ロッド間隔が不均一なロッドバンドル内の ボイド率分布に関する研究*

師 岡 慎 一^{*1}, 白 川 健 悦^{*2}

Study for Void Distribution of Rod Bundle with Non-Uniform Rod Gap

Shinichi MOROOKA^{*3} and Kenetsu SHIRAKAWA

^{*3} Power Systems & Services Company, Toshiba Corporation,
8 Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8523 Japan

The void distribution measurements were performed to clarify the void behavior phenomena in rod bundle with non-uniform rod gap. X-ray computer topography scanner was applied for the void distribution measurement in the rod bundle. The test results reveal that the void concentrates on the wider subchannel due to void drift and the void distribution becomes flatter with increasing quality. The vapor velocity at the wide subchannel becomes larger and the slip ratio between vapor and liquid increases compared with uniform rod gap. Therefore, the average void fraction of the bundle with non-uniform rod gap is reduced

Key Words: Void Drift, X-ray CT Scanner, Non-Uniform Rod Gap, Rod Bundle, Void Fraction

1. 結 論

著者らは、前報⁽¹⁾までに図1(a)に示すような沸騰水形原子炉燃料集合体を部分的に模擬したロッド間隔が均一な4行4列(以下4×4)配列ロッドバンドル内のボイド率をX線CTスキャナを用いて測定し、断面平均ボイド率がドリフトフラックスモデルで整理でき、EPRIの式⁽²⁾によって良好に予測できること、ならびにLaheyらが述べているようにボイド(蒸気)はより広い空間を好む、いわゆるボイドドリフト現象⁽³⁾が顕著に現れることを報告した。従来、バンドルのボイド率を予測する場合、水力直径が同じならば、流路形状による断面平均ボイド率への影響は少ない。つまりロッドバンドルのような複雑な形状でも同じ水力直径の円管として取扱えるという考えに基づいて相関式を作成している⁽²⁾。実際、著者らは図2に示すように、円管とバンドル(ただしロッド間隔が均一で水力直径は同じ)の断面平均ボイド率はほぼ等しいことを実験

的に確認している。ここで、縦軸、横軸は蒸気平均流速そして二相流の見掛け速度を表している。しかしながら、バンドル内に局所的に大きな流路が存在する場合、水力直径が同じであったとしても、ボイドドリフトの効果により、その流路に多くのボイドが流れスリップ比が変わることにより断面平均ボイド率になんらかの影響がでることが考えられる。このような点に着目した研究は、著者が知る範囲では報告されていない。本研究の目的は、水力直径が同じであっても流路内に局所的に大きな流路が存在した場合、均一流路と比べて、断面平均ボイド率そしてボイド率分布にどの

Fig. 1 Cross-sectional view of test bundle

* 原稿受付 2002年4月9日。

^{*1} 正員, (株)東芝 電力産業システム技術開発センター(〒235-8523, 横浜市磯子区新杉田町8)。

^{*2} (株)東芝 電力産業システム技術開発センター。

E-mail: Shinichi.Morooka@toshiba.co.jp

Fig. 2 2° Comparison of void fraction between tube and bundle

ような変化があるかを実験的に検討することである。そこで、著者らは、新形燃料の一つの候補であるロッド間隔が不均一なバンドルを用いて X 線 CT スキャナによりボイド率の測定を行った。ちなみに、ロッド間隔が不均一になることにより、核分裂による熱発生が効率化する。

2. おもな記号

G : 質量速度

J : 見掛け流速

Pr : 高出力と低出力ロッドの相対出力比

X : クオリティ

ρ : 密度

α : ボイド率

添字

f : 液相

g : 蒸気相

3. 試験装置および試験方法

試験体は、発熱長 3.7 m、外径 12.3 mm の間接発熱形ヒータロッドを、図 1 に示すように、(4×4) の正方形格子に配列したロッドバンドルを用い、有効発熱長、ロッド径、スペーサ形状とその位置は極力軽水炉の燃料集合体を模擬した。図 1(a) は前報⁽⁴⁾ で結果を報告したロッド間隔が均一なもので、図 1(b) は今回報告の対象となるロッド間隔を不均一なものである。以下、前者を CT 01、後者を CT 07 と呼ぶことにする。図 3 には CT 01 と CT 07 の各サブチャンネル流路面積の比較を示す。図 3 中の値は CT 07 の流路面積を

0.8	0.8	1.3	0.8	0.8
0.8	0.7	1.2	0.7	0.8
1.3	1.2	2.0	1.2	1.3
0.8	0.7	1.2	0.7	0.8
0.8	0.8	1.3	0.8	0.8

Fig. 3 Comparison of subchannel area between CT 01 and CT 07

CT 01 の値で割ったものであり、斜線で示したサブチャンネルの流路面積は CT 07 のほうが大きくなっている。ちなみに、CT 01 と CT 07 のバンドル平均の水力直径は 12.1 mm で同一である。ヒータロッドの軸方向出力分布は均一、またロッド間の出力分布は、図 1 に示すように、一つのコーナの 4 本のロッド出力を大きくし、他の 12 本のロッド出力は同一とした。図 3 中、 Pr は高出力と低出力ロッドの相対出力比(ピーキング)を示し、それぞれ 1.18, 0.94 である。

4. ボイド率測定方法および試験条件

4.1 ボイド率測定方法 ボイド率は、ヒータロッド発熱終端から約 4 cm 下流の所で医療用の X 線 CT スキャナ(東芝製 TCT-30)を二相流測定用に改良したものを用いて測定した。前報で述べたように、二相流のような時間的に変動する物理量の時間平均値を求める場合、投影データ(X 線のある方向から試験体に照射したときに透過してきた X 線強度データ)が時間平均値である必要があり、そのため、二相流のボイド率測定では、複数回スキャンを繰返し実行し、投影データの平均化処理を行い、その平均化された投影データを用いて局所ボイド率分布を算出した(詳細なボイド率測定方法については、前報を参照)。基本的には、どのような流動様式、流路形式でも適用可能であり(ただし、定常二相流に限る)。今回使用した CT スキャナでは 1 mm×1 mm の空間分解能で局所ボイド率分布が測定可能である。このようにして算出した局所ボイド率より求められた断面平均ボイド率およびサブチャンネルボイド率の精度は、ボイド率の絶対値でそれぞれ 2, 3% である。

4.2 試験条件 試験を行ったパラメータ範囲を以下に示す。

圧力: 0.98 MPa,

質量速度：550, 830, 1 390 kg/m²・s,
クオリティ：～12%

5. 試験結果および検討

5.1 局所ボイド率分布 図4に、測定部の断面平均クオリティ(熱平衡クオリティ)を変化させた場合のX線CTスキャナで測定された代表的な局所ボイド率分布のカラー画像を示す。ボイド率の値はカラーで区別されている。ただし、ロッドの部分は流路とを区別するために白とした。クオリティが小さい場合は、CT 07の流路面積が大きな中央の流路にボイドが集中する傾向が見られるが、クオリティが大きくなるにつれてボイド率分布はほぼ均一になっている。

5.2 サブチャネルボイド率分布 図5はほぼ同じ流体条件におけるCT 01とCT 07のサブチャネル平均ボイド率分布を比較したものである(図5中・黒い四角のところがサブチャネルボイド率に相当する)。ロッドピッチ間隔が等しい(センタサブチャネルの流路面積が等しいことに相当)CT 01のセンタサブチャネルのボイド率分布はほぼ平坦であるが、ロッドピッチ間隔が不均一であるCT 07の分布は流路面積が大きな部分のボイド率が他のセンタサブチャネルのボイド率に比較して顕著に大きくなっており、蒸気が集中するボイドドリフトの効果(あるいは、Vapor chimney effect)が現れている。図6は、クオリティの増加とともにCT 07のサブチャネルボイド率がどのよう

に変化していくかを示した代表的な結果である。クオリティが増大すると上述したボイド率分布の顕著な差はなくなってくる。これはクオリティが増大するに従い軸方向(垂直方向)の蒸气流速が増大し、クロスフロ

Fig. 5 Comparison of subchannel void distribution between CT 01 and CT 07 $P=0.98$ MPa, $G=830$ kg/m²・s, $X=0.01$

(a) $P=0.98$ MPa, $G=1390$ kg/m²・s, $X=0.008$

(b) $P=0.98$ MPa, $G=1390$ kg/m²・s, $X=0.028$

Fig. 4 Void distribution results

Fig. 6 Subchannel void fraction for CT 07 ($P=0.98$ MPa, $G=830$ kg/m²・s)

Fig. 7 Comparison of cross-sectional averaged void fraction between CT 01 and CT 07

Fig. 8 Comparison with EPRI correlation

ー(ボイドドリフト)効果が小さくなるためと考えられる。

5・3 断面平均ボイド率 図7(a), (b)は横軸に断面平均クオリティを縦軸に断面平均ボイド率をとり、それぞれ流量が830, 1390 kg/m²・sの結果を示す。CT 01に比較してCT 07のボイド率が小さくなっている。これは、水力直径が同じであったとしても、バンドル内に大きな流路が存在、つまり図3に示すように流路面積が不均一な場合ボイドドリフトの効果によりその流路に多くのボイドが流れ、結果として断面平均でのスリップ比が増大し断面平均ボイド率が減少したためと考えられる。ボイド率の減少効果は、流量が小さく、クオリティが小さいほど顕著であり、このことよりクロスフロー(ボイドドリフト)効果を規定するパラメータとして、サブチャネル間の流量差そして軸方向の蒸気速度が適当と考えられる。

前報⁽⁴⁾において、図8(a)に示すようにEPRIの式によってバンドル内のサブチャネル流路分布がほぼ均

一のCT 01, CT 04ボイド率データを良好に予測できることを報告した。図8(a)中、CT 04とは、流路断面形状はCT 01と同じであるが、ロッド間隔を保持するスペースからボイド率測定位置までの距離がCT 01, CT 07は180 mm, CT 04は35 mmと異なっている。ただし、断面平均ボイド率の値は、CT 01と同じであり、EPRIの式を広範囲で確認するためにこのデータを追加した。図8(b)は、EPRIの式とCT 07データとの比較であるが、明らかに両者の一致度合は良好ではない。このようなことから考えると、バンドル体系は同じ水力直径を有する円管と等価であるとみなせるという従来の考え方は、バンドル内のサブチャネル流路分布がほぼ均一の場合に限定されCT 07のように不均一な場合は、この考え方はあてはまらないといえる。したがって、このような不均一の場合は、ここで示したEPRI式のような相関式では精度よくボイド率を予測するには限界があり、ボイドドリフト効果を適切に取り入れたサブチャネルコードを

使用することが必要である。

現在、著者は本データを用いてサブチャンネルコードのボイドドリフト効果をモデル化している。また、他の不均一流路形状(例えば、ロッドを部分的に削除する)についても試験を実施する予定であり、これらのデータを用いて、モデルの一般性を検証していくつもりである。これらの結果については次報で報告する。

6. あ と が き

ロッド間隔が不均一な垂直4行4列配列ロッドバンドル内のボイド率をX線CTスキャナを用いて測定した。その結果、水力直径が同じであったとしても、流路面積が不均一な場合ボイドドリフトの効果により面積が大きな流路に多くのボイドが流れ、結果として

断面平均でのスリップ比が増大し断面平均ボイド率が減少することを明らかにした。

今後は、本データを用いてサブチャンネルコードのボイドドリフト効果をモデル化し、このような体形の予測精度を向上したいと考えている。

文 献

- (1) Mitsutake, T., ほか3名, *Nucl. Eng. Des.*, **122** (1990), 235-254.
- (2) Chexal, B. and Lellouche, G., A Full-Range Drift-Flux Correlation for Vertical Flows, EPRI-NP-3989-SR (1989).
- (3) Lahey, R. T. and Moody, F. J., *The Thermal-hydraulics of a Boiling Water Reactor*, ANS, (1979), 172-175.
- (4) 師岡慎一・ほか4名, 原子力学会誌, **33-6** (1991), 585-593.