技術報告

270. BWR燃料集合体の蒸気ボイド率測定

井上 晃*, 黒須 立雄**, 青木 利昌**, 二口 政信**,
八木 誠**, 師岡 慎一**, 星出 明彦**, 石塚 隆雄**,
吉村 邦広**, 吉田 博之**, 光武 徹**, 安部 信明**,
小島 章**, 中島 毅**, 中村 恵**, 沢 敏美**

(1994年 9月20日 受理), (1995年 2月33日 再受理)

Void Measurement of BWR Fuel Assembly

By Akira INOUE, Tatsuo KUROSU, Toshimasa AOKI, Masanobu FUTAGUCHI,
Makoto YAGI, Shinichi MOROOKA, Akehiko HOSHIDE, Takao ISHIZUKA,
Kunihiro YOSHIMURA, Hiroyuki YOSHIDA, Toru MITUTAKE, Nobuaki ABE,
Akira KOZIMA, Tuyoshi NAKAJIMA, Satoshi NAKAMURA and Toshimi SAWA

Steam void fraction measurement test in a BWR fuel assembly has been carried out to prove the current BWR void prediction method. This report describes the experimental apparatus, experimental data, and evaluation results.

The test was carried out in an out-of-pile test facility that can simulate the high pressure and high temperature conditions of BWRs. Water was used as a coolant. The void distribution in a BWR fuel assembly under BWR operating conditions was measured for the first time by an X-ray CT scanner, using an electrically heated test assembly which simulated a BWR fuel assembly on a full scale. Void fraction under steady and unsteady conditions was measured by an X-ray CT scanner and an X-ray densitometer.

In steady state void test, 476 data were obtained. These data were compared with the current BWR void prediction method. Unsteady void test data were evaluated with the unsteady analytical code.

It has been proved from these evaluation results that the verification of the current BWR void prediction method and unsteady analytical code has been accomplished.

KEYWORDS : BWR type reactors, fuel assemblies, thermal-hydraulics, void fraction, X-ray CT scanner, void distribution, subchannel analysis, void correlation, reliability

I. 緒 言

沸騰水型原子力発電所(BWR)において、炉心の冷却水は燃料集合体で発生した熱を除去する役割のほかに、中性子の減速材としての機能も有するので、その挙動は原子炉の設計および運転において重要である。特に冷却水中の蒸気ボイド(以下、ボイド)挙動は、BWR炉心の核熱水力特性に影響を及ぼすので、炉心設計および運転上重要なパラメータのひとつである。

BWRの炉心設計において用いられているボイ

ド率評価式の信頼性は、運転実績、起動試験データ等により確認されているが、冷却水のボイド挙動は炉心の核熱特性に大きな影響を及ぼすので、今後の炉心燃料の高度化と、より一層の信頼性向上を図るために、燃料集合体のボイド挙動を充分に把握しておくことは有益である。

模擬燃料集合体内のボイド率測定は、Nylund⁽¹⁾により中心部に非加熱ロッドを有した

* 東京工業大学(Tokyo Inst. of Technol.)

** 勸原子力発電技術機構(Nucl. Power Eng. Corp.)

** ㈱東芝(Toshiba Corp.)

36本を同心円上に配置した試験体で実施されているが、この試験体はBWR燃料集合体を模擬したものではない。また、著者の一人^{(2)~(4)}が改良したX線CTスキャナを用いて、BWR燃料集合体を模擬した4×4試験体を用いてボイド率分布を測定している。しかし、試験圧力は1MPaであり、BWRの通常運転圧力7MPaと異なっており、現在のところBWR運転条件下で実規模模擬燃料集合体のボイド率測定結果については、著者の知る範囲では報告されていない。

この認識を踏まえ、BWR燃料集合体のボイド率評価手法の信頼性を確認するとともに、将来の炉心燃料の高度化に備えて、管群ボイドデータの充実と評価手法の信頼性向上を図ることを目的として、実規模の模擬燃料集合体(以下、試験体)を用いて、定常時および非定常時のボイド率を測定するBWR燃料集合体管群ボイド試験(以下、管群ボイド試験)を実施した。試験は(財)原子力発電技術機構が磯子工学試験所に設置した最大熱負荷試験設備を使用し、ボイド率はX線CTスキャナおよびX線密度計により測定した。

試験では、原子炉と同じ高温高压条件を模擬できる高温高压ループを使用し、間接通電加熱により原子炉中の燃料集合体の発熱状態を模擬できる5種類の試験体を使用し、模擬燃料集合体の定常時および非定常時のボイド率特性を、圧力、冷却材流量および入口温度ならびに出力を変化させ種々な条件下で測定した。さらに、試験で得られ

たデータに基づいて、BWRボイド率評価式の信頼性実証、管群体系のボイド率データベースの確立、過渡・事故解析評価手法の信頼性実証およびサブチャンネル解析手法の信頼性確認を行った。本報では、BWRボイド率評価式の信頼性実証および過渡・事故解析評価手法の信頼性実証について説明する。

本試験は、(財)原子力発電技術機構が通商産業省の委託により実施した。

II. 試験設備

1. 試験装置⁽⁵⁾

Fig. 1に試験装置の系統図を示す。装置の主要構造材はSUS304である。冷却材としては純水を使用した。この装置の最高使用可能条件は、圧力10.3MPa、温度315℃、出力12MWおよび流量33kg/sである。冷却水は、循環ポンプ①によって循環され、試験部流量は弁③により、また試験部入口流体温度は、直接通電加熱型予熱器④によりそれぞれ制御した。試験体に流入したサブクール水は、試験部⑤を上昇するに従い、加熱され蒸気-水混合の二相流となり、試験部上部より出た後、蒸気ドラム⑧に内蔵された気水分離器⑦に入る。分離された蒸気の方は、蒸気ドラム⑧の上部空間においてスプレイ水によって凝縮し、気水分離された水と合体して循環ポンプ①に戻り、同様なサイクルを繰り返す。ループ全体の圧力は蒸気ドラ

Fig. 1 System diagram of test facility

ム内のスプレイ流量を変えて制御するが、微調整は加圧器⑥により行った。

試験装置は、BWR 運転範囲状態での定常試験、または、例えば、流量変化、出力変化および BWR 過渡変化のような非定常試験を実施する能力を有している。

2. 試験部および試験体

試験部は、Fig. 2 に示すように、実寸大の BWR 燃料集合体を模擬した試験体 1 体を高温、高圧水流中において電気により加熱し、沸騰二相流の各種流動条件下でのボイド率を測定するための設備で、試験体、压力容器、チャンネルボックス、接続電極および試験体と压力容器のシール部冷却装置などから構成されている。試験体は実寸大模擬燃料棒を 8×8 正方格子状に配列したもので、模擬燃料棒は、Fig. 3 に示すように、(+) 極、(-) 極とも模擬燃料棒の下部より取り出す間接発熱型のヒータである。被覆管、絶縁材およびヒータの材質はそれぞれインコネル、BN(ボロン

Fig. 3 Cross-sectional view of heater rod

ナイトライド)そしてニクロムである。軸方向出力分布は、ヒータの抵抗を軸方向に変えることにより設定した。ヒータを被覆管に組み込む前に軸方向抵抗分布を実測し、抵抗分布より計算した出力分布と計画値との差は±1%以内であった。解析にはこの実測した出力分布を使用した。使用後の模擬燃料棒よりヒータを取り出し抵抗分布を実測し、使用前の出力分布とほとんど変化がないことを確認した。模擬燃料棒表面温度は、外径0.5 mmのニクロム・アルメル熱電対により測定し、おのおのの熱電対はロッド表面に埋め込まれ、スペーサの直上流に設置した。各模擬燃料棒は、外径がヒータロッドと同じで、BeでできたX線透過部と連結した。

Fig. 2 に示すように、試験体発熱端における流路断面内のボイド率分布を詳細に測定するために、X線CTスキャナを設置した。一方、非定常時の軸方向ボイド率分布を測定するために、X線密度計3台を軸方向に等間隔に設置した。X線密度計ではロッドとロッドの間の線分平均ボイド率を測定した。また、非定常ボイド率測定時にはX線CTスキャナは回転させず、静止状態のまま多ビームX線密度計として使用し、断面平均ボイド率の時間変化を測定した。Fig. 4 (a),(b)にはX線CTスキャナとX線密度計の測定部を示す。

Fig. 2 Test section

Fig. 4 Void measuring section

構造材部での X 線の減衰を極力避けるため、X 線透過パスのロッドおよびチャンネル壁は Be で、圧力容器は Ti 合金で製作した。試験体は新型 8×8 および高燃焼度 8×8 燃料集合体の形状を実寸で模擬したものである。

Table 1 に試験体の仕様を、Fig. 5 に新型 8×8 型燃料および高燃焼度 8×8 型燃料の試験体断面形状を径方向出力分布とともに示す。両者の違いは、バンドル中央部分の非加熱ロッドの本数および径、加熱ロッドの本数である。試験では、燃料

Table 1 Test assemblies

Test assembly No.	0	1	2	3	4
Fuel Type		Current use 8×8			High burnup 8×8
Planar power profile	Uniform	Simulated design profile	Simulated design profile	Simulated design profile	Simulated design profile
Axial power profile	Uniform	Cosine	Half-cosine	Inlet peak	Uniform
Heated length	Full	Full	Half	Full	Full
Axial power distribution Axial → Power

Fig. 5 Radial power distribution (Dimension : mm)

形式および出力分布などのボイド率への影響を検討するために、試験体0～4の5種類の試験体を使用した。BWRの代表的な燃料集合体を模擬するために軸方向コサイン出力分布の試験体(試験体1)を使用した。同様に、軸方向出力分布および熱流束のボイド率分布への影響を評価するために一様(試験体0)、入口ピーク(試験体3)および部分コサイン(試験体2)の軸方向出力分布を持った試験体を用いた。

3. ボイド率測定システムと他の計測

ボイド率測定システムは、X線CTスキャナ(以下、CTスキャナ)とX線密度計よりなり、いずれもX線が試験部を透過する際のX線強度の減衰率からボイド率を測定するものである。Table 2 (a),(b)にX線CTスキャナおよびX線密度計の基本仕様を示す。X線CTスキャナは対象物周囲の多方面からX線を照射し、対象物を透過したX線強度を測定し、計算処理により対象物の断面像を作成する装置で、試験体内のボイド率分布の測定に用いた。使用したCTスキャナは、X線管と512個の主検出器およびX線源の強さをモニタする比較検出器がフレームに取り付けられている。

CTスキャナの測定原理の概要をFig. 6を参考にして説明する。回転(スキャン)中、扇状のX線ビームが対象物に照射され、透過X線強度が検出器によって検出される。検出器によって検出されたX線強度データを投影データと呼んでいる。360°にわたり投影データが測定される。二相流

Fig. 6 Scanning method

の動きによる投影データへの影響を避けるために、著者の一人が開発^{(2)~(4)}した時間平均測定法を使用した。著者の一人が報告しているように、二相流のような動的物体の物理量の時間平均値を求める場合、投影データが時間平均値である必要があり、そのためボイド率測定では、複数回スキャンを繰り返し実行し、投影データの平均化処理を行っている。平均化された投影データは、CTスキャナのデータ処理装置に送られ画像再構成アルゴリズム(核医学で広く使用されている filtered back projection)によって線吸収係数(cm^{-1})の分布に書き換え、最終的にボイド率分布に変換した⁽²⁾。基本的には、どのような流動様式、流路形状でも適用可能であり(ただし、定常二相流に限る)、本装置では $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ の空間分解能(画素)で局所ボイド率分布が測定可能である。X線CTスキャナの検出器からのすべての測定データはSN比を改善するため、リファレンス検出器のデータで補正した。

非定常時ボイド率測定試験において、本システムはX線管とX線検出器を固定し多ビームX線

Table 2 Specifications for X-ray CT scanner and densitometer

(a) X-ray CT scanner		(b) X-ray densitometer	
Method of scanning	360° rotation with pulse X-ray	Method of measurement	Continuous X-ray at fixed position
Type of X-ray beam	Fan-shaped X-ray beam of 34° radiation angle	Type of X-ray beam	Pencil type beam
Voltage of X-ray tube	Max. 120 kV	Voltage of X-ray tube	Max. 160 kV
Current	Max. 400 mA	Current	Approx. 19 mA at 160 kV
Scanning time	15 s	Sampling time	Max. 60 s (Variable)
Scanning region	$\phi 300\text{ mm}$	Synchronization	3 X-ray densitometers synchronize with X-ray CT scanner for data gathering
Dimensions of reconstruction element	Approx. $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$		

密度計として使用した。この場合、各X線検出器ごとの線分平均ボイド率を算出し、そのデータに基づいて断面平均ボイド率の時間変化を求めた。

X線密度計は、試験体模擬燃料棒間のボイド率測定に用いるものである。X線管は、各密度計にそれぞれ1つ設置されている。X線検出器は、各密度計に対して、主検出器および比較検出器の2チャンネルが設置され、X線管から発したX線は、ペンシルビームにコリメートされ、試験部を透過したのち主検出器に入射する。比較検出器は、主検出器と同一材料で作られ、X線変動をモニタするため、X線管の開口付近に設置した。主検出器および比較検出器によって検知されたデータは、それぞれ独立にデータ収集装置内で積分、A/D変換し、X線密度計用データ処理装置に収録した。収集された各密度計のX線検出器データがボイド率データ処理装置に転送され、各位置でのボイド率を算出した。

ダイヤフラム式の変換器で圧力、差圧計測を行った。試験部入口流量は、タービン流量計を用いて計測した。入口流体温度は測温抵抗体を用いて測定した。試験体出力は、電圧そして電流測定系によって得られた電流より計算で求めた。測定値の精度をTable 3に示す。ボイド率の測定精度はX線フォトン統計的な変動、計測系の系統的誤差および流体条件の測定誤差により算出した。この測定精度は、実際のボイド率測定部の断面寸法および材料で製作し、ボイドパターン(気泡流、環状流)をアクリル片によって模擬した模型で確認した⁽⁶⁾。サブチャンネルおよび断面平均ボイド

率は、各画素(測定の最小単位は、Table 2に示すように、0.3mmである)での局所ボイド率を面積積分することにより求めた。

III. 試験の種類と条件

次の2種類の試験を行った。

1. 定常時ボイド試験

ボイド率特性に影響を及ぼす可能性のある試験体形状、軸方向および径方向出力分布ならびに流体条件をパラメータにし、実規模模擬燃料集合体内のボイド率をX線CTスキャナおよびX線密度計を使って測定した。流体条件として圧力、流量およびクオリティについては、実炉の運転範囲を包含する下記の条件で、合計476点のデータを測定した。

圧力：1～8.6MPa

流量：284～1,988 kg/m²・s

クオリティ：1～25%

ここで、クオリティは燃料集合体加熱端での断面平均熱平衡クオリティの値。

2. 非定常時ボイド試験

試験では、圧力、流量、出力の各パラメータの非定常時断面平均ボイド率挙動に及ぼす影響を調べる単純過渡事象の試験および、出力、圧力、流量等のパラメータ変化を組み合わせた複合過渡事象の試験を実施し、非定常時における実規模模擬燃料集合体内の断面平均ボイド率の時間変化を測定した。

運転時の異常な過渡変化および事故のうち、炉心ボイド率の変化が顕著で、かつ中性子動特性との関連でボイド率変化が重要となる以下の4つの事象を模擬する試験を実施した。

- (1) 発電機負荷遮断バイパス弁不動作
- (2) 再循環ポンプトリップ
- (3) 再循環ポンプ軸固着事故
- (4) 圧力制御装置故障(増加要求)

ボイド率に影響を及ぼす圧力、流量、出力(クオリティ)等のパラメータが同時に変化する複合過渡事象の試験では、複数のパラメータの影響が重複するので、ボイド挙動の基本特性を把握するこ

Table 3 Accuracies

Quantity	Accuracy
Pressure	1 %
Flow	1 %
Power	1.5 %
Inlet fluid temperature	1.5 °C
X-ray CT scanner	
Local void fraction	8 %
Subchannel void fraction	3 %
Cross-sectional void fraction	2 %
X-ray densitometer chordal void fraction	2 %

とが難しい。そこで、重要なパラメータを個別に変化させる単純過渡事象の試験も併せて実施した。すなわち、ボイド挙動に重要なパラメータとしては、圧力、流量、出力が挙げられ、これらのパラメータが単独で変化する場合の試験を行った。

IV. 試験結果

1. 定常時ボイド率分布

(1) 局所ボイド率分布

Photo. 1 (a)~(c)に、圧力、質量速度をそれぞれ 7.2 MPa, 1,614 kg/m²・s(BWR 定格運転状態)に

(a) Quality : $X=2\%$

し、測定部の断面平均クォリティ(熱平衡クォリティ)を2, 8, 18%に変化させた場合の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を示す。この結果は、Fig. 5 (b)に示す高燃焼度 8×8 燃料の場合である。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。クォリティが2%の場合(Photo. 1 (a)), Fig. 5 に示すように、高出力ロッドが最外周に配列されているため最外周流路にボイドが多く生じているが、クォリティが8%に上昇すると(Photo. 1 (b)), 燃料集合体全体でボイド率が増大し、ボイドは高出力ロッドで囲まれたサブチャンネルに極端に集中していないことがわかる。加えて、チャンネル壁および中央の非加熱棒表面には液膜と思われる低いボイド率の領域が存在している。さらに、クォリティが12%に上昇すると(Photo. 1 (c)), かなり均一なボイド率分布になり、ロッド表面には液膜と思われる領域が存在するようになり、流動様式は環状流と推定される。通常、BWR 燃料でドライアウトが発生するクォリティは12%以上であり、このボイド率分布の結果より、BWR 燃料ではドライアウトが発生する流動様式は環状流であることがわかる。

(2) 断面平均ボイド率に対する 各パラメータの影響

冷却材条件(流量、圧力、クォリティ)による断面平

(b) Quality : $X=8\%$

(c) Quality : $X=12\%$

Pressure : 7.2 MPa, Mass flux : 1,562 kg/m²・s, Test assembly : High burn-up 8×8

Photo. 1 Typical local void fraction distribution by X-ray CT scanner

均ボイド率への定性的な影響は試験体により変化がないので、ここでは試験体0のデータを示す。Fig. 7に、いろいろな圧力における断面平均ボイド率(ボイド率)とクォリティの関係を示す。ボイド率はクォリティの増加とともにボイド率が急激に増大する低クォリティ域から、ボイド率が穏やかに増加する高クォリティ域へと移行していく。また、Fig. 7より、流量、クォリティが一定の条件では、圧力が増加するに従いボイド率も減少する。これは、圧力が増加するに従い蒸気の比容積が減少するためと考えられる。Fig. 8にボイド率に及ぼす流量の効果を示す。流量の増加に従い、ボイド率は増大している。これは一定圧力、そして一定クォリティにおいて流量を増加していくと、液流速とミキシングの増大によりスリップ比

Fig. 7 Effect of pressure and quality on void fraction

Fig. 8 Effect of flow rate on void fraction

が次第に小さくなるためと考えられる。上述した冷却材条件による断面平均ボイド率への影響は、円管、矩形管などの単純流路の場合と同じである⁽⁷⁾。

Fig. 9は、横軸にフロークォリティを、縦軸に断面平均ボイド率をとり、燃料型式の断面平均ボイド率への影響を示したものである。図中、●印は従来型8×8、○印は高燃焼度8×8の試験結果を示している。両者とも、クォリティとボイド率との関係は、低クォリティ領域でボイド率はクォリティとともに急激に増大するが、高クォリティ領域ではボイド率のクォリティに対する感度は小さくなっている。また、同じクォリティにおける両者のボイド率の差は小さく、燃料型式の断面平均ボイド率への影響は無視できるほど小さいと考えられる。

Fig. 9 Effect of fuel type on void fraction

Fig. 10は、横軸にフロークォリティを、縦軸に断面平均ボイド率をとり、軸方向出力分布の断面平均ボイド率への影響を示したものである。同じクォリティにおける両者のボイド率の差は小さく、軸方向出力分布の断面平均ボイド率への影響

Fig. 10 Effect of axial power shape on void fraction

は無視できるほど小さいと考えられる。この結果より、本試験範囲内では、断面平均ボイド率はその位置における流体条件により規定され、上流の影響は小さいと思われる。

(3) 断面平均ボイド率計算式の評価

BWRにおけるボイド率評価式は、ドリフト-フラックス・モデルに基づいている。Zuber-Findlay⁽⁸⁾が最初に導出したドリフト-フラックス・モデルの基本式は、次式で表せられる。

$$\alpha = \frac{x}{C_0[x + (1-x)\rho_G/\rho_L] + \rho_G V_{Gj}/G} \quad (1)$$

ここで、 α : 断面平均ボイド率

C_0 : 分布パラメータ

V_{Gj} : ドリフト速度 (m/s)

G : 質量流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)

x : 断面平均クォリティ

ρ_L, ρ_G : 水および蒸気の密度 (kg/m^3)

BWRにおけるボイド率評価式は上記のZuber-Findlay式を修正したもので、分布定数 C_0 はクォリティおよび蒸気と水の密度比の関数として表現され、ドリフト速度は次式より計算される。

$$V_{Gj} = K \left[\frac{\sigma(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{1/4} \quad (2)$$

ここで、 K : 実験定数

σ : 表面張力 (N/m)

Fig.11は評価式と本研究でX線CTスキャナで測定した全データ(圧力: 1~8.6 MPa, 流量: 284~1,988 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 熱平衡クォリティ: 1~25%)との比較を示す。全体的に、評価式はデータと良好に一致

Fig.11 Comparison of all data with BWR void prediction method

しているが、60%以上の高いボイド率領域では、この式は測定値を過小評価する。他方、40%以下の低ボイド率領域では若干過大評価する。この式の精度を定量的に評価するために以下の量を用いた。

$$\Delta\alpha = \text{測定値} - \text{計算値}$$

データとの比較より、BWRにおけるボイド率評価式は、BWR燃料集合体の断面平均ボイド率を系統誤差($\Delta\alpha$)の平均値2.1%, 標準偏差(σ)3%で予想でき、断面平均ボイド率の測定精度(Table 3)2%を考慮すれば、評価式はBWR燃料集合体の断面平均ボイド率を満足できる精度で予測できると考えられる。

次に、従来の相関式と本試験データとの比較を行った⁽⁹⁾。比較に用いた相関式は、均質流モデル、Bankoff式⁽¹⁰⁾、Zuber-Findlay式⁽⁸⁾およびEPRI式⁽¹¹⁾⁽¹²⁾である。Table 4に各相関式の予測精度を統計的に評価したものを示す。またFig.12には、この表より最も予測精度が良いEPRI式とデータとの比較を示す。この式の場合、 $\Delta\alpha$ の平均が-2.3%, 標準偏差 σ が2.2%である。

Table 4 Evaluation of void correlations

Correlation	$\overline{\Delta\alpha}$ (%)	σ (%)
Homogeneous	-10.5	4.5
Bankoff ⁽⁹⁾	2.7	5.4
Zuber-Findlay ⁽⁷⁾	1.5	3.9
EPRI ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾	-2.3	2.2

Data points : 476

Fig.12 Comparison of all data with EPRI void correlation

2. 非定常時ボイド率測定試験

(1) 概要

この試験で測定される主なデータは、流量、圧力、出力、入口温度、加熱端でX線CTスキャナで測定された断面平均ボイド率および線分平均ボイド率から評価された断面平均ボイド率の時間変化である。

解析コードとしては、非均質、非平衡状態を取り扱える現象解析コードであるRELAP5/MOD2コード⁽¹³⁾を用いた。

(2) 検討

Fig. 13に代表的な複合過渡事象の試験結果のうち、再循環ポンプトリップ(ポンプ慣性1s)事象を模擬した試験の測定値と計算結果との比較を示す。Fig. 13(a)はパラメータ変化を、Fig. 13(b)は断面平均ボイド率の測定値と計算値の比較を示す。図中、測定結果および計算結果とも初期値からのボイド率変化幅を示している。この事象では再循環ポンプがトリップし、ポンプ慣性を小さく

Fig. 13 Comparison of void data for recirculation pump trip event (pump inertia time 1s) with RELAP5/MOD2

仮定しており、流量が急減する。流量が急減するため、ボイド率は増加している。ボイド率の増加により出力は減少する。出力の減少は流量減少に比較してゆっくりしているため、ボイド率は大きく増加する。測定されたボイド率の時間変化もこの傾向になっている。一方、計算結果と測定値の傾向は計算値が若干高めであるが、全体としては良好に一致している。その他の試験ケースについても同様な評価および検討を行い、計算値と測定値は同程度の一致を示すことを確認している。

Fig. 14は、過渡変化時におけるボイド率変化の最大値の計算値と測定値との比較を示したものであり、ほぼ良好に両者は一致している。

Fig. 14 Comparison between RELAP5/MOD2 and measured change of void fraction

VI. まとめ

BWR 燃料集合体の定常時、非定常時の冷却材ボイド特性データを得ることができた。これらのデータを詳細に解析および評価を行った結果、定常時および非定常時のボイド率の評価手法の妥当性を確認できた。

本試験の成果に関する具体的内容を要約すれば次の通りである。

(1) 試験データの信頼性

BWR 運転時における高温高圧の熱水力条件を実現できる試験設備(管群ボイド試験設備)に、実機の燃料集合体の形状および発熱分布を模擬した燃料集合体1体を装荷し、電気加熱により発熱させ、定常時ボイド試験および非定常時ボイド試験でそれぞれ476、44ケースの試験データを採取し

た。

データ採取は、計測機器の校正および再現性試験を行うことにより正しくデータが採取されていることを確認した。また、一部の試験体については試験後の検査を実施した結果、特に使用前の状態と変化は認められなかった。この結果より、本試験で得られたデータは十分信頼性の高いものであると考えられる。

(2) 解析との比較

(a) 断面平均ボイド率の評価

BWRにおけるボイド率評価式による断面平均ボイド率計算値と測定値との比較によれば、全試験データに対して(測定値-計算値)の偏り誤差は2.1%、標準偏差は3.0%である。ボイド率の測定値を高ボイド率領域ではやや低めに予測する傾向がみられるが、断面平均ボイド率の測定誤差(±2%)等を考えると評価式として妥当であると考えられる。

(b) 非定常時のボイド率の評価

4種類の試験体を用いて合計44ケースの非定常時試験を実施し、非均質・非平衡熱水力学解析モデルに基づく解析コードRELAP5/MOD2による断面平均ボイド率変化の計算結果は試験結果と比較的よく一致しており、解析コードの妥当性が確認できた。

(3) 管群体系のボイドデータベースの確立

実規模の模擬燃料集合体を用い、冷却材条件、集合体流路形状、出力分布に関する種々のパラメータをかえた試験を行い、管群体系のボイド率データベースを構築した。本試験では、X線CT

スキャナによるボイド率測定技術により、世界で初めて集合体内の詳細なボイド率データを得ることができ、サブチャンネル解析の高度化等、将来の炉心燃料の高度化などに資することのできる貴重なデータが蓄積できた。

本試験は(財)原子力発電技術機構が通商産業省からの委託により、多くの関係者の協力のもとに行われたものであり、著者らは本試験に参加頂いた関係各位の協力に感謝するとともに、本試験の成果が今後の炉心燃料の開発に大きく寄与することを期待したい。

—参考文献—

- (1) NYLUND, O.: *Asea Res.*, **10**, 63 (1969).
- (2) 飯塚 勝, 他: 原子力誌, **26** (5), 421 (1984).
- (3) 師岡慎一, 他: 同上, **30** (10), 925 (1988).
- (4) MOROOKA, S., et al.: *Nucl. Eng. Des.*, **114**, 91 (1989).
- (5) 秋山 守, 他: 原子力誌, **31** (6), 280~295 (1989).
- (6) MOROOKA, S., et al.: *ICONE-1*, a-38, 237~243 (1991).
- (7) 機械学会: “気液二相流技術ハンドブック”, 80 (1989), コロナ社.
- (8) ZUBER, N., FINDLAY, J.: *Trans. ASME, Ser. C*, **87**, 453~468 (1965).
- (9) 石塚隆雄, 他: 原子力誌, **37** (2), 133 (1995).
- (10) BANKOFF, S. G.: *Trans. ASME, Ser. C*, **82**, 265~272 (1960).
- (11) CHEXAL, B., LELLOUCHE, G.: *EPRI-NP-3989-SR* (Rev.1), (1986).
- (12) CHEXAL, B., et al.: *NSAC-139*, (1991).
- (13) RONSOM, V. H., et al.: *NUREG/CR-4312*, (1985).

◇講習会「最近の化学工学'95」—抽出◇

主催 化学工学会関東支部, 協賛 本会, ほか2学会

会期 1995年11月30日(木), 12月1日(金)

会場 明治大学大学会館5階会議室(御茶の水)

プログラム

I. はじめに(2件)

II. 抽出の基礎と最近の動向(4件)

III. 抽出技術の新展開(7件)

講習会テキスト「最近の化学工学—抽出」には、

付録: 最近10年の基礎研究における抽出系一覽(30ページ)が含まれます。

参加費(テキスト代含む)

協賛会員 20,000円, 大学・公機関 10,000円,

学生会員 2,000円, 会員外 30,000円

テキストのみ 2,000円(参加者)

申込先 (〒112) 東京都文京区小日向4-6-13

化学工学会 関東支部

(TEL 03-3943-3527; FAX 03-3943-3530;

E-mail: LDF01757@niftyserve.or.jp)