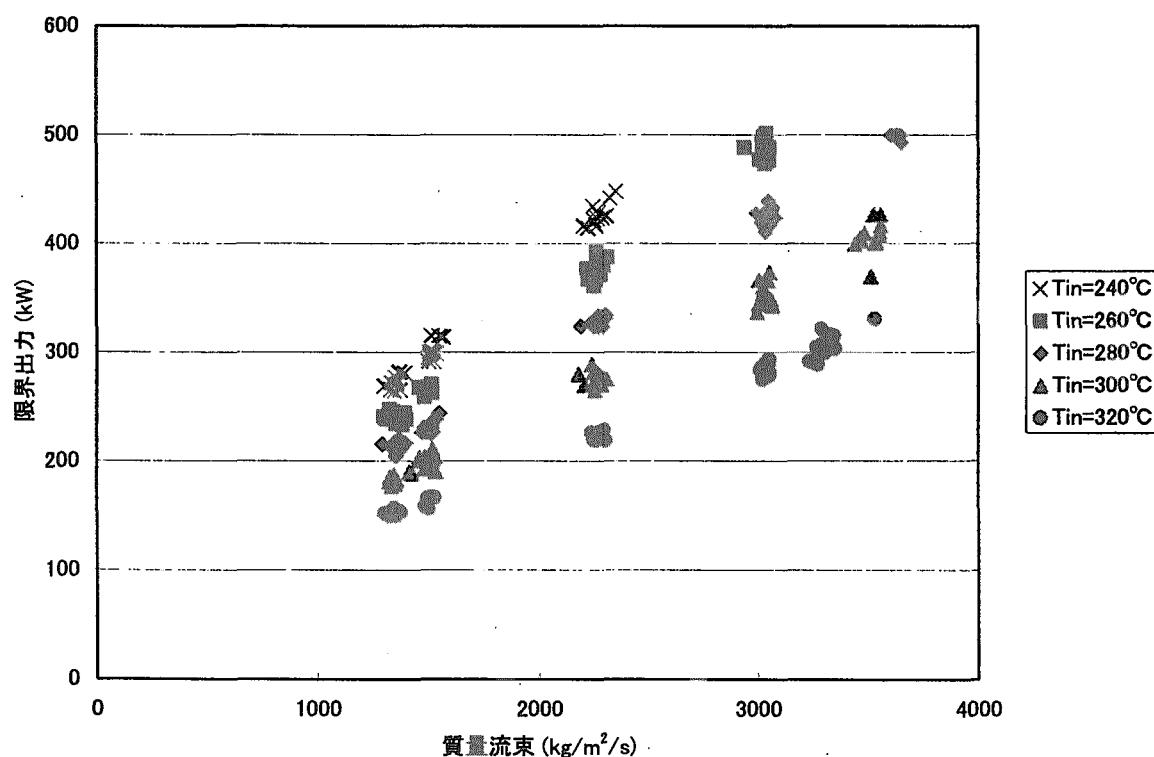


図 19(c) 限界出力の質量流束依存性($g=0.6\text{mm}$)

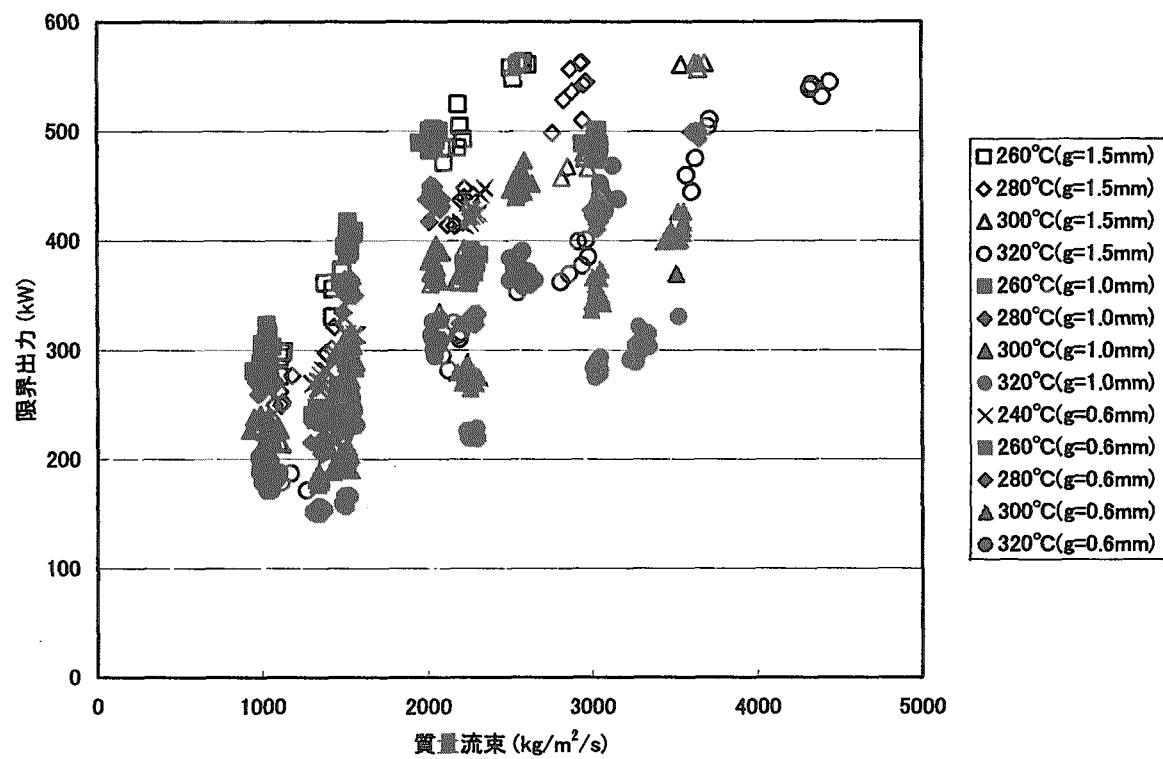


図 19(d) 限界出力の質量流束依存性(全ケース)

6. サブチャンネル解析コード COBRA-IV-I による実験解析

6.1 入力データ

低減速スペクトル炉の炉心熱設計に用いる限界熱流束評価手法(KfK CHF 相関式を組み込んだサブチャンネル解析コード COBRA-IV-I) の適用性を検討するために、実験の解析を行った。解析に用いたノーディング図を図 20 に示す。ここに示すように、流路内を 18 のサブチャンネルに分割し、軸方向には 36 分割し、7 本のヒータピンをそれぞれ別々に考慮するものとした。この他の主な解析条件を以下に示す。

乱流混合係数 : 0.003 (单相流、二相流共)

CHF 相関式 : KfK 相関式

サブクールボイドモデル : Levy

バルクボイドモデル : EPRI

摩擦損失係数 : Blasius

スペーサ抵抗係数 : 1.0

熱伝達相関式 : RELAP4 パッケージ

クロスフロー抵抗係数 : 0.5

クロスフロー運動量係数 : 0.5

乱流運動量係数 : 0.0

クロスフロー軸方向速度 : $(u(i)+u(j))/2$

以上のうち、乱流混合係数の値は、原研で実施した実験の結果に基づいて与えたものである。この実験は、稠密格子体系の単相流状態での混合係数に関する実験であり、二相流に関するものではない。現在のところ、二相状態の乱流混合係数に関する十分な知見がないことから、厳し目の条件設定として単相流と同一の値を用いる事にした。また、CHF 相関式として用いた KfK 相関式は、稠密炉心体系への適用を想定して開発されたものであり、しかも、原研での高転換 PWR 研究において準稠密体系での CHF データの再現性が良いことが確認されていることから、当面の解析用相関式として使用することとした。他のデータの設定に関しては、高転換 PWR の研究で用いられたものをそのまま採用した。

6.2 解析結果

解析で得られた限界熱流束の実験値に対する比(ECHFR)の流量依存性をテスト部入口温度をパラメータとして全てのギャップ幅について比較したものを図 21 に示した。この図から以下のことが言える。

- ・ギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$ のケースは、ECHFR が 0.6 から 0.9 の範囲で流量の増加に対して減少する傾向を示す。ギャップ幅 $g=1.0\text{mm}$ のケースは、 $g=1.5\text{mm}$ のケースより更に小さな値となり、0.4 から 0.6 の範囲にある。 $g=1.0\text{mm}$ の場合、流量依存性は小さくなっている。また、 $g=0.6\text{mm}$ のケースでは、 $g=1.0\text{mm}$ のケースとほぼ同様の領域 0.4~0.6 にあり、 $g=1.0\text{mm}$ より更に流量

依存性が小さくなる。以上の結果は、いずれのケースにおいても、用いた評価手法は十分な余裕を持って限界熱流束を評価できることを示している。

- ・乱流混合係数の影響を検討するため、 $g=1.5\text{mm}$ のケースにおける流量条件の異なる数点に関する解析を行った。その結果を図 22 に示す。ここに示すように、乱流混合係数を入力データで与える一定値 0.003 から、COBRA-IV-I コード内臓のボイド率依存で二相流混合係数を与えるオプションに変更すると、ECHFR は解析した全てのケースにおいてほぼ 0.1 上昇した。即ち、このオプションを用いても、本評価手法は、対象とした狭いギャップ幅の体系に対して、大きな余裕を持っている。
- ・中心のヒータピンを囲む中心部のサブチャンネルのクオリティは周辺部のそれより高く、最小 ECHFR を与える位置で、 $g=1.5\text{mm}$ のケースで周辺部の 0 から 0.2 に対し中心部で 0.3 から 0.8、 $g=1.0\text{mm}$ のケースで周辺部の 0.2 から 0.4 に対し中心部で 0.7 から 1.0、 $g=0.6\text{mm}$ のケースで周辺部の 0.1 から 0.2 に対し中心部で 0.6 から 1.0 の範囲にあった。この結果は、断面平均クオリティが最も低いギャップ幅 $g=1.5\text{mm}$ のケースにおいても、流路の中心部ではクオリティは非常に高く、液膜ドライアウト型の CHF の発生の可能性を示している。

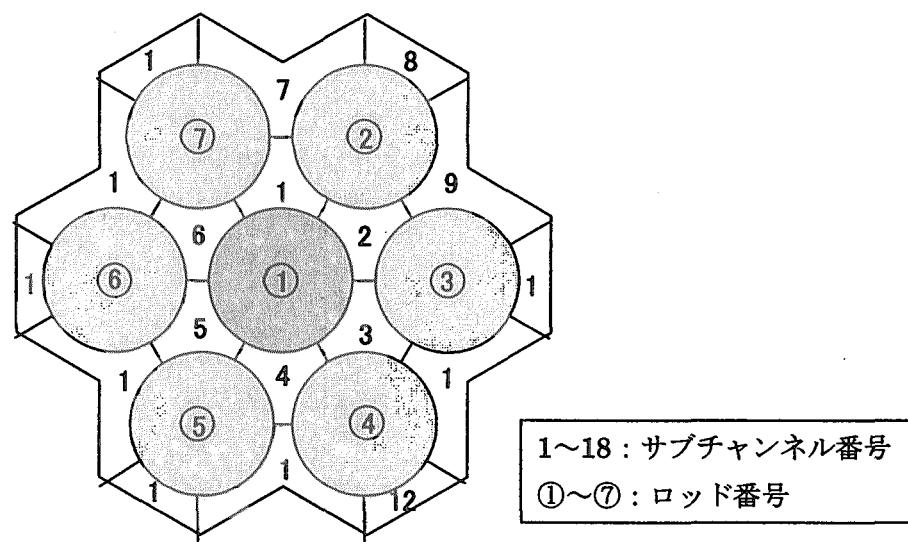


図 20 COBRA-IV-I による実験解析に用いたノーディングモデル

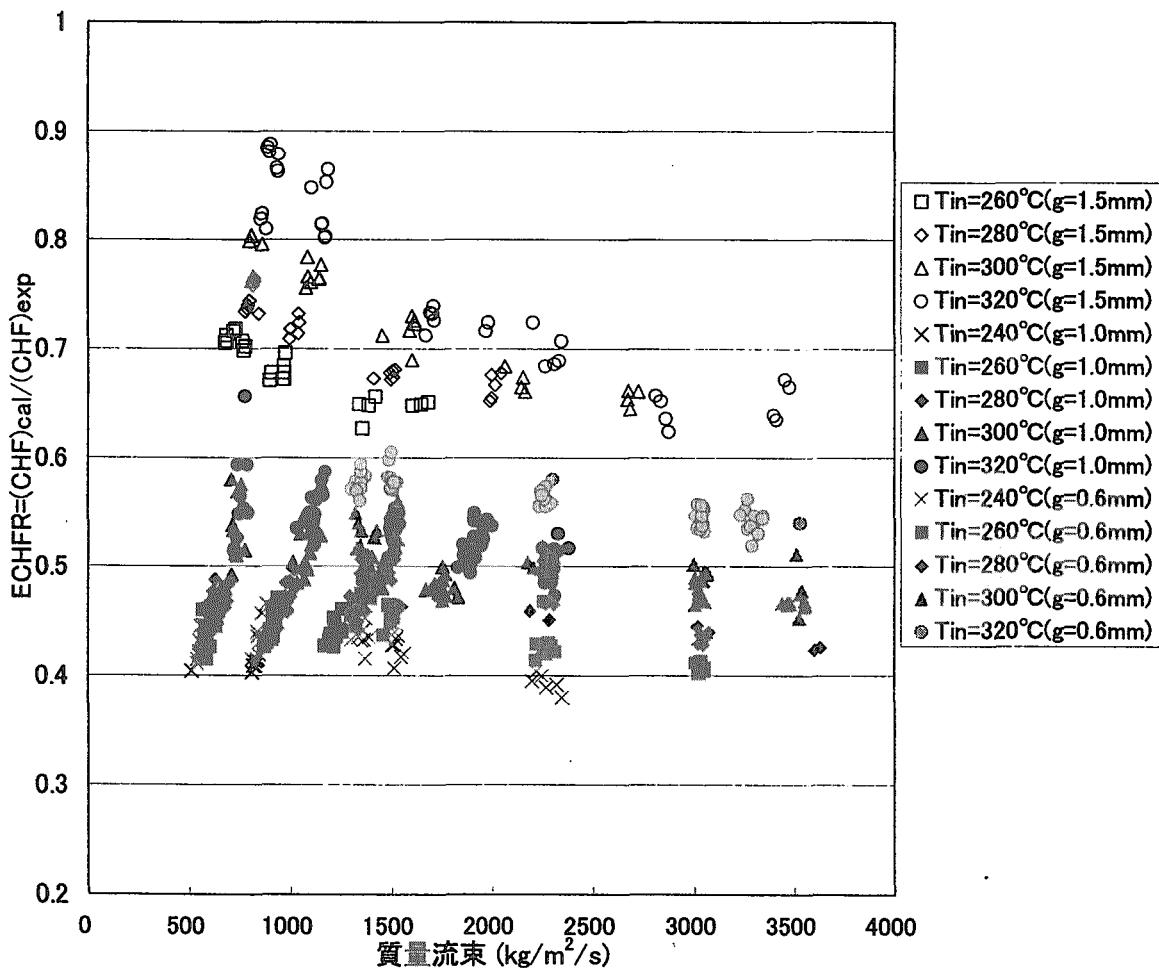


図 21 COBRA-IV-I による解析値の実験値に対する比 ECHFR

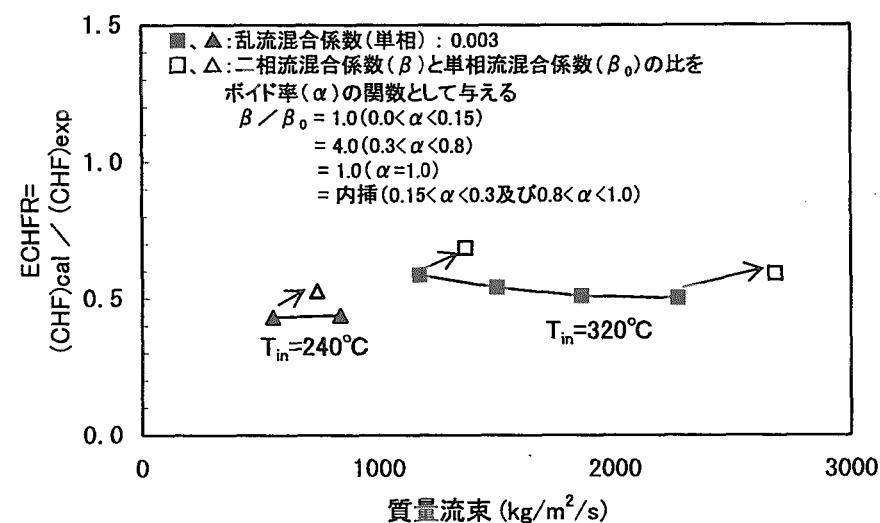


図 22 二相混合係数の ECHFR への影響

7. 結言

現在、原研で設計研究中の低減速スペクトル PWR 炉心の稠密な格子体系での熱的余裕（限界熱流束）評価のための基礎データ取得のため、三角配列 7 本ロッドを有する高圧小型水ループを用いて、ヒータ間ギャップ幅 1.5mm、1.0mm、0.6mm の場合の限界熱流束データをそれぞれ 112 点及び 240 点、255 点取得した。これらのデータを検討した結果、稠密炉心における限界熱流束に係わる以下の知見を得た。

- ・入口流量及びサブクール度の増大により、局所限界熱流束は増大する。
- ・質量流束が $2,000 \text{kg/m}^2/\text{s}$ 程度以下では、全てのギャップ幅ケースで、限界熱流束は流量及び入口サブクール度に対して線形的に変化し、ギャップ幅が狭いほど、限界熱流束は小さな値を示した。
- ・質量流束が $2,000 \text{kg/m}^2/\text{s}$ 程度より大きい領域では、限界熱流束のばらつきが大きくなり、ギャップ幅の影響が明確に現れていなかった。
- ・CHF 発生時の流路断面平均の平衡クオリティはギャップ幅 1.0mm 及び 0.6mm においては 0.3 から 0.8 の範囲であり、1.5mm においては 0.1 から 0.3 程度であった。
- ・限界出力は、ばらつきが小さく、流量の増加に対し線形的に増加した。
- ・CHF 発生時のクオリティが高い値であること、限界出力で整理が出来ること、CHF 発生後のヒータ表面温度の上昇が緩やかなケースが観測されていること、発生位置が発熱部下流端近傍で局所熱流束が比較的小さいところで発生していることから、液膜ドライアウト型の CHF が含まれている可能性が強い。

低減速スペクトル炉の炉心熱設計に用いる KfK CHF 相関式を組み込んだサブチャンネル解析コード COBRA-IV-I の適用性評価のために実施した実験解析から次の結論を得た。

- ・解析結果の実験結果に対する比(ECHFR)は 1.5mm のケースでは 0.9~0.6 の間にあり、流量の増加と共に減少する傾向を示した。1.0mm と 0.6mm のケースでは、両者ほぼ同一の領域 0.6 ~0.4 に存在し、流量に対する依存性はギャップ幅の減少と共に小さくなつた。つまり、解析で得られる限界熱流束は、実験値より 10% から 60% 低い値の範囲にあつた。
- ・本実験で対象とした狭いギャップ幅に対して、本解析手法は大きな余裕を持って評価できる。

謝辞

本実験に当たり、装置の改造及びテスト部製作を担当してくれた日立設備エンジニアリング(株) 及びニュークリアデベロップメント(株) に心より感謝の意を表します。また、装置の運転、実験の遂行を献身的に行ってくれた原子力エンジニアリング(株)の根本裕幸、小松正夫両氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1)LeTourneau, B.W., et al., "Critical Heat Flux and Pressure Drop Tests with Parallel Upflow of High Pressure Water in Bundles of Twenty 3/4-in. Rods", Nucl. Sci. Eng., 54(2), pp. 214-232.(1974).
- 2)LeTourneau, B.W., et al., "Critical Heat Flux and Pressure Drop Tests with Parallel Upflow of High Pressure Water in Bundles of Twenty 0.25- and 0.28-Inch Diameter Rods (LWBR Development Program)", WAPD-TM-1013 (1975).
- 3)Coeling K.J., "Critical Heat Flux and Pressure Drop Tests with Vertical Upflow of Water in A 20-Rod Bundle of 0.695-inch Diameter Rods", WAPD-TM-1155 (Feb. 1977).
- 4)堺公明、菅原悟、“燃料集合体のドライアウト限界出力に対する燃料棒間ギャップの影響”、日本原子力学会「昭63秋の大会」、D23(1988年10月)。
- 5)新井健司他、“高転換沸騰水型炉の限界出力特性(II)”、日本原子力学会「昭62年会」、E43(1987年4月)。
- 6)師岡慎一他、“稠密バンドル燃料の熱水力基礎試験(1)—限界出力試験—”、日本原子力学会「1999年秋の大会」、F29(1999年9月)。
- 7)岩村公道他、“扁平二重炉心型高転換軽水炉の限界熱流束(CHF)特性”、JAERI-M 89-004 (1989年2月)。
- 8)岩村公道他、“高転換軽水炉限界熱流束実験(3)—加熱長さ：0.5m～1.0m、P/D：1.126～1.2、ロッド数4～7—”、JAERI-M 90-044 (1990年3月)。

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N($=10^5$ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-11}		1	100
	3.7×10^{10}	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

低減速スペクトル炉開発のための稠密格子体系PWR圧力条件での限界熱流束実験