C202

稠密 14 本バンドル内沸騰二相流の可視化*

呉田 昌俊[○](日本原子力研究所)Visualization of Boiling Two-Phase Flow
in a Tight-Lattice 14-rod Bundle

Masatoshi KURETA

ABSTRACT

Visualization of 3D and instantaneous void fraction distribution of boiling flow in a tight-lattice 14-rod bundle is conducted by using neutron tomography and high-frame-rate neutron radiography void fraction measurement techniques. The purpose of the experiment is to understand vapor bubbles/water behavior ranging from the onset of boiling to the high void fraction region based on ("3D" + "2D+Time") void fraction data, and to obtain the fine-mesh database for verification of advanced analysis codes. Following phenomena are made clear from the present experiment: Vapor accumulates in the channel center; High void fraction spots appear between adjacent heater rods, that is, in narrow space at the inlet; Void fraction in the triangular space among three rods becomes high by void drift phenomenon, and 'vapor chimney' is formed; Flow is intermittent, and vapor bubble clusters are formed periodically; Onset points of net vapor generation are scattered not only in the center but in the peripheral.

Keywords: Void fraction, Neutron tomography, Neutron radiography, Visualization

1. はじめに

日本原子力研究所(原研)が電力会社・メーカー・大学と共同で研究開発を進めている低減速軽水炉¹⁾(RMWR)は、プルトニウムの多重リサイクルによる有効利用を図るため、燃料棒を三角格子状に約1mmの間隙に詰め、高い蒸気割合(ボイド率)で運転するという特徴がある。熱設計上最も重要な除熱性能に関しては、大型限界出力試験²⁾により冷却可能な見通しを得ている。一方、実現象の理解や実験相関式を内含しない詳細数値解析コードの検証を行うには、稠密バンドル流路内を流れる沸騰流データを新たに整備し、流動特性を詳しく分析することで特徴的な現象を見極める必要があった。

燃料棒の間隙が約1mmの稠密バンドル流路内を流れる沸騰流を高ボイド率、薄液膜の分布まで高空間分解能/高時間分解能で計測するため、著者らは新たに中性子トモグラフィボイド率計測技術(3D計測)³⁾と、高速度撮像中性子ラジオグラフィボイド率計測技術(2D+Time計測)⁴⁾(HFR-NR)をセットで開発した。これらの技術は、中性子線が金属を透過し易く水で減衰し易い特性があることに着目して開発した技術であり、薄い液膜やボイド率の空間分布を高空間分解能(現在0.1mm)、高時間分解能(現在1ms)でそれぞれ計測可能である。

本報では、中性子トモグラフィ技術とHFR-NR技術を用いて、低減速軽水炉の燃料集合体の一部を模擬した14本バンドル試験体内を流れる沸騰流のボイド率を計測・可視化し、沸騰流の流動特性を検討した結果を報告する。特に、沸騰開始から高ボイド率までの蒸気泡の挙動に着目した可視化観察を行い、特徴的な現象を抽出した結果を記す。

2. 稠密バンドル流路内沸騰流のボイド率分布実験

Fig. 1 Schematic diagram of the neutron tomography experimental apparatus

Fig. 2 Schematic view of the test section

Fig. 3 Neutron radiography image of boiling flow for neutron tomography

2.1 装置

Fig. 1 に、ボイド率計測実験装置の概略を示す。中性子源は原研にある研究用原子炉 JRR-3 を用い、大気圧開放イオン交換水循環ループおよび中性子トモグラフィ装置³⁾ または HFR-NR 装置⁴⁾ を設置してボイド率計測実験を実施した。試験体の概略図を Fig. 2 に示す。本試験体は稠密 14 本バンドル試験体であり、240mm 区間を 60kW まで一様にジュール発熱可能な設計とした。

2.2 実験条件と計測誤差の評価

Table 1 に、ボイド率計測実験の実験範囲を示す。実験パラメータは質量速度と発熱量であり、測定項目は時間平均 3 次元ボイド率分布と 2 次元の瞬時ボイド率分布である。本実験範囲は、低減速軽水炉の運転時の質量速度、入口サブクール度、ボイド率範囲を目安として決めた。このため、本報で記載する目安条件での結果は、圧力条件の違いを除くと実炉条件での流動特性と似た傾向を示すと考えている。

Table 2 に、中性子トモグラフィ実験での測定誤差の評価結果を示す。ボイド率の計測誤差は、著者が考案し

Table 1 Experimental range

Parameter	Symbol	Range [14-rod Bundle]	Unit
Mass Velocity	G	156 - 388	kg/(m ² s)
Inlet Water Temperature	T_{in}	90	°C
Power of Test Section	Q_{TS}	7.0 - 60.0	kW
Power of SG	Q_{SG}	0, 11.2	kW
Exit Pressure	P_{ex}	0.1	MPa
Exit Quality	X_{ex}	0.0028 - 0.1059	-
Run Number	-	14	-

Table 2 Measurement error

Parameter	Symbol	Measurement Error [14-rod Bundle]	Unit
Mass Velocity	G	± 1.1	%
Inlet Water Temperature	T_{in}	± 1	°C
Power	Q	± 0.05	kW
Void Fraction	α	± 3	%

* Except $\alpha < 0.1$ region, heater surface region and corner edge region

■ Error of 3D void fraction is evaluated by original error evaluation method (High-speed-rotating object method)

た高速に回転する検定固体を用いる誤差評価法による。ボイド率が 0.1 以下、固体に接する 1 ピクセル領域、流路コーナーでは、各種誤差原因により計測誤差が大きくなり測定誤差の評価が困難であった。本報で示す結果の空間解像度は 0.22mm/pixel、時間分解能は 1ms である。

2.3 ボイド率の計測と可視化

Fig. 3 に、目安とした実験条件での中性子ラジオグラフィ像（ただし、γ線に起因するノイズ除去処理⁵⁾ 済）を示す。撮像系は中性子トモグラフィ用 CCD システムである。下部では水が多いため黒く写り、上部ほど沸騰による蒸気量が増すため白く写っている。なお、実際には垂直に固定されている試験体が傾斜して記録されているのは 2 枚の鏡による反射光を記録している事に起因する。傾きの補正を含む各種補正処理や定量化処理を施した後、中性子トモグラフィでは、コンボリューションフィルタ補正逆投影法 (FBP) で断面再構成計算を行った。フィルタ関数は Shepp&Logan フィルタを使用した。ボイド率の計算法は、中性子トモグラフィ用と HFR-NR 用とは異なる。本報では、参考文献^{3) 4)} より改良された計算法による結果を示すが、紙面の関係で改良点は別報にて報告する。実験データは、AVS をベースに開発した可視化ソフト (JIPANG)⁶⁾ を用いて観察した。

Fig. 4 3D vapor distribution of boiling flow measured by neutron tomography

Fig. 5 Perspective view of vapor distribution from the inlet to the exit

3. 実験結果の可視化と特徴的な現象の抽出

3.1 中性子トモグラフィによる3次元計測と可視化

Fig. 4に、目安とした実験条件で時間平均3次元ボイド率分布を計測し、特徴的な現象を分かりやすく可視化するため、Fig. 2(b) A-B-C-Dで囲まれた範囲内の高ボイド率（ボイド率0.9）領域のみを等値面表示した結果を示す。またFig. 4では、流路部以外の領域は透明化処理を施してX-Z1平面とX-Y3平面上のボイド率分布をコ

Fig. 6 Change of cross-sectional void fraction distribution along flow direction

ンター表示し合成して示してある。高さ方向の表示範囲は、加熱開始端から13~229mmの範囲である。また、Fig. 5にFig. 4と同じデータを、試験体下部から上部を見る視点、すなわち水が流れる方向に沿って、蒸気泡分布に着目して遠近法表示した結果を示す。また、Fig. 6に、上記データを高さをパラメータとして、ボイド率の断面分布をサーフプロット表示した結果を示す。これらは、同じデータを多角的に観察するために作成したものの一部であるが、他条件での同様な可視化観察も含め多くの情報を読み取ることができた。以下に、ボイド率分布データの可視化により分かった特徴的な現象を記す。

- “流路周辺部より中央部のボイド率が高い”；Figs. 4, 6からも、流路中央部に蒸気が、周辺部に水が流れやすい傾向があることがわかる。この傾向は特に中間ボイド率領域で顕著である。
- “高ボイド率スポットが正味の沸騰開始点近傍、近接する発熱棒間の狭間隙位置に発生する”；Figs. 4, 5の下端近傍で楕円形状に観察されるもの。本現象は、本実験で初めて観察された現象であり、棒間の狭間隙部では局所速度が遅いため正味の沸騰開始がこの狭間隙部から始まりやすいと推察される。なお、本現象は下部から蒸気/水二相流を流入させた条件では観察されなかった。
- “沸騰開始位置の上部では一旦ボイド率が一様化し、続いて3本の棒で囲まれた三角形領域のボイド率が高まり、ここにいわゆる“Vapor Chimney”が形成される”；Figs. 4, 5の棒状に観察されるもの。本現象は、“Void Drift”現象により蒸気泡が三角領域に移動し、サブクール水と接触することで体積が減少し、その結果一旦ボイド率が一様化するように観察され、その後、飽和温度に達した三角領域内のボイド率が急増し煙突状の高ボイド率領域が形成されたものと推察される。
- “液膜が固体壁表面に流れている”；本報内の図から

Fig. 7 Vapor bubble behavior observed by consecutive instantaneous 2D void fraction distribution

は識別が困難であるが、液相側に注視した可視化を行うと、発熱棒の表面およびフローシュラウド内面上に液膜が形成されていることが観察された。液膜の厚さは、本実験の空間解像度である 0.2mm 程度まで識別できた。液膜が加熱面上に薄くとも存在するため、高ボイド率でもバーニアアウトしないと考えられる。

- (e) 上記現象の結果として、沸騰開始点位置近傍を除く下流側で、発熱棒間の狭間隙領域のボイド率が低くなり、条件によっては水が残っているように見える領域もあった。

以上、時間平均 3 次元ボイド率分布から分かった特徴的な現象と考察を記したが、実現象は二相流であるため時間的に変動している。このため、次に高速度撮像中性子ラジオグラフィ技術 (HFR-NR) を用いて、瞬時ボイド率分布を時系列動画で観察し、時間平均量の分析では分からなかった蒸気泡の挙動等時間変化を分析した。

3.2 HFR-NR による (2D+Time) 計測と可視化

Fig. 7 に、Fig. 4 と同じ条件で HFR-NR を用いて、瞬時ボイド率分布を 1ms 間隔で計測した結果を時系列に沿って示す。実際には、瞬時ボイド率の時間変化を動画表示して観察した。流動様式は複雑な様相を示していたが、Fig. 7 中 (この時間幅中) には以下に示す特徴を多く有していたので、この図を代表例として選択して示した。

- (a) “流れは周期が 10ms のオーダーから数 100ms の範囲で間欠的である”，そして“蒸気泡群が間欠的に発生・成長し周期的に流れる”；瞬時のボイド率は常に揺らいでおり、脈動の振幅は条件により幅がある。
- (b) “正味の沸騰開始点は、統計的に広く分布している”；時間平均分布では高ボイド率スポットが上流端で観

察されたが、Fig. 7 に示すように、蒸気泡の発生位置は時々刻々、3 次元的に変化しており、定常的な高ボイド率スポットは瞬時値観察では認識できなかった。また、正味の沸騰開始点近傍の周囲には、サブクール水が取り巻いている。

- (c) “正味の沸騰開始点および蒸気泡群は中心領域のみでなく、周辺領域でも多く発生する”；時間平均分布データからは、中心部のボイド率が高く観察されるが、周辺部でも大きな気泡が発生・成長している。

時間平均分布では、“Vapor Chimney” として連続した蒸気の通路が形成されているように感じられたが、瞬時値の時系列観察から、必ずしも連続しておらず、Fig. 7 に示すように蒸気泡・スラグが高速に多く流れている流動様式が広い条件範囲で観察された。

4. まとめ

稠密バンドル流路内を流れる沸騰流のボイド率を、中性子トモグラフィ技術で 3 次元分布を計測、高速度撮像中性子ラジオグラフィ技術で瞬時値分布を計測し、同一流動条件を多角的に可視化観察することで特徴的な現象を抽出した。この 2 技術をセット (“3D”+“2D+Time”) で使用した本実験で、以下の点が新たに分かった：

- (A) 時間平均空間分布から高ボイド率スポットが最上流部の狭間隙部で観察された。一方、瞬時値の時系列観察では、正味の沸騰開始点は統計的に広く分布しており、定常的な高ボイド率スポットは認識できなかった。
- (B) 時間平均空間分布から“Vapor Chimney”現象が観察された。この現象を、瞬時値の動画表示で連続性に注視して観察すると、三角形の流路部に連続した蒸気通路が形成されているとは限らず、広い条件範囲で蒸気泡・スラグが群を成して間欠的に流れていることがわかった。

参考文献

- 1) Iwamura, T. et al.: Core and System Design of Reduced-Moderation Water Reactor with Passive Safety Features, Proc. ICAPP, No.1030, USA (2002).
- 2) Kureta, M. et al.: Development of Predictable Technology for Thermal/Hydraulic ... (2), Proc. ICAPP'04, No.4056, Pittsburgh, USA (2004).
- 3) 呉田昌俊: 中性子トモグラフィによる二相流計測技術, 噴流工学, Vol.20, No.2, (2002) pp.24-31.
- 4) 呉田昌俊: 高速度撮影中性子ラジオグラフィによる沸騰流のボイド率計測, 可視化情報, Vol.23, No.89(2003) pp.21-26.
- 5) 呉田昌俊, 秋本肇: 中性子線を用いた稠密バンドル流路内ボイド率の 3 次元計測, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集(VII), (2002), pp.1-2.
- 6) 呉田昌俊: 中性子線で見える原子炉内蒸気/水の (“3D”+“2D+Time”) 可視化, VizJournal, (Internet), (2004). <http://www.viz-journal.kgt.co.jp/user/kureta.html>