

JAERI-Research  
99-023



JP9950176



中性子ラジオグラフィによるサブクール  
沸騰流中のボイド率分布計測技術の開発

1999年3月

呉田昌俊・松林政仁・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。  
入手の間合わせは、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、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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おこなっております。

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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

中性子ラジオグラフィによるサブクール沸騰流中のボイド率分布計測技術の開発

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

呉田 昌俊・松林 政仁<sup>+</sup>・秋本 肇

(1999年2月10日受理)

大強度中性子源の固体ターゲットや核融合炉のプラズマ対向機器等の開発に関連し、高熱負荷サブクール沸騰時のボイド率を評価する必要がある。また、現在までに提案されているボイド率予測法は、円管流路で得られたデータをもとに提案された相関式が主であり、高熱負荷機器で採用される矩形流路への適用性は検討の必要があった。しかし、狭間隙流路内ボイド率は、現在まで計測が困難であったため予測法が確立されていない。そこで、本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて狭間隙流路内サブクール沸騰時の気泡挙動の可視化とボイド率分布を計測する技術を開発し、また本計測システムを用いてボイド率データベースを作成することを目的とした。

本報告書は、中性子ラジオグラフィによるボイド率計測法、及び片面加熱狭間隙矩形流路内サブクール沸騰時のボイド率を計測した結果をまとめたものである。

Development of Measurement Method of Void Fraction Distribution on  
Subcooled Flow Boiling Using Neutron Radiography

Masatoshi KURETA, Masahito MATSUBAYASHI\* and Hajime AKIMOTO

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

(Received February 10, 1999)

In relation to the development of a solid target of high intensity neutron source, plasma-facing components of fusion reactor and so forth, it is indispensable to estimate the void fraction for high-heat-load subcooled flow boiling of water. Since the existing prediction method of void fraction is based on the database for tubes, it is necessary to investigate extendibility of the existing prediction method to narrow-gap rectangular channels that is used in the high-heat-load devices. However, measurement method of void fraction in the narrow-gap rectangular channel has not been established yet because of the difficulty of measurement. The objectives of this investigation are development of a new system for bubble visualization and void fraction measurement on subcooled flow boiling in narrow-gap rectangular channels using the neutron radiography, and establishment of void fraction database by using this measurement system.

This report describes the void fraction measurement method by the neutron radiography technique, and summarizes the measured void fraction data in one-side heated narrow-gap rectangular channels at subcooled boiling condition.

Keywords: Void Fraction, Measurement, Neutron Radiography, Forced Convection,  
Subcooled Boiling, Rectangular Channel

---

\* Center for Neutron Science

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 高速度撮像中性子ラジオグラフィによるボイド率計測法 .....	2
2.1 基本原理 .....	2
2.2 $\Sigma$ スケーリング法によるボイド率計測 .....	3
2.3 撮像システムとサブクール沸騰流の可視化及びボイド率計測の流れ .....	4
3. 実 験 .....	6
3.1 実験装置 .....	6
3.2 実験方法 .....	6
4. 実験結果 .....	8
4.1 高時間分解能中性子ラジオグラフィによるサブクール沸騰の可視化観察 .....	8
4.2 ボイド率分布 .....	8
4.3 ボイド率に及ぼす熱流束の影響 .....	9
4.4 ボイド率に及ぼす質量速度の影響 .....	9
4.5 ボイド率に及ぼす入口水温の影響 .....	10
4.6 熱平衡クオリティと流路断面平均ボイド率の関係 .....	10
4.7 計測誤差に関する考察 .....	11
5. 結 言 .....	13
謝 辞 .....	13
参考文献 .....	14
使用記号 .....	15

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Measurement Method of Void Fraction Using High-Frame-Rate Neutron Radiography .....	2
2.1 Principle of the Measurement .....	2
2.2 Void Fraction Measurement by $\Sigma$ -Scaling Method .....	3
2.3 Imaging System and Procedure of Void Fraction Measurements for Subcooled Flow Boiling .....	4
3. Experimental .....	6
3.1 Experimental Apparatus .....	6
3.2 Experimental Procedure .....	6
4. Experimental Results .....	8
4.1 Visualization of Subcooled Flow Boiling Using High Time-resolution Neutron Radiography .....	8
4.2 Time Averaged Void Fraction Distribution .....	8
4.3 Effect of Heat Flux on Void Fraction .....	9
4.4 Effect of Mass Velocity on Void Fraction .....	9
4.5 Effect of Inlet Water Temperature on Void Fraction .....	10
4.6 Relation Between the Thermal Equilibrium Quality and Void Fraction .....	10
4.7 Consideration of Measurement Error .....	11
5. Conclusions .....	13
Acknowledgement .....	13
References .....	14
Nomenclature .....	15

# 1. 緒 言

現在開発が進められている大強度陽子加速器を用いた核破砕固体ターゲット、核融合炉のプラズマ対向機器等高熱負荷機器の熱工学設計に於ける限界熱流束評価と関連して、狭間隙流路内サブクール沸騰時のボイド率分布の把握が重要な課題となっている。そこで、従来のボイド率予測法を円管以外の体系へ適用を試みた結果、可視化観察をもとに予想される値よりかなり高い値に計算されることがわかった。現在までにボイド率計測法として報告されている方法の中では、X線( $\gamma$ 線)透過法が非破壊・非接触であるため広く研究がなされており、比較的大きな流路体系内でのボイド率計測法として広く普及している。しかし、X線( $\gamma$ 線)は水と蒸気で減衰率が共に低い値であり、区別が付きづらい欠点があり、狭間隙流路内沸騰流のボイド率測定としては不向きである。そこで、X線( $\gamma$ 線)と相補の特徴を有する中性子をボイドプローブとして用いる中性子ラジオグラフィを用いてボイド率計測を行うこととした。中性子は水と蒸気の透過率に大きな差があり、2 mm～6 mm程度の流路間隙内を流れる沸騰二相流のボイド率を高精度で測定できる可能性があるためである。現在までに報告されている中性子ラジオグラフィを用いたボイド率計測として、三島・日引らによる水-空気断熱二相流研究<sup>1) 2) 3)</sup>や液体金属二相流研究<sup>4)</sup>がある。しかし、サブクール沸騰時のボイド率を中性子ラジオグラフィで計測した例はなく、新たな計測システムを構築する必要がある。

そこで、以下に記すステップで研究を進めることにした。

- (1) 高速度撮像中性子ラジオグラフィにより、狭間隙矩形流路内サブクール沸騰流中のボイド率分布を計測するシステムを新たに構築する。
- (2) 本計測法を用い、サブクール沸騰流の流動様式を高時間分解能で可視化観察し、ボイド率データベースを整備する。
- (3) システムパラメータがボイド率に及ぼす影響を明らかにする。
- (4) 既存のボイド率予測法と計測値を比較し、既存予測法の円管以外の体系への適用可能性を検討する。
- (5) 既存のバーンアウトモデル中で計算されるボイド率と実験値を比較し、既存のバーンアウトモデルの狭間隙矩形流路への適用性を検討する。
- (6) 計測データと流動観察をもとに、数値解析コードに組み込めるよう最適ボイド率予測モデルを提案する。

本報告書は、本研究の前半部分に当たる上記ステップの(1)の計測法に関する概要と(2)(3)で得られた結果をまとめたものである。

## 2. 高速度撮像中性子ラジオグラフィによるポイド率計測法

### 2.1 基本原理

計測体系の一例として、テスト部内沸騰二相流を考える。原子炉等中性子源からテスト部へ入射する中性子束  $\phi_{th}$  は、テスト部を通過するとき、式(1)で表されるようにその行路の物質厚さ  $\delta$  に応じて減衰することから、透過中性子束  $\phi_p$  はテスト部内の沸騰二相流に関する情報を包含している。

$$\phi_p = \phi_{th} \cdot \exp(-\sum_g \delta_{mg} - \sum_f \delta_{mf} - \sum_i \delta_i) \quad (1)$$

テスト部を透過した中性子は、テスト部後方に設置された蛍光コンバータ面に到達し、中性子束  $\phi$  に比例して可視光に変換される。この光を高感度カメラを用いて画像データとして記録させる。二相流情報を含む画像は、256階調のデジタル画像ファイルとして高速度ビデオカメラから出力され、これを計算機に転送し保存した。なお、一般にカメラの出力信号(輝度)  $B$  は、次式で表されるようにカメラの入射光量(これは中性子に比例する)とは比例しない。

$$B = (C \cdot \phi)^\gamma + B_d \quad (2)$$

カメラを用い画像データから定量的計測を行う場合には、あらかじめ撮像系の  $\gamma$  特性を調べ暗電流項  $B_d$  を補正した出力信号に  $1/\gamma$  を乗ずることによって  $\gamma$  補正を行う必要がある。本研究では、中性子ラジオグラフィの撮像系としてフォトン製の高速度ビデオカメラを用いている。本実験では、使用前に撮像系の  $\gamma$  が1となるように設定を行い、画像の  $\gamma$  補正の必要を無くした。そこで、本実験では、式(2)を式(3)のように簡略化する。

$$B = C \cdot \phi + B_d \quad (3)$$

式(2)、(3)に示されるように、カメラ出力には光の入射がない場合でも暗電流と呼ばれる成分  $B_d$  が含まれ、全ての画像データに和の形で重畳されている。また、アナログ信号系やADコンバータのオフセット成分は中性子を照射しない状態で得られる画像情報を用いて差を取り補正することが可能である。

コンバータ面上のある位置に入射する中性子束  $\phi$  を考える。この  $\phi$  には、テスト部内を直進して透過してきた中性子成分  $\phi_p$  の他に、テスト部で散乱してコンバータに到達した中性子成分  $\phi_{sm}$ 、および中性子ラジオグラフィ照射室内の生体遮蔽等で散乱し、テスト部のない方向からコンバータに入射してきた中性子成分  $\phi_{ss}$  が含まれる。

$$\phi = \phi_p + \phi_{sm} + \phi_{ss} \quad (4)$$

散乱中性子成分  $\phi_s$  ( $=\phi_{sm} + \phi_{ss}$ ) は、ラジオグラフィ画像に不鮮明さ(ぼけ)を生じさせたりポイド率定量化の際の誤差原因となる。本実験では、テスト部-コンバータ間距離を十分大きく



とり、散乱中性子成分を低減させる平滑化法を採用した<sup>5)</sup>。テスト部—コンバータ間距離を十分大きくとることにより物質内散乱中性子成分の空間分布は一様となり、強度はその距離とともに減少すると予想されたためである。

式(3)中の $C$ 、 $B_0$ は、カメラを含む撮像系のドリフトによって変動を受ける。したがって前処理として、解析画像内の中性子透過率の変化がない領域の画像間比較により、 $\phi_{th}$ 、 $C$ 、 $B_0$ が各画像間で等しくなるように補正を事前に行っておく必要がある。

## 2.2 $\Sigma$ スケーリング法によるボイド率計測

本データ解析では、三島・日引により提案された $\Sigma$ スケーリング法<sup>1)</sup>を用いてボイド率の定量化を行った。以下に $\Sigma$ スケーリング法を記す。

散乱中性子補正法として平滑化法を用いるため、式(3)及び(4)を以下のように変形する。

$$B = C \cdot \phi_p + B_0 \quad (5)$$

$$B_0 = B_s + B_d \quad (6)$$

$$B_s = C \cdot (\phi_{sm} + \phi_{ss}) \quad (7)$$

特殊な気体を除いて気相の中性子の巨視的断面積は、テスト部および液相のそれに比べて無視できることから気相で満たされたテスト部および液相で満たされたテスト部の画像データより、それぞれ式(8)、(9)が得られる。

$$B_g = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_t \delta_t) + B_0 \quad (8)$$

$$B_f = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_f \delta_f - \Sigma_t \delta_t) + B_0 \quad (9)$$

式(8)、(9)より $B_0$ は式(10)のように求まる。

$$B_0 = \frac{B_f - B_g \cdot \exp(-\Sigma_f \delta_f)}{1 - \exp(-\Sigma_f \delta_f)} \quad (10)$$

式(10)より $B_0$ を決定し、画像処理により各画像の輝度を $B_0$ を用いて表す。このように中性子の巨視的断面積 $\Sigma$ を基準として暗電流成分および散乱中性子成分の補正項をオフセットとして求めることにより相対的な輝度情報( $B$ )から定量的な情報( $\delta$ )を得ることができるので、三島・日引は $\Sigma$ スケーリング法と名づけている。

気相で満たされたテスト部、液相で満たされたテスト部の画像輝度の分布は、それぞれ式(8)(9)で与えられる。また、気液二相流画像の輝度分布は式(11)で与えられる。

$$B_m = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_f \delta_{mf} - \Sigma_t \delta_t) + B_0 \quad (11)$$

式(8)、(9)、(11)よりボイド率は式(12)のように求めることができる。

$$\alpha = 1 - \frac{\delta_{mf}}{\delta_f} = \frac{\ln\left(\frac{B_f - B_0}{B_m - B_0}\right)}{\ln\left(\frac{B_f - B_0}{B_g - B_0}\right)} \quad (12)$$

画像計測の際の誤差要因として、上記以外に画像ひずみや入射中性子ビームの非平行度に起因する画像のぼけが考えられる。画像のひずみは、カメラレンズやイメージンテンシファイア（画像強度増幅器）および撮像管の偏向走査の不完成性などに起因して生ずる。本実験では、テスト部の定量化領域が 100mm 以下と小さいためカメラレンズの糸巻きひずみは無視できる程度に小さい事を予備実験で確認している。入射中性子ビームの非平行度に起因する画像のぼけ  $U_g$  は、ダイバージェント型コリメータの開孔部の直径を  $D$ 、全長を  $L$ 、テスト部-コンバータ間の距離を  $L'$  とすると式 (13) で表される。

$$U_g = \frac{L'}{L/D} \quad (13)$$

したがって、物質内散乱中性子成分の平滑化および低減化のためには  $L'$  を大きく取ることが有効であるものの、 $L'$  が大きくなると増大する画像のぼけが無視できる範囲内で、テスト部をコンバータから離す必要がある。本実験では、 $L'$  としてテスト部幅の 1.5~2.0 倍の距離 (150~200mm) にテスト部を固定した。この時、 $U_g \approx 1\text{mm}$  である。

## 2.3 撮像システムとサブクール沸騰流の可視化及びボイド率計測の流れ

図 1 に日本原子力研究所の JRR-3M 熱中性子ラジオグラフィ実験施設(TNRF)の概略図を示す。また本実験施設の特性を表 1 に示す。本実験では、重水タンク内で熱中性子化された中性子ビームを TNRF-2 照射室内に設置したテスト部に照射することによりラジオグラフィ画像を得た。表 2 に本実験で用いた高速度撮像系の仕様を、図 2 に撮像システムの概略図を示す。高速度ビデオシステムとして Photron 製の高速度ビデオとイメージンテンシファイアを組み合わせる使用することにより、コンバータで発する蛍光を高速度撮影時に必要な光量まで画像増幅して記録した。本高速度ビデオの出力としてアナログ出力およびデジタル出力の両方が可能であるが、本実験では画像の劣化を防ぐためデジタル出力とした。図 3 に画像処理システムの概略図を示す。デジタル出力に設定した場合、画像ファイルの大きさは 4500 フレーム/秒以下の録画スピードで縦 256 ピクセル横 256 ピクセルとなり、画像階調度が 256 (8bit) のグレー階調のバイナリファイルとして記録される。画像処理システム上の画像データの流れも図 3 に示す。高速度ビデオレコーダー内の画像メモリ上に記録された画像データは、GP-IB 回線で接続されたパソコン (PC) に解析に必要な枚数分デジタル転送され、PC のハードディスク上に蓄積される。

現在一般的に行われている画像処理は、専用の画像処理装置を用い、画像の保存用メディアとして VHS テープ等アナログ保存を採用している。このようなアナログを途中に挟む画像処理シ

システムでは情報伝達の際にいわゆる画像の劣化が生じる可能性がある。そこで本研究では、図3のような画像劣化が全く無いデジタルシステムを考案した。本画像処理では、アナログ機器を接続する必要がある画像処理専用装置を用いず、汎用計算機とネットワークを活用することによりデジタル情報の形で全ての処理を行う。このため、全ての画像処理は新たに開発した汎用計算機用画像処理ソフト(NIPPON-1, ximage, nrg\_area)を用いて行った。各画像処理ソフトは、以下の処理を行えるように設計した。

(1) NIPPON-1 (New Image Processing Program On Neutron radiography - 1)

ポイド率計測のためのメインプログラムであり、時間平均化、位置補正、輝度補正、8近傍平滑化、オフセット値の計算、局所ポイド率の計算、軸方向断面平均ポイド率分布の計算を行う。

(2) ximage

UNIX ワークステーション(WS)上でデジタル画像情報を表示する。本ソフトには、擬似カラー等各種表示モードがある。その他、複数画像の同一領域の切り抜きや大量の画像から平均化画像を得る等の基本的画像処理機能、また複数画像のある同一断面での輝度値分布比較グラフの作成機能を有する。

(3) nrg\_area

中性子ラジオグラフィ画像の中から、流路領域と加熱部領域を計算する。本ソフトでは2点の補正用画像位置情報を入力し、実際の寸法と中性子ラジオグラフィ画像上のピクセルの対応を演算し空間解像度  $R$  [ $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ]を計算する。この空間解像度と補正用画像位置情報をもとに、加熱部領域の高精度な抽出が可能となる。

デジタルで沸騰時の時間平均ポイド率を求める画像処理を行うためには、大量のデジタルファイルを効率良く扱う必要がある。この大量のデータを効率良く連続処理するため、上記3種のソフトをUNIXのCシェルスクリプト上に適切に記述し実行した。

## 3. 実験

### 3.1 実験装置

実験装置の概略図を図4に示す。作動流体はイオン交換水である。予熱器と冷却用熱交換器で水温調節した水は循環用ギアポンプから流出し、オリフィス流量計で流量を計測した。流量調節弁を通過した水はテスト部内を垂直上昇し、大気圧開放した気水分離器、予熱器へと循環する。本中性子ラジオグラフィ実験では、テスト部のみを TNRF-2 照射室内に設置し、気水分離器は TNRF-2 照射室の上部生体遮蔽上に設置した。図5に中性子ラジオグラフィ実験用テスト部の概略図を示す。本テスト部は、片面加熱矩形流路であり図5 (a) は炉心側から見たときの概略図を、図5 (b) は横断面の概略図を示す。本テスト部は主としてポリカーボネイト製であり、流路は片面が加熱用ステンレス箔を蒸着したポリイミド基板であり、反対面が中性子透過率の高いアルミニウム板である。加熱は、直流安定化電源 ( $I_{max}=300A$ ,  $V_{max}=60V$ ) を用いて加熱部を直接通電加熱した。熱流束は、加熱部上下端の電位差と電流値を計測し算出した。なお、流路間隙  $s$  は 3 mm と 5 mm の2通りで実施した。ポリカーボネイトは中性子散乱体である水素を含有するため、中性子ラジオグラフィ画像上に散乱中性子成分として重畳し、可視・計測に悪影響を及ぼす。そこで本実験では、テスト部からの散乱中性子成分の低減とテスト部の放射化低減のため、図2に示すようにビームシャッターとテスト部の間にボロンラバーもしくは弗化リチウムタイルで中性子ビームのマスキングを行った。このマスキングには検査空間のみに中性子が通過するように穴がけられている。このマスキングがない場合、テスト部中央で散乱中性子の影響が大きくなる傾向があることが予備実験から分かっている。

本実験の熱流動計測誤差は、入口水温  $T_{in}$  が  $\pm 1^{\circ}C$ 、質量速度  $G$  が  $\pm 5\%$ 、出口圧力は大気圧近傍と見積もられる。本テスト部は加熱部内ポイド率を高精度で測定するため断熱材を加熱部周囲に施していない。このため熱流束の誤差評価を行う際に、テスト部から外部への熱の漏洩を考慮する必要があった。入口条件と印加熱量から出口水温を求め、計測した出口水温とを比較した結果計測誤差の範囲内で一致したため、印加熱量の 98%以上が核沸騰熱伝達により流体側に流入し、熱伝導による放熱は 2%以下と見積もられる。

### 3.2 実験方法

実験方法は、(A) 入口条件を固定し、熱流束をステップ状に上昇させる「熱流束上昇実験」、(B) 入口水温と印加熱流束を固定し、質量速度をステップ状に低下させる「流量低下実験」の2通りで行った。

また、以下に中性子ラジオグラフィ画像を記録するまでの手順を示す。

- (1) テスト部を照射室内に固定した後、撮像系の設定を決定した。
- (2) 気相充満画像  $B_g$  を記録した。

- (3) テスト部に水を流し、所定の入口水温になったら液相充満画像  $B_f$  を記録した。これら  $B_g$ 、 $B_f$  画像から  $\Sigma$  スケーリング法によりオフセット情報  $B_0$  を決定することが可能となる。
- (4) 熱流束上昇実験(A)では、熱流束をステップ状に上昇し、熱流束が一定の期間内で沸騰二相流画像  $B_m$  を各熱流束毎に記録した。流量低下実験(B)では、質量速度をステップ状に低下させ、質量速度が一定の期間内で沸騰二相流画像  $B_m$  を各質量速度毎に記録した。

本実験では、中性子ラジオグラフィ法でボイド率がどの程度、またどの範囲で定量化可能であるかを検討するため予備実験を実施した。予備実験は、入口水温、質量速度、熱流束のおおよそどの範囲で沸騰気泡が観察可能であるかを把握することを目的として実施した。その結果、質量速度  $240\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  以上の場合、入口水温が  $70^\circ\text{C}$  以下で中性子ラジオグラフィ画像上で輝度変化が見られないためボイドの認識が困難であった。また、質量速度が  $3000\text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  以上の場合、入口水温が  $95^\circ\text{C}$  以上であっても同様な理由でボイド率計測が困難であると思われた。予備実験の結果をふまえ、ボイド率計測のための入口条件を以下のように決定した。

- (1) 入口水温  $T_{in}$  :  $70^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$
- (2) 質量速度  $G$  :  $240\text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}) \sim 2000\text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

図6に入口水温が  $90^\circ\text{C}$  でのボイド率計測実験における熱流束範囲を一例として示す。図中の○は限界熱流束を表している。また、図中の斜線部分で中性子ラジオグラフィ観察により沸騰が確認されたので、この斜線部分で記録した沸騰二相流画像を画像処理しボイド率を算出した。図6に示すように、ボイド率計測範囲のほとんどの領域がサブクール沸騰領域、すなわち加熱部内でのバルク水温が飽和温度以下である。

なお、本中性子ラジオグラフィ法を用いたボイド率計測の計測誤差は  $10\%$  以内であると見積もられる。(詳細は4.7節に記す)

## 4. 実験結果

### 4.1 高時間分解能中性子ラジオグラフィによるサブクール沸騰の可視化観察

本実験では、高速度ビデオを用いて流動の可視化とボイド率計測実験を実施した。高速度ビデオを用いた理由は、(1) 強制流動沸騰時の気泡挙動の把握、特に限界熱流束時の気泡挙動を把握するため、また(2) 時間平均ボイド率を算出するための非定常性(周期性)に関する情報を得るためである。図7は1125フレーム/秒で記録した画像を用いて得られた限界熱流束条件( $G=2000\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $T_{\text{in}}=90^\circ\text{C}$ ,  $q=1.6\text{MW}/\text{m}^2$ )での瞬間ボイド率分布を示している。図中の黒○で囲まれた領域のように、比較的小さいサブクール度条件では小気泡が合体して比較的大きなスラグ気泡が形成されることが分かった。このようにサブクール沸騰条件下で気泡は変形・合体を繰り返しながら上昇する様子が観察された。また、本条件では沸騰時の流動に約10msの周期性があることが分かった。この周期は、質量速度が低いほど、また熱流束が大きいほど長くなる傾向があった。バーンアウトは、気泡が最も大きく加熱面上に広がったときに発生し、発生位置は加熱部出口端であった。

観察結果から、時間平均ボイド率を算出する際に必要となる画像は、少なくとも100ms以上の時間幅で平均化する必要があることが分かった。時間平均ボイド率を算出するために必要な画像枚数は流動様式により変わるが、1125フレーム/秒で記録した場合、数100枚(数100msの時間平均)～数1000枚(数秒の時間平均)の範囲が適切であると見積もられた。以後、時間平均ボイド率を求めるための $B_g$ ,  $B_f$ ,  $B_m$ は、流動様式毎に適切な平均化枚数を決定しその枚数分の画像を平均化して求めた値を示すことにする。

### 4.2 ボイド率分布

図8に時間平均ボイド率分布を計測した結果を2次元表示したものと、流路中心線上での軸方向ボイド率分布を示す。図9に加熱部出口断面でのボイド率分布を、熱流束をパラメータとして表示した結果を示す。本計測法により、時間平均局所ボイド率分布が定量的に計測可能であることが分かる。図8や図9の条件では、横方向断面でのボイド率分布が鞍型分布となっている。これは加熱部横両端の方が流路中心線より沸騰気泡の発生量が多い事を示している。この鞍型分布となる理由として、2次流れの影響が考えられる。横方向断面でのボイド率分布は入口水温や熱流束により変化する。以下に、熱流束、入口水温、質量速度のボイド率分布への影響を調べた結果を記す。

### 4.3 ボイド率に及ぼす熱流束の影響

図10に、流路間隙  $s$  が 5mm、入口水温  $T_{in}$  が 90℃、質量速度  $G$  が 600kg/(m<sup>2</sup>s)の条件下で熱流束  $q$  とボイド率分布の関係を調べた結果を示す。計測した熱流束条件は、図10(A)に示す範囲である。熱流束の変化がボイド率の空間分布に及ぼす影響を調べた結果 ( $q=0.7\text{MW/m}^2$  と  $q=0.9\text{MW/m}^2$ ) を図10(B)に示す。また、熱流束の上昇とともに変化するボイド率分布を2次元擬似カラー表示した結果を図10(C)に示す。図10(B)(C)の  $q=0.9\text{MW/m}^2$  での測定結果から流れ方向のボイド率分布は、正味沸騰開始位置では加熱部横両端から蒸気が多く発生し鞍型分布となっているが、下流では気泡は流路中心方向に向かって合体し中心ピーク分布に変化することが分かる。加熱部出口での横方向ボイド率分布は、熱流束の上昇とともに図10(D)に示すように変化する。この図から熱流束とともに加熱部上でのボイド率は、鞍型分布から中心ピーク分布に変形しながら値が上昇することが分かった。図11に質量速度  $G$  が 2000kg/(m<sup>2</sup>s)で得られた結果を図10と同様に示す。図11の実験条件では、実際にバーンアウトが  $q=1.75\text{MW/m}^2$  で生じている。図10(D) ( $G=600\text{ kg/(m}^2\text{s)}$ ) と図11(C) ( $2000\text{kg/(m}^2\text{s)}$ ) の結果を比較してみると、図11の条件の方が図10の条件に比べ、最高計測熱流束が2倍程度大きいのにボイド率は1/2程度である。この比較結果では、質量速度がボイド率に及ぼす影響が顕著に現れている。

### 4.4 ボイド率に及ぼす質量速度の影響

上記比較では熱流束が図10と図11条件で異なるため質量速度のボイド率への影響は単純に比較できなかった。そこで、流量低下実験(B)の手順でボイド率に及ぼす質量速度の影響を調べた結果を図12に示す。図12(A)に示すように質量速度  $G$  を 2000kg/(m<sup>2</sup>s) から 1000kg/(m<sup>2</sup>s)毎に低下させ、ボイド率分布を計測した結果を図12(B)に示す。図12(B)および加熱部出口断面でのボイド率分布を示す図12(C)から、 $G=2000\text{kg/(m}^2\text{s)}$  から  $G=1900\text{kg/(m}^2\text{s)}$ の間で蒸気発生量が急激に増加しており、 $G=1900\text{kg/(m}^2\text{s)}$ 以下では変化が小さくなっていることがわかる。

熱流束-質量速度グラフ上に加熱部出口での加熱部断面平均ボイド率  $\langle \alpha_H \rangle_{ex}$  を等値線表示した結果を図13に示す。図中の○は、ボイド率計測点を表している。ここで、加熱部断面平均ボイド率  $\langle \alpha_H \rangle_{ex}$  とは、加熱部幅  $w$  と流路間隙  $s$  の積で計算される矩形領域内の平均ボイド率を表す。本報内では加熱部断面平均ボイド率と区別するため、流路幅  $b$  と流路間隙  $s$  の積で計算される矩形領域内の平均ボイド率を流路断面平均ボイド率と呼び  $\langle \alpha_C \rangle_{ex}$  と記す。図14に代表的な分布での  $\langle \alpha_H \rangle_{ex}$ 、 $\langle \alpha_C \rangle_{ex}$  と局所ボイド率の最高値  $\alpha_{max}$  を示す。 $\langle \alpha_H \rangle_{ex}$  は加熱部上に形成される蒸気相の平均厚さを概算する際に適し、 $\langle \alpha_C \rangle_{ex}$  は熱平衡クオリティとの関係を明らかにする際に必要となり、また  $\alpha_{max}$  はバーンアウトの機構論的モデルを検討し考案する際に重要な値である。図13から、以下の点が明らかとなった。

- (1) 加熱部出口での正味の蒸気蓄積開始熱流束は、質量速度に対し線形に増加する。この勾配は、図13の条件では出口飽和条件 ( $X_{ex}=0$ ) の勾配のおよそ1/8程度であった。

- (2) 質量速度が小さいサブクール沸騰領域内では、出口飽和条件近くで急激なボイド率上昇が生ずる。しかし、質量速度が大きくなるにつれ熱流束のボイド率への影響は小さくなり低ボイド率でバーンアウトに至るようになる。

#### 4.5 ボイド率に及ぼす入口水温の影響

本実験のほとんどの条件で加熱部内バルク水温が飽和温度以下であるため、加熱壁面近傍で生じるサブクール気泡は入口水温の影響を強く受け凝縮することが予想された。図15(A)に入口水温を80℃、85℃、90℃と変えた場合でのボイド率分布を、図15(B)に出口断面でのボイド率分布を、入口水温をパラメータとして示す。図15から、ボイド率は飽和温度に近いほど急激に増加する傾向があることがわかった。また、本実験の質量速度範囲内では、入口水温が80℃以下になると最大局所ボイド率値 $\alpha_{max}$ が0.1以下であった。低ボイド率領域では、中性子の減衰特性が指数関数であるという原理的が特性から、時間平均ボイド率の計測誤差が大きくなる。

#### 4.6 熱平衡クオリティと流路断面平均ボイド率の関係

計測したボイド率を熱工学設計等に役立たせる手法として、流路断面平均ボイド率を入口からの距離 $z$ ではなく熱平衡クオリティ $x_{eq}$ の関数として整理し、実験式やプロフィールフィットモデルの形で解析コード等に組み込む手法が多くとられている。

図16に流路断面平均ボイド率 $\langle \alpha_c \rangle$ を熱平衡クオリティ $x_{eq}$ の関数とし、熱流束 $q$ をパラメータとして整理した結果を示す。熱平衡クオリティは熱バランスを表す式であり、マイナス値に計算される場合は検査位置で未飽和温度、0から1までの値に計算される場合は飽和温度となっていることを表す熱工学的に重要な物理量である。本テスト部では次式で計算される。

$$x_{eq} = \left( \frac{w \cdot z}{b \cdot s} \right) \left( \frac{q}{G \cdot H_{fg}} \right) - \left( \frac{\Delta H_i}{H_{fg}} \right) \quad (14)$$

ここで $H_{fg}$ は蒸発熱を、 $\Delta H_i$ は入口サブクーリング(= $H_s - H_i$ )を表す。

本実験で計測したボイド率データから以下のような特徴や物理量が得られた。

- (1) 熱流束とともに変化する軸方向ボイド率分布を熱平衡クオリティの関数として整理できた。得られた軸方向の分布形状は、円管内での分布形状と類似していることがわかった。
- (2) 図16中の矢印で示される $x_d$ は、熱流束 $q$ が1.6MW/m<sup>2</sup>(バーンアウト熱流束)での正味沸騰開始位置の熱平衡クオリティを示している。 $x_d$ 値がボイド率分布に及ぼす影響は大きく、ボイド率の予測を行う際に真のクオリティ分布と並んで重要な物理量である。この $x_d$ 値を境に、下流側でサブクール気泡の蓄積が始まり断面平均ボイド率が増加する。しかし、従来のボイド率予測法を予備検討した際、モデル中で計算される物理量の中で最も実験式の拡張性に疑問がもたれた値であった。この $x_d$ 値は実験体系によって変わる



可能性があるため、実験によりデータベースを整備することがボイド率分布を評価するうえで重要である。本実験では、この  $x_d$  値をボイド率-熱平衡クオリティグラフ上の沸騰開始後のほぼ直線の上昇を示す範囲のデータを用いて1次の最小二乗フィットにより求めた。本方法で求めた  $x_d$  値は熱流束にほとんど依存していないことがわかった。また、 $G$  が大きいほど  $x_d$  値は小さくなる傾向があった。

本研究により、現在まで計測が困難とされていた狭間隙矩形流路内ボイド率を、中性子ラジオグラフィ法を用いて計測でき、熱平衡クオリティの関数として整理できた。また正味沸騰開始位置での熱平衡クオリティ  $x_d$  が求められることを示せた。

計測データと既存の円管用予測法との比較や適用可能性に関する検討は、別報に記すこととし、最後にボイド率の計測誤差に関して考察する。

#### 4.7 計測誤差に関する考察

本ボイド率計測法は、中性子ラジオグラフィ画像の輝度階調度の違いを利用してボイド率を求める方法である。コンバータ上の輝度はアナログ値であるが、高速度ビデオで記録された後は、計測データはデジタル化され利用される。このデジタル化の際に画像階調度に応じた誤差が発生する。本システムでは8bit (256 階調) にデジタル化されるが、実際には散乱中性子成分やオフセット成分が画像データに重畳されているため256階調が有効に利用できる場合はまれである。本実験では、撮像系のゲインを事前に調整し最大階調度差が得られるように調整を行っているが、日引・三島<sup>6)</sup>による画像階調度に起因する計測誤差解析を本データ解析に適用し誤差評価を行ったので、これを以下に記す。

##### 日引らによる画像階調度に起因する計測誤差解析

本解析では、輝度信号のノイズ、画像シェーディングのない理想的な撮像系を仮定し、散乱中性子の寄与を考えないものとする。

輝度  $B$  は、中性子の減衰方程式をもとに以下のように記される。

$$B = C \cdot \exp(-\Sigma\delta) + B_0 \quad (15)$$

高速度ビデオ内で行われるデジタル化によって輝度値は計測対象物厚さに対して階段状に変化する。すなわち、ある幅の計測対象物厚さの示す輝度値が同一となることから、輝度情報から対象物厚さを決定する際、対象物厚さにはある幅の不確実性が存在する。式(15)中の  $C, B_0$  は、対象物厚さ  $\delta$  が流路間隙を  $\delta_c$  と等しいとき ( $\delta = \delta_c$ ) の輝度値を  $B_{low}$ 、 $\delta = 0$  のときの輝度値を  $B_{upp}$  とすると次式で表される。

$$C = \frac{B_{low} - B_{upp}}{\exp(-\Sigma\delta_c) - 1} \quad (16)$$

$$B_0 = \frac{B_{upp} \cdot \exp(-\Sigma\delta_c) - B_{low}}{\exp(-\Sigma\delta_c) - 1} \quad (17)$$

式(15)を変形し、対象物厚さを求めると次式となる。

$$\delta = \frac{1}{\Sigma} \ln\left(\frac{C}{B - B_0}\right) \quad (18)$$

また、対象物厚さの分解能の輝度値依存性は次式で表される。

$$\Delta\delta = \delta_i - \delta_{i+1} = \frac{1}{\Sigma} \ln\left(\frac{B_{i+1} - B_0}{B_i - B_0}\right) \quad (19)$$

したがって、階調度に起因する計測誤差 $E_i$ の輝度値依存性は次式で表される。

$$E_i = \frac{\Delta\delta}{\delta_i} = \frac{\delta_i - \delta_{i+1}}{\delta_i} = \frac{\ln\left(\frac{B_{i+1} - B_0}{B_i - B_0}\right)}{\ln\left(\frac{C}{B_i - B_0}\right)} \quad (20)$$

上記の解析から明らかなように、輝度値 $B_i$ は整数値のみをとる。

図17に、数値解析により計測誤差をボイド率の関数として算出した結果を示す。図17から、本実験で計測された最大ボイド率はおよそ0.7であるため階調度に起因する計測誤差は2%程度と見積もられる。

階調度に起因する計測誤差以外の計測誤差要因として散乱中性子成分の評価がある。以下の方法で、散乱中性子のテスト部への入射量が少ないことを確認した。

- (1) 予備的な検討により、テスト部とシャッターの間に設置したマスク板がテスト部への散乱中性子を減らす効果があることが分かった。
- (2)  $\Sigma$ スケージング法で求まるオフセット値 $B_0$ の空間分布を調べ、オフセット値が空間的に均一であることを確認した。散乱中性子が中性子ラジオグラフィデータに含まれている場合、予備的な検討からオフセット値の分布が非均一となり散乱中性子の存在が確認できる。

本実験における空間解像度は0.6mm/pixel以下であり、ボイド率計測誤差を評価すると、階調度に依存する誤差が3%以内、画像のぼけや8近傍平滑化時に発生する誤差が2%以下、散乱中性子成分や計測器のドリフト特性等定量化が困難な誤差が5%以下と見積もられ総合的には10%以内と見積もられる。

## 5. 結 言

従来計測が困難とされていた狭間隙矩形流路内サブクール沸騰流中のボイド率分布を、中性子ラジオグラフィにより非接触で計測する技術を確立した。本システムの特徴を以下に記す。

- (1) 高速度ビデオを撮像系として用いることにより、1125 フレーム/秒の高時間分解能で流動様式を観察でき、また時間平均化に必要な時間スケールを流動様式別に決定できた。
- (2) 時間平均ボイド率の2次元分布を空間解像度が0.6mm/pixel以下で計測できた。
- (3) 画像情報を全てデジタル処理することにより画像の劣化を無くし、ボイド率が10%以内の誤差で計測可能であることを示した。

また、ボイド率データの蓄積ができ、計測したボイド率データから以下の事がわかった。

- (1) 時間平均ボイド率の2次元分布を計測することにより、サブクール沸騰気泡の発生位置がわかった。
- (2) システムパラメータである熱流束、質量速度及び入口水温がボイド率分布に及ぼす影響を明らかにした。
- (3) 流路断面平均ボイド率と熱平衡クオリティの関係を調べ、軸方向のボイド率分布から正味の沸騰開始位置での熱平衡クオリティが決定できた。

## 謝 辞

本中性子ラジオグラフィ実験を実施するにあたり、実験にご協力いただいた炉工学施設管理室の渡辺博典氏、佐藤隆氏、根本裕之氏、小松正夫氏、安藤均氏に謝意を表す。また、助言をいただいた京都大学三島嘉一郎教授、日引俊助教授に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Mishima, K. and Hibiki, T : Nucl. Sci. Eng., 124, 327(1996).
- 2) Hibiki, T., Mishima, K. and Nishihara, H. : Nuc. Instrum. Methods Phys. Res., A, 399, 432(1997).
- 3) Hibiki, T., Mishima, K. and Nishihara, H. : J. Nucl. Sci. Technol., 34, 10, 996(1997).
- 4) Mishima, K. etc. : Nucl. Eng. Des. (1998)(accepted).
- 5)日引・三島 : 日本機械学会論文集, B, 62, 595, 919(1996).
- 6)日引・三島 : 日本機械学会論文集, B, 62, 597, 1781(1996).

## 使用記号

$b$	流路幅	[m]
$B$	輝度	[-]
$B_d$	暗電流項	[-]
$B_{low}$	液相充満時の輝度	[-]
$B_{upp}$	気相充満時の輝度	[-]
$B_0$	オフセット値	[-]
$C$	比例定数	[-]
$d$	横方向位置	[m]
$D$	ダイバージェント型コリメータの開口部の直径	[m]
$G$	質量速度	[kg/(m <sup>2</sup> s)]
$H_{fg}$	蒸発熱	[J/kg]
$\Delta H_i$	入口サブクーリング	[J/kg]
$l$	加熱流路長	[m]
$L$	ダイバージェント型コリメータの全長	[m]
$L'$	テスト部とコンバータの距離	[m]
$q$	熱流束	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$	空間解像度	[m/pixel]
$s$	流路間隙	[m]
$t$	厚さ	[m]
$T_{in}$	入口水温	[°C]
$U_g$	入射中性子ビームの非平行度に起因する画像のぼけ	[m]
$w$	加熱幅	[m]
$x_{eq}$	熱平衡クオリティ	[-]
$x_{ex}$	加熱部出口での熱平衡クオリティ	[-]
$x_d$	正味の沸騰開始位置での熱平衡クオリティ	[-]
$z$	加熱部入口からの流れ方向距離	[m]

## ギリシャ文字

$\alpha$	局所ボイド率	[-]
$\alpha_{CL}$	流路中心線上のボイド率	[-]
$\alpha_{ex}$	加熱部出口断面のボイド率	[-]
$\langle \alpha_C \rangle$	流路断面平均ボイド率	[-]
$\langle \alpha_H \rangle$	加熱部断面平均ボイド率	[-]
$\delta$	厚さ	[m]

$\delta_c$	流路間隙	[m]
$\Delta\delta$	対象物厚さの分解能	[m]
$\phi$	中性子束	[n/m <sup>2</sup> s]
$\Sigma$	熱中性子に対する巨視的断面積	[1/m]

**添字**

<i>ex</i>	加熱部出口での値
<i>f</i>	液相単相流
<i>g</i>	気相単相流
<i>i</i>	階調度
<i>m</i>	沸騰二相流
<i>mf</i>	二相流中の液相
<i>mg</i>	二相流中の気相
<i>max</i>	最大値
<i>p</i>	透過中性子成分
<i>sm</i>	テスト部内での散乱
<i>ss</i>	周辺の生体遮蔽からの散乱
<i>t</i>	テスト部
<i>th</i>	入射中性子束

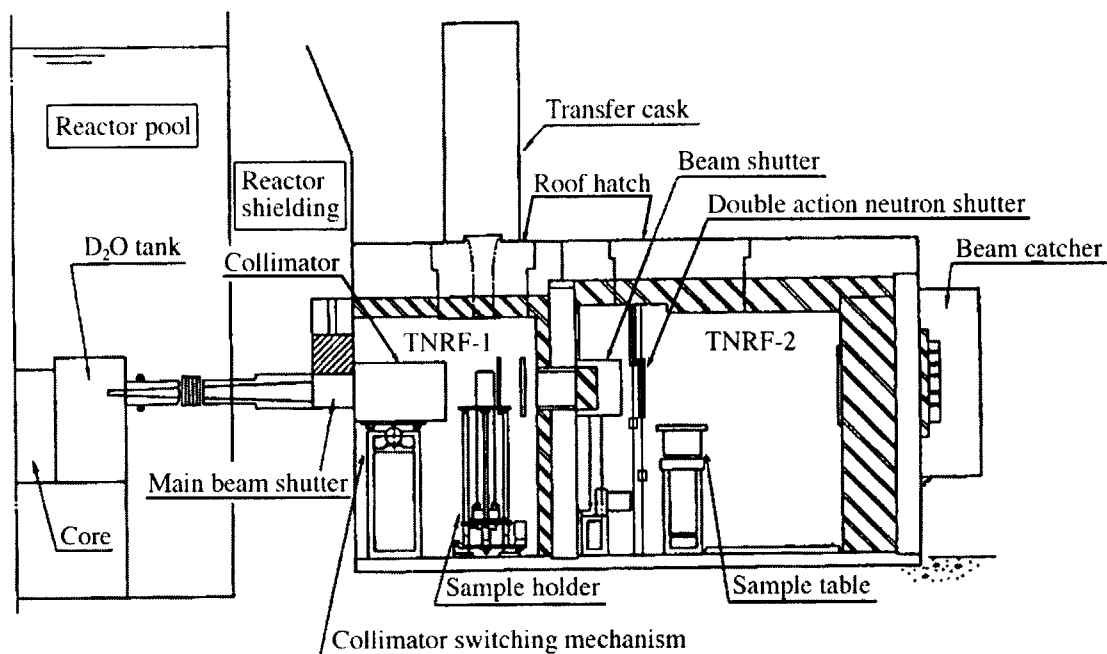


図1 JRR-3M 熱中性子ラジオグラフィ実験施設(TNRF)の概略図

表1 JRR-3M 熱中性子ラジオグラフィ実験施設の特性

Room	Neutron flux (n/cm <sup>2</sup> s)	Cd ratio	γ dose rate (Sv/h)	Collimator ratio* L/D	Radiographic field size Height (mm) x Width (mm)
TNRF-1	2.6 x 10 <sup>8</sup>	81	—	H: 132 V: 114	432 x 115
TNRF-2	1.5 x 10 <sup>8</sup>	130	2.16	H: 176 V: 153	305 x 255

\*The values in the column for the TNRF-1 were calculated by using the results for the TNRF-2 with geometrical corrections.

表2 高速度撮像系の仕様

High frame rate television camera	FASTCAM-ultima-UV3 made by Photron Ltd.		
	Memory capacity	320 Mbyte	
	Lens mount	C mount	
	Imaging sensor	Solid state imaging device	
	Recording speed (frames/s)	Full frame mode	30, 60, 125, 250, 500, 750, 1125, 2250, 4500
		Segmented frame mode*	9000, 13500, 18000, 27000, 40500
	Image size (pixels)	Full frame mode	256 x 256
Segmented frame mode*		256 x 128, 128 x 128, 256 x 64, 128 x 64, 64 x 64	
Data depth	8 bit		
Image Intensifier	C6276MOD made by Photron Ltd.		
	Proximity focused image intensifier	Photocathode: S20, Phosphor: P46	
	Inverter type image intensifier	Photocathode: S20, Phosphor: P24	

\*Each image size corresponds to the recording speed in the same order.

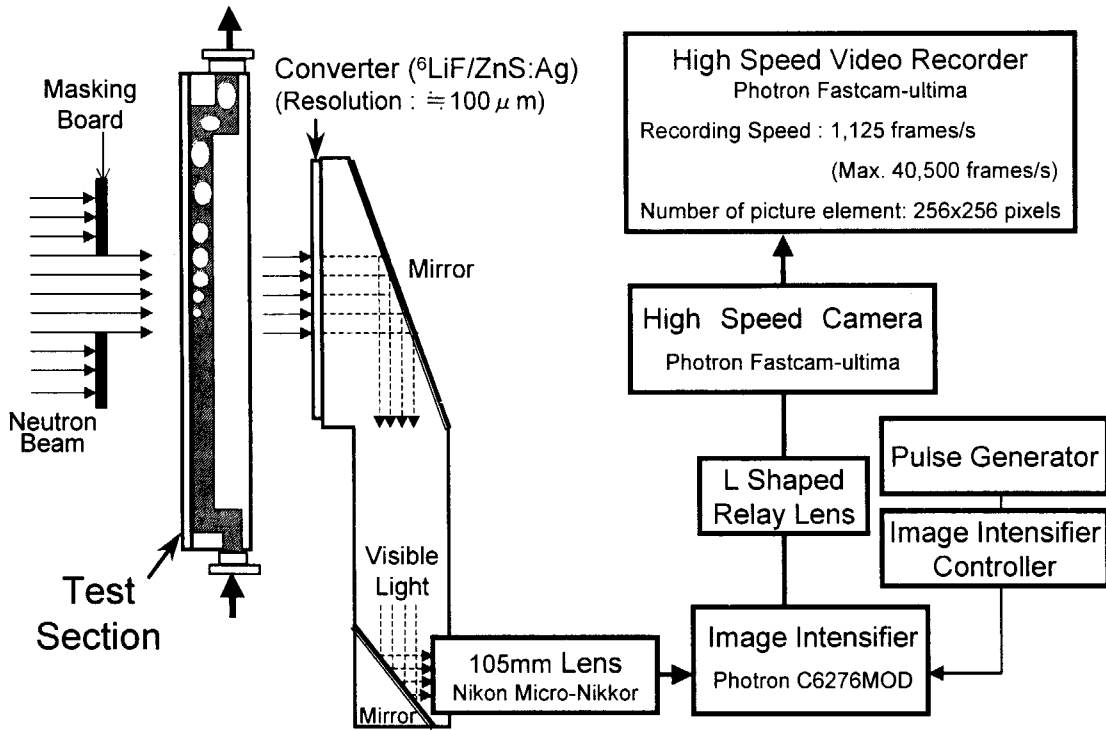


図2 中性子ラジオグラフィ高速度撮像システム

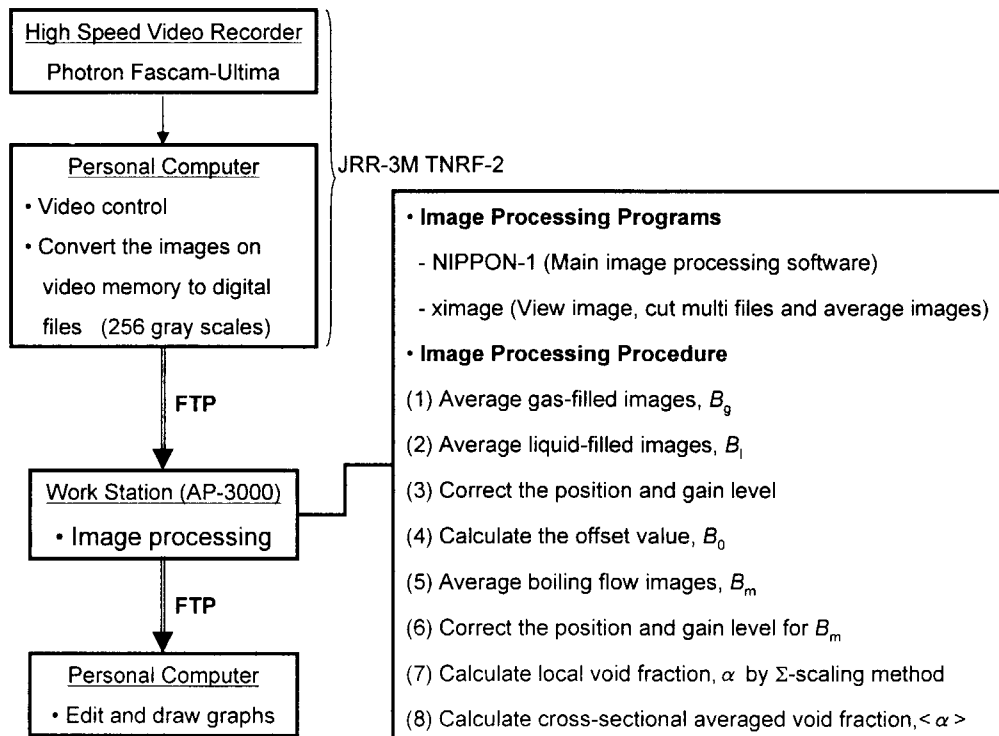


図3 画像処理システム



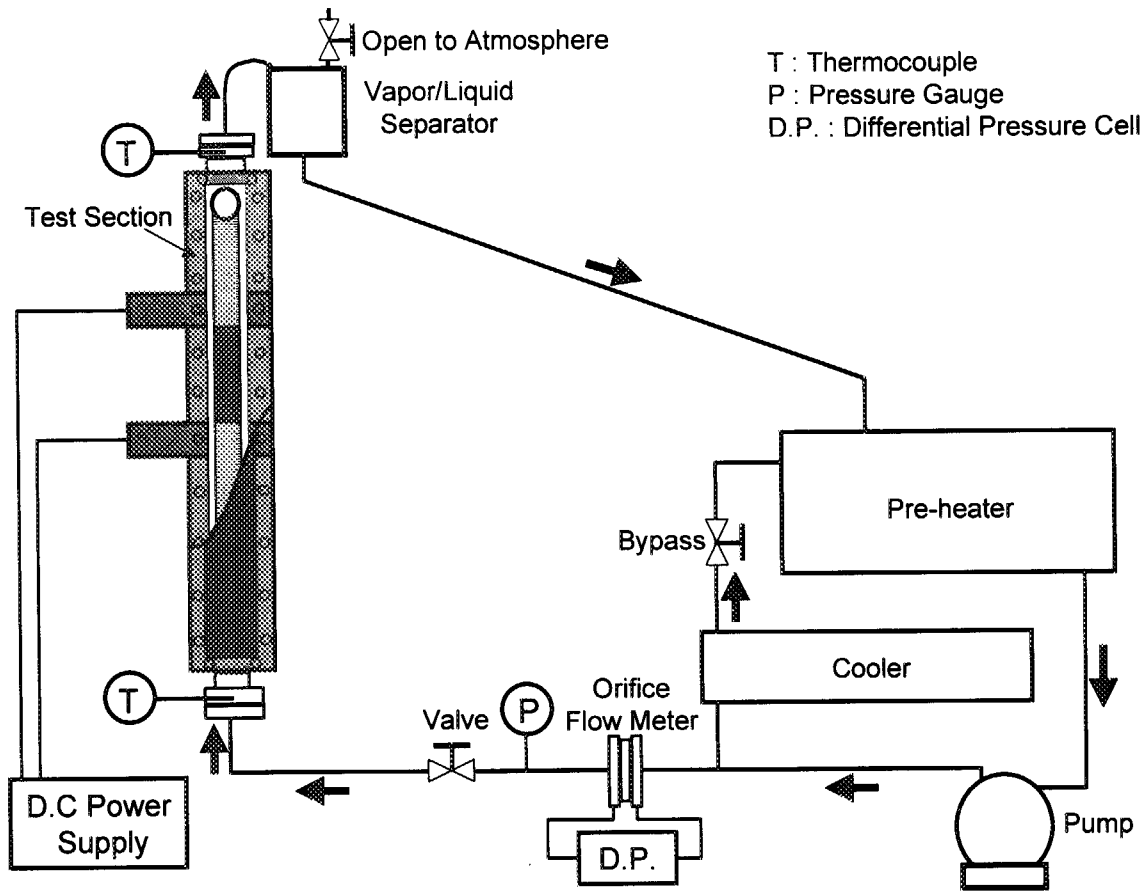


図4 実験ループの概略図

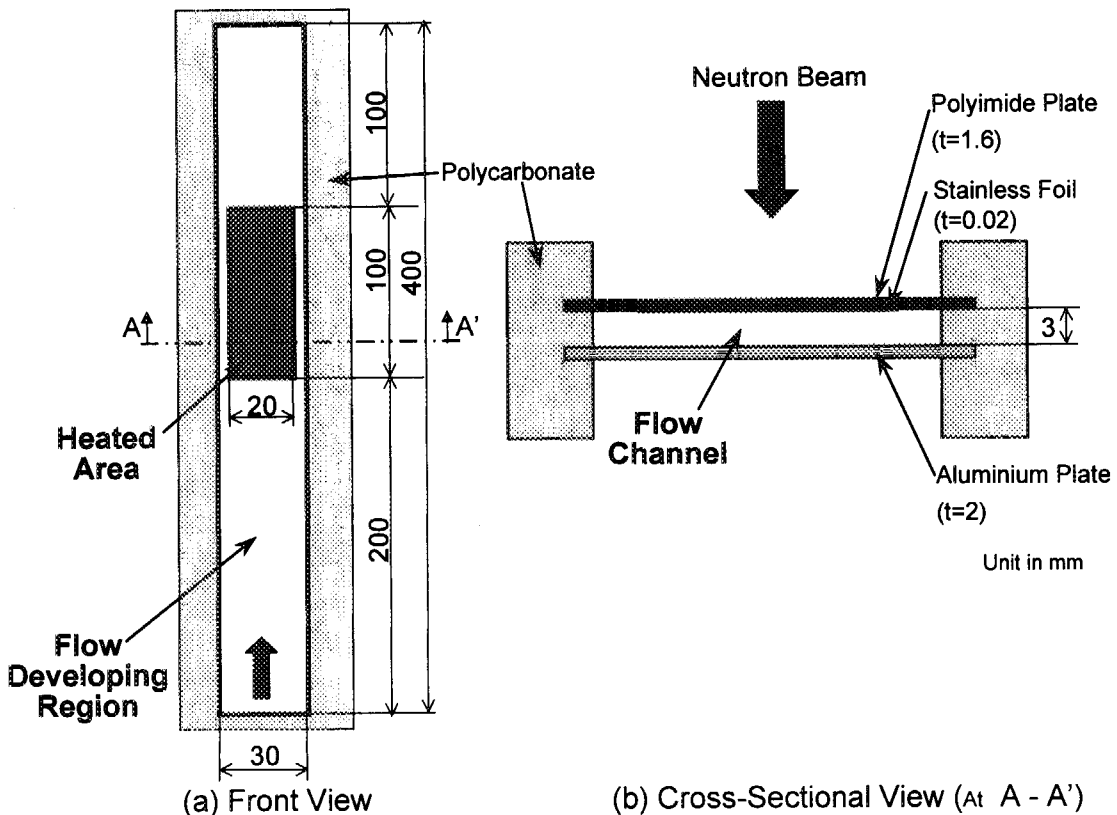


図5 中性子ラジオグラフィ用テスト部の概略図 (流路間隙 : 3 mm)

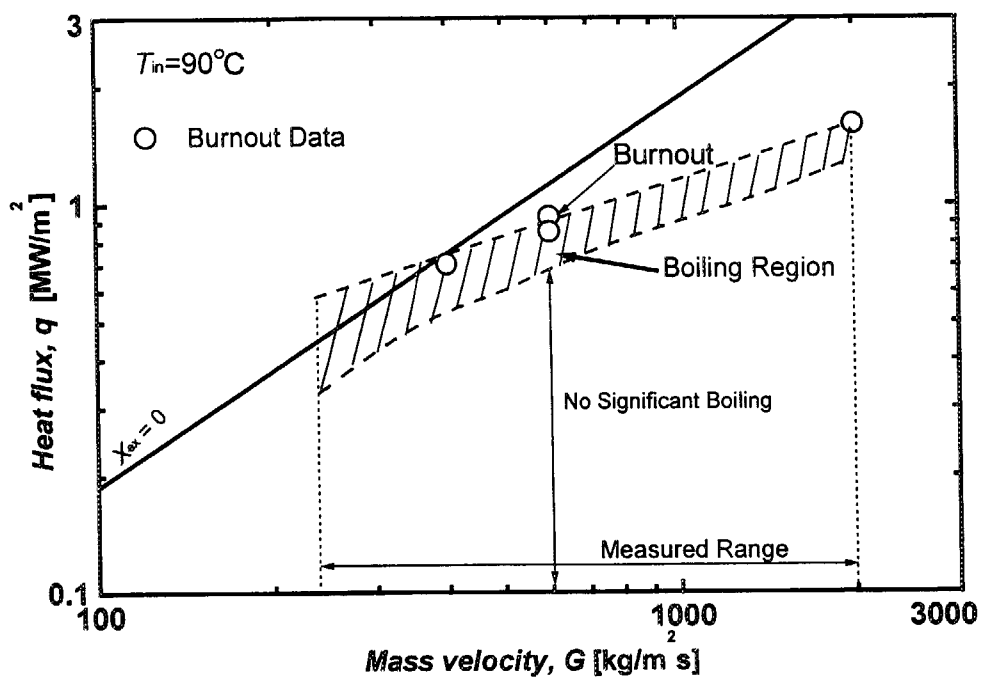


図6 中性子ラジオグラフィによるボイド率計測範囲 ( $s=3\text{mm}, T_{in}=90^\circ\text{C}$ )

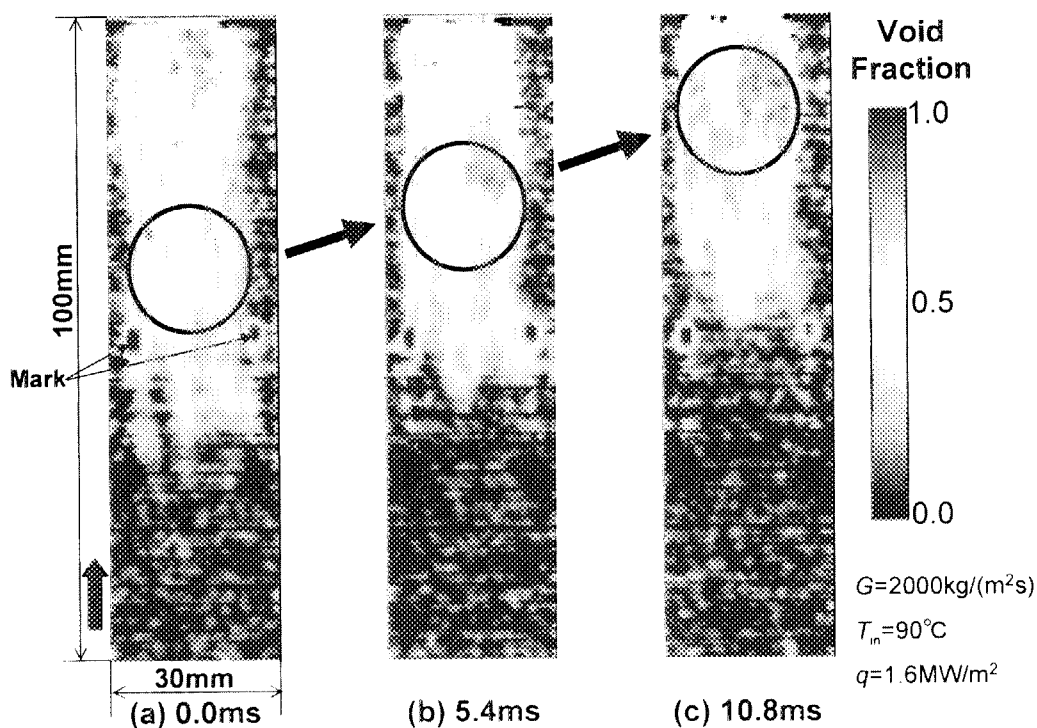


図7 高速度撮像中性子ラジオグラフィによるサブクール沸騰画像 ( $s=3\text{mm}, 1125\text{ frames/s}$ )

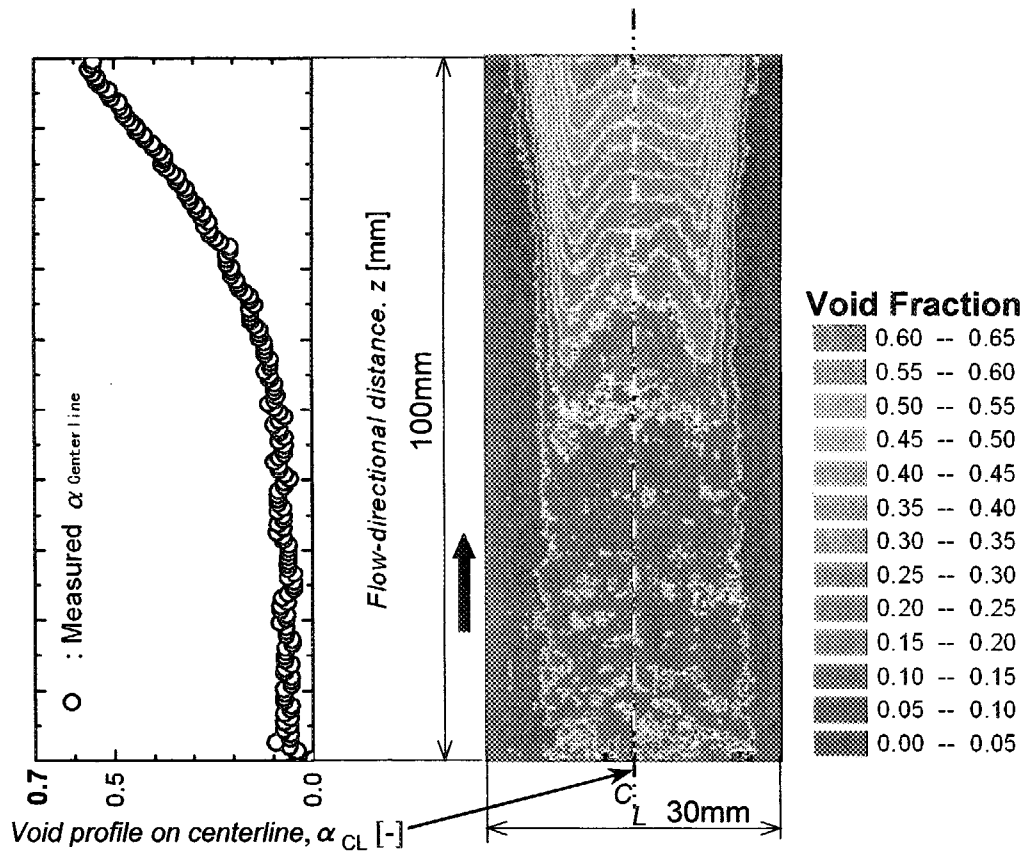


図8 時間平均ボイド率分布( $s=3\text{mm}$ ,  $G=400\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $T_{in}=90^\circ\text{C}$ )

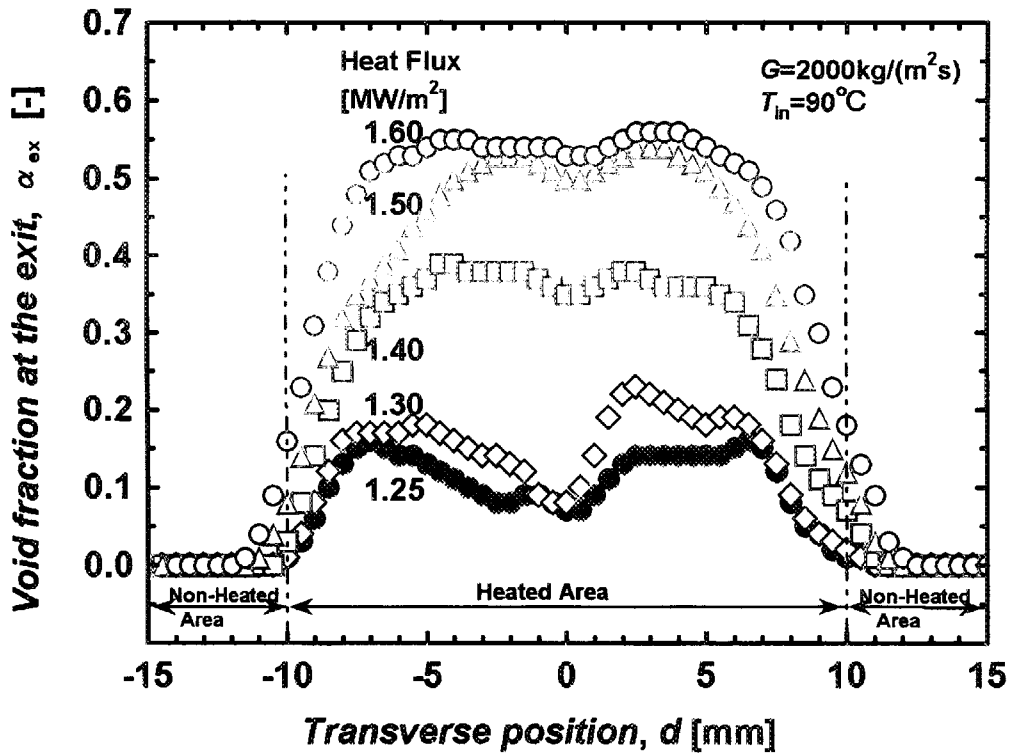
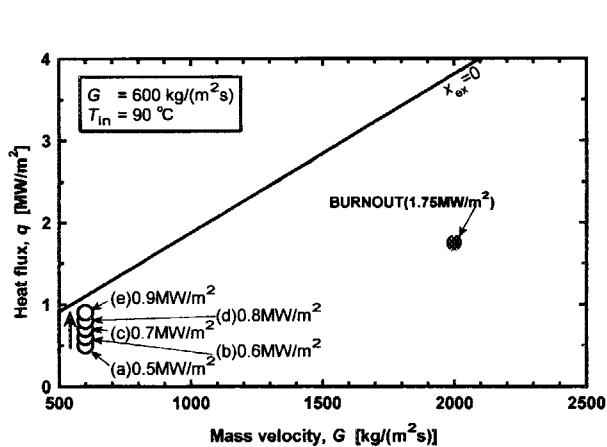
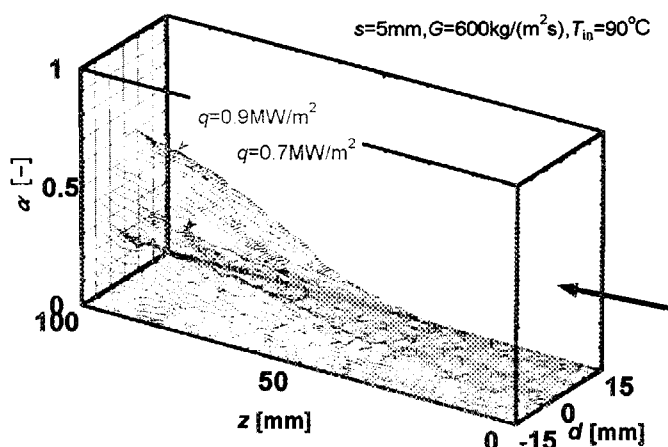


図9 加熱部出口でのボイド率分布

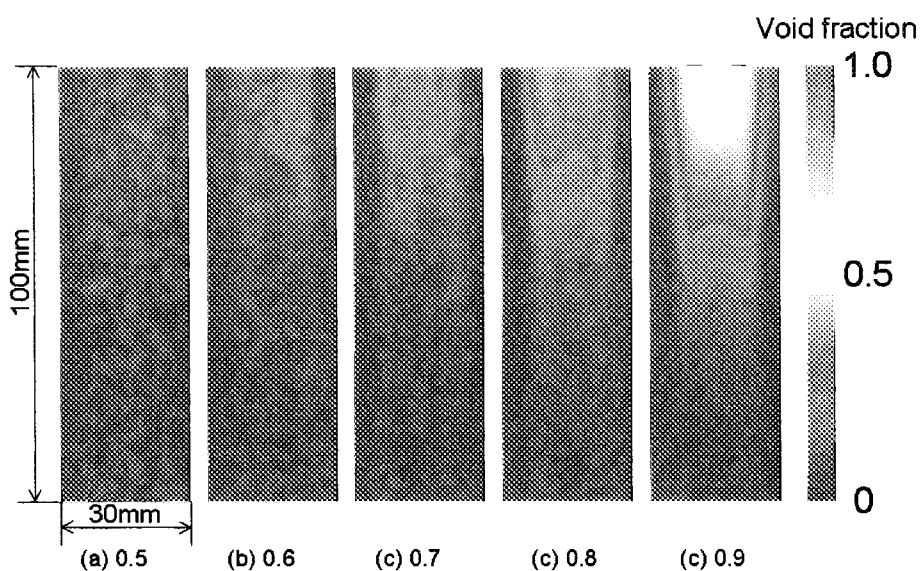
This is a blank page.



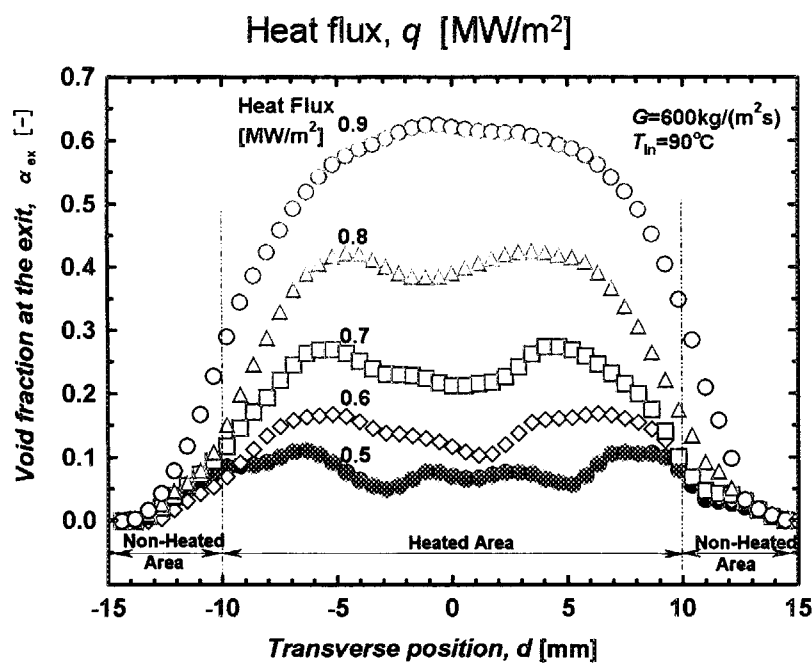
(A) 実験条件



(B) ボイド率の空間分布



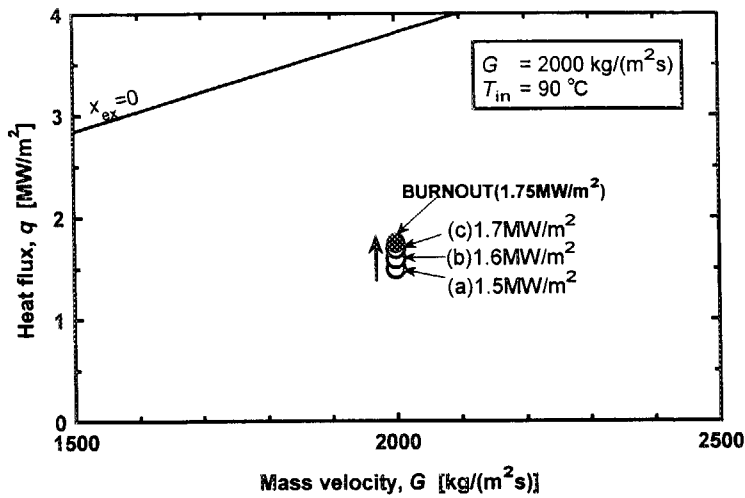
(C) ボイド率分布



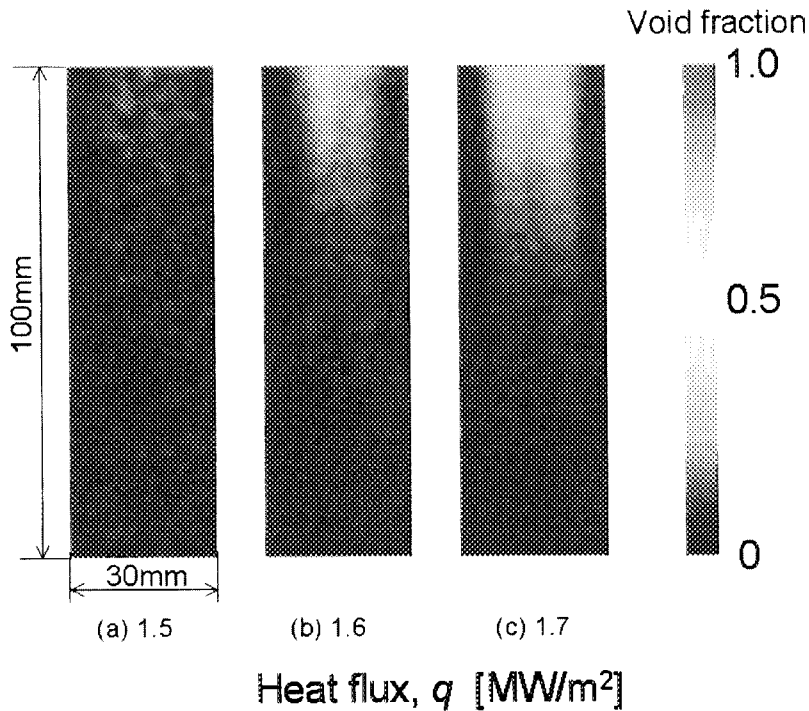
(D) 出口ボイド率分布

図 10 ボイド率に及ぼす熱流束の影響 ( $s=5\text{mm}$ ,  $T_{in}=90^\circ\text{C}$ ,  $G=600\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ )

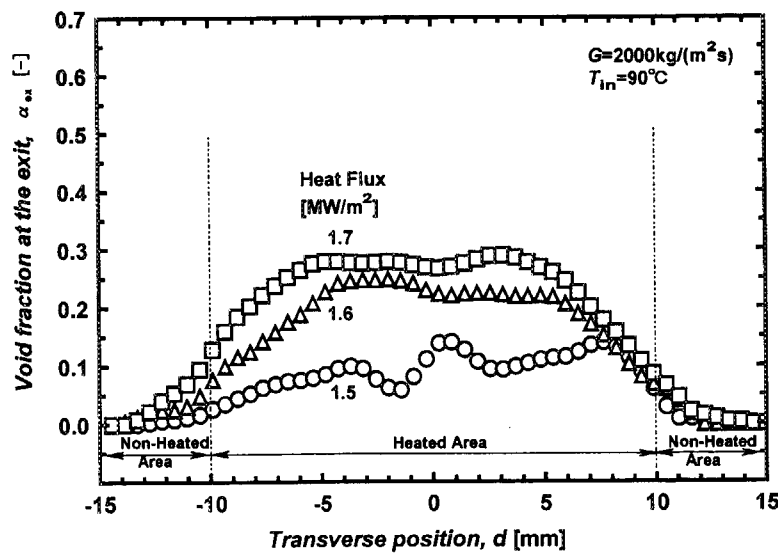
This is a blank page.



(A) 実験条件

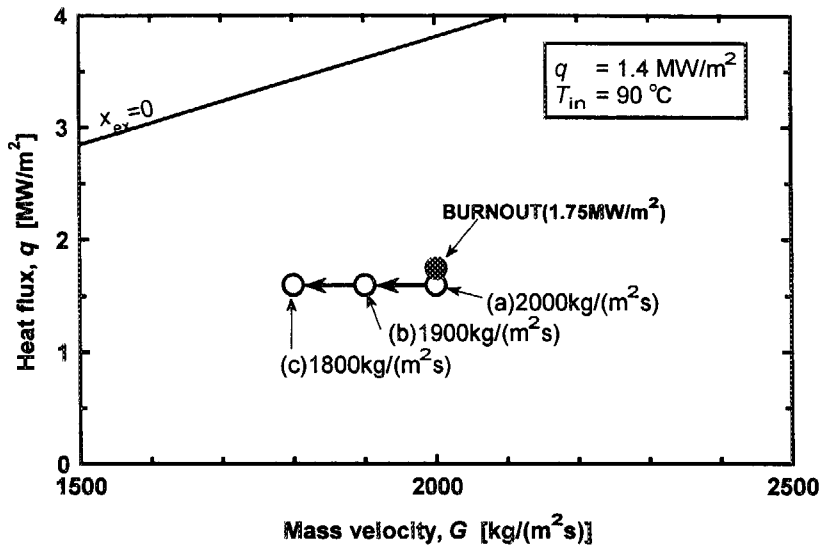


(B) ボイド率分布

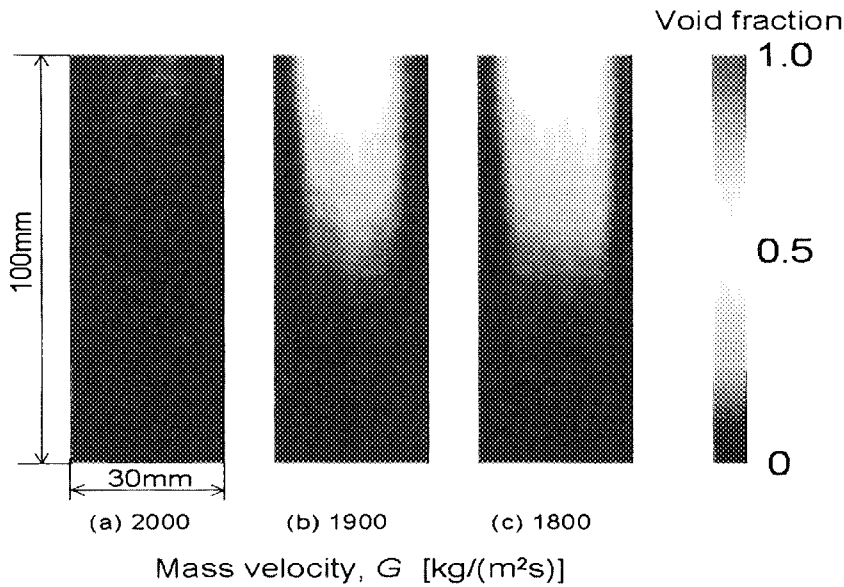


(C) 出口ボイド率分布

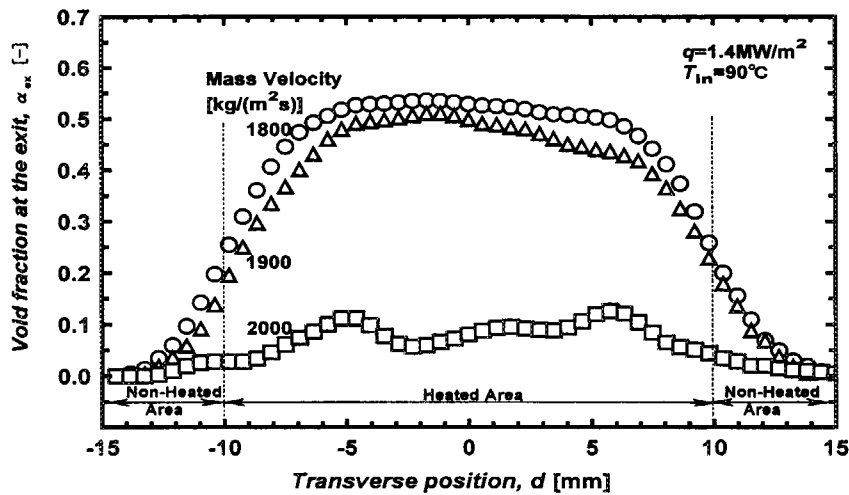
図 1 1 ボイド率に及ぼす熱流束の影響 ( $s=5\text{mm}$ ,  $T_{in}=90^\circ\text{C}$ ,  $G=2000\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ )



(A) 実験条件



(B) ボイド率分布



(C) 出口ボイド率分布

図 1 2 ボイド率に及ぼす質量速度の影響 ( $s=5\text{mm}$ ,  $T_{in}=90^\circ\text{C}$ ,  $q=1.4\text{MW/m}^2$ )



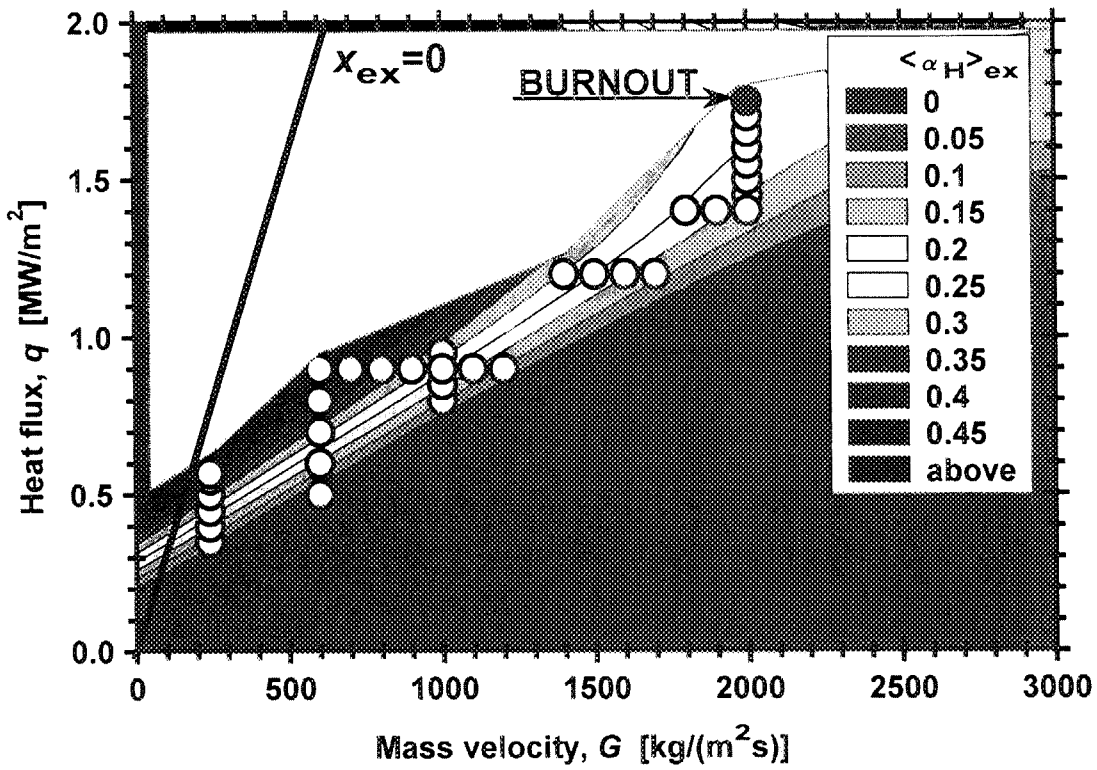


図 1 3 出口加熱部断面平均ボイド率への質量速度と熱流束の影響

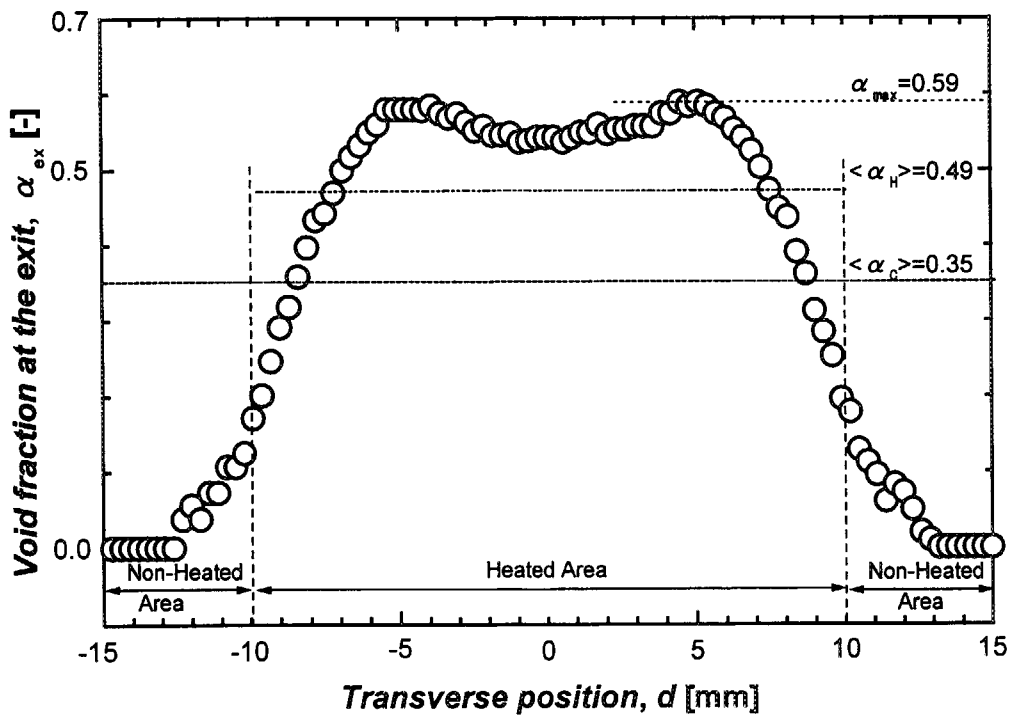
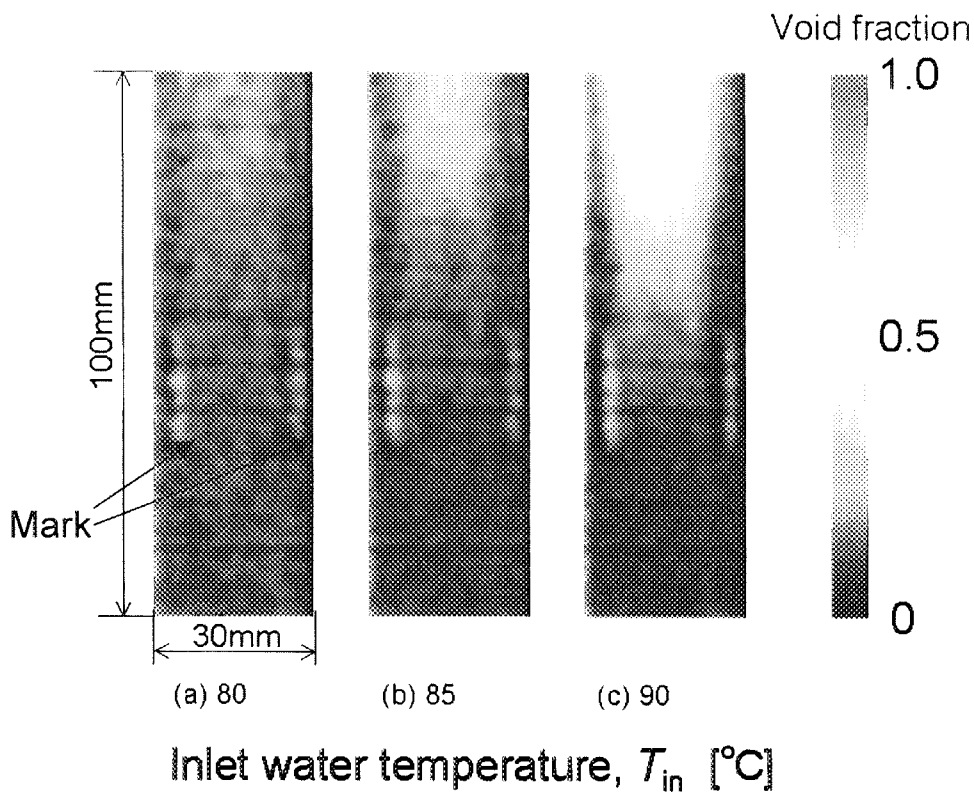
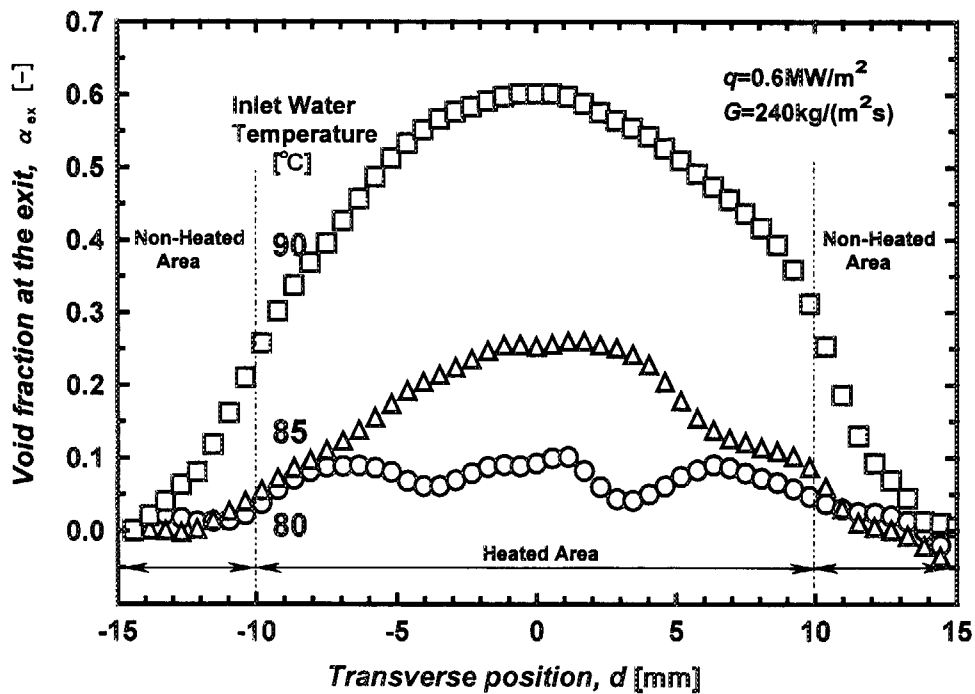


図 1 4 流路断面平均ボイド率と加熱部断面平均ボイド率



(A) ボイド率分布



(B) 出口ボイド率分布

図 1 5 ボイド率に及ぼす入口水温の影響( $s=3\text{mm}$ ,  $G=240\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $q=0.6\text{MW}/\text{m}^2$ )

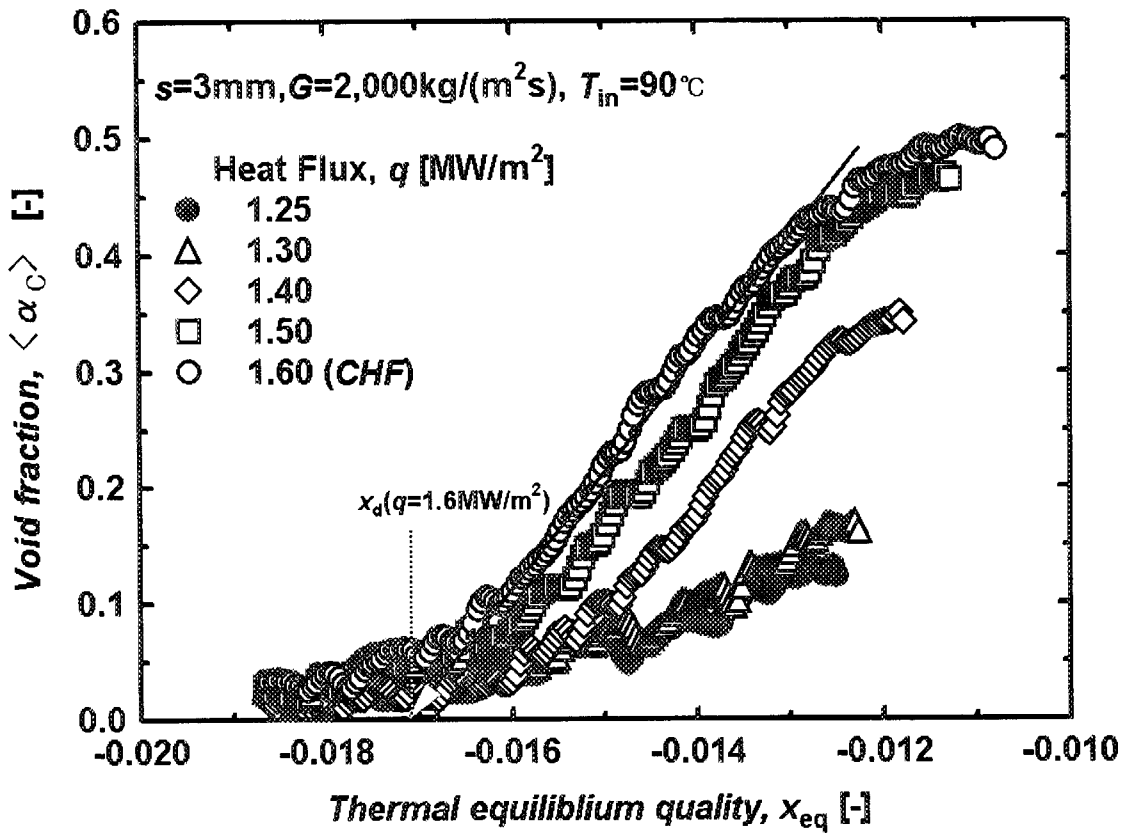


図16 流路断面平均ボイド率と熱平衡クオリティの関係

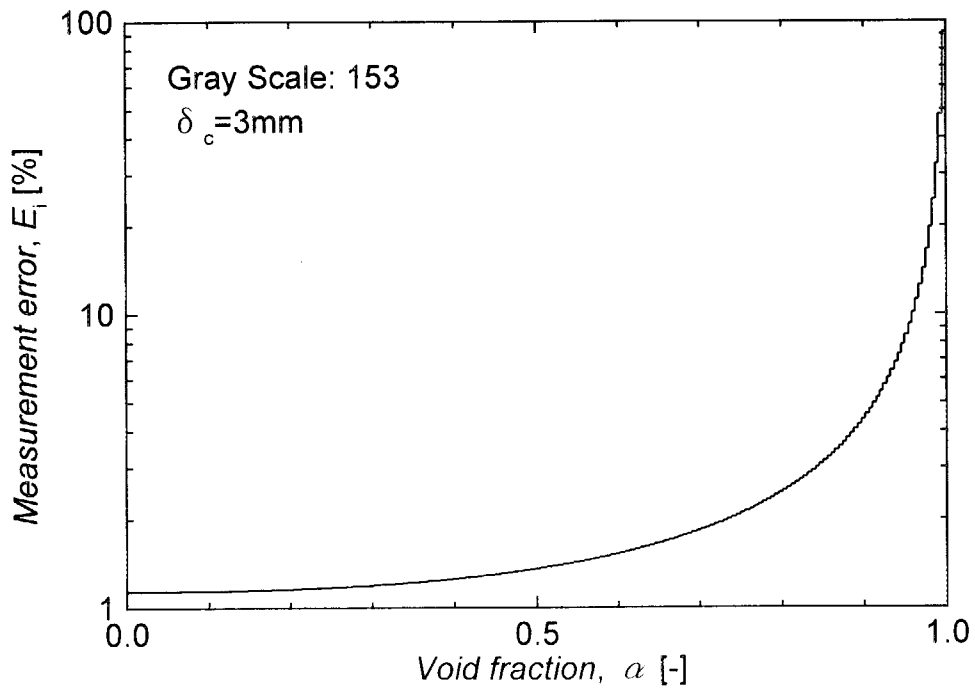


図17 画像階調度に起因する計測誤差解析結果

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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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	ジーメンズ	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度	°C	Wb/A
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	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 eV=1.60218×10<sup>-19</sup>J  
1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m  
1 b=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa  
1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq  
1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg  
1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy  
1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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, 1 eV および 1 u 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のカテゴリに分類されている。
- E C閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れていない。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>
	3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>
	1.60218×10 <sup>19</sup>	1.63377×10 <sup>20</sup>	4.45050×10 <sup>26</sup>	3.82743×10 <sup>20</sup>	1.51857×10 <sup>22</sup>	1.18171×10 <sup>19</sup>	1

1 cal= 4.18605J (計量法)  
= 4.184J (熱化学)  
= 4.1855J (15°C)  
= 4.1868J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS(仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 <sup>-11</sup>
	3.7×10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

