原子炉用ボイド計の開発†

里 見 昌 洸*・遊 佐 英 夫*
小 田 明*・宇 賀 丈 雄**
望 月 恵 一**

* (株)日立製作所日立研究所 日上市幸町 3-1-1

** 日本原子力研究所 茨城県那珂郡東海村
(昭和 42 年 1 月 31 日受付)

Development of an In-Core Void Meter

Masahiro SATOMI*, Hideo YUSA*, Akira ODA*,
Takeo UGA** and Keiichi MOCHIZUKI**

(* Hitachi Research Laboratory of Hitachi Co., Ltd., Hitachi)
(** Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki)

(Received January 31, 1967)

In order to measure steam void fractions in operating Boiling Water Reactors, two types of void-meter, solenoid type and digital type, were developed. The former consist of a solenoid, a high frequency oscillator, a bridge and other suitable electric circuits and detects impedance change induced by voids passing through the solenoid. The latter uses a thin needlelike electrode as detecting head and detects the changes of capacitance and resistance induced when the electrode collides with and penetrates a bubble. Since the changes of impedances induced by void were very small, special electric circuits were also devised to detect the small signals.

The solenoid type void-meter responds promptly with high sensibility, and is suitable for measuring mean void fractions in the solenoid under transient conditions, while the digital type void-meter is small in size and is applicable to measuring time-averaged local void fractions. These performances were examined through out-pile experiments. The detecting heads of the void-meters were designed and manufactured with special considerations so as to be used under the conditions of high temperature, high pressure and high irradiation.

These void-meters were used to measure void fractions in the chimnies and in the downcomer of operating reactor JPDR (Japan Power Demonstration Reactor; a boiling water reactor with natural circulation).

1. 緒 言

沸騰水形原子炉の運転時における炉内ボイドの状況を直接知ること、炉の高効率安全運転、動特性解析、核および熱水力計算の精度の向上などの点からきわめて重要である。

しかし炉内のボイド測定器として適当なものがないため実測例としては、海外に二、三あるのみである¹⁾²⁾。従来、アウトパイルでの二相流の実験などに

広く用いられているボイド計には、ガンマ線形、X線形、キャパシタンス形などがあるがいずれもその性能および構造上の制限から、原子炉内ボイド計としては適当でない。

われわれは、炉内のボイド測定に関して高温、高圧、高放射線量に十分に耐え、必要な高感度をもつという要求がほぼ満足できるソレノイド形とデジタル形の2種類の電気式ボイド計を開発し、昭和39年以来原研のJPDR (Japan Power Demonstration Reactor 動力試験炉自然循環沸騰水形原子炉) のボイド測定を

† 計測自動制御学会第5回学術講演会で発表(昭41 9-5)

行なってきた。

まずチムニ上部とダウンカム入口部のボイド分布を明らかにし、ひきつづいて炉心燃料集合体流路中での測定準備を進めている。以下に測定原理、検出回路、炉内ボイド計の構造および測定結果について報告する。

2. 測定原理

2.1 ソレノイド形ボイド計の原理

Fig. 1 にボイド検出部の原理構造を示す³⁾。ソレノイドコイルは絶縁材でできているボビンの外周に巻かれ、ボビンの内側を流れる二相流のボイドが変化することにより、コイルのインピーダンスが変化する。コイルの径、巻線の太さおよび巻数などは測定箇所、周囲の条件などによる検出部の形状の

Fig. 1 Principle of solenoid type void meter

制限からほぼ決定されるがコイルの Q 値、コイル線間の分布容量が大きくなるよう選ばなければならない。コイル外側にはシールドを置き外部電磁場のしゃへいをしている。またボビンの内側には図のような金属円筒のガードを上下に配置し電磁場を局所的に集めることにより軸方向のボイド感応部を限定することができる。

上述のように、ソレノイド形ではボイドによるコイルインピーダンスの変化を信号として取り出すものであるが、コイルインピーダンスがボイドによってどのように変化するかを知るにはその構成要素であるインダクタンス(L)、実効抵抗(R)および分布容量(C)がどのように変化するかを調べる必要がある。

Table 1 は種々の物質によるコイルインピーダンスの変化を測定したもので検出部には 0.5 mm のエナメル被覆の銅線を線間隔 8 mm、巻線 9 で外径 50 mm 内径 30 mm のアクリル製ボビンに巻き、ボビンの内

側には厚さ 0.5 mm の Al 製ガードをそう入し上下ガード間の距離を 50 mm にしたものを使用した。この表で誘電率のだいたい等しい物質では分布容量も等しくなっている。

実効インダクタンスは物質のいかにかわらずほぼ一定で、実効抵抗は電導度の大きい物質ほど物質内に生ずるうず電流損が増すため大きくなっている。これらの結果から、液体中に誘電率と電導度の小さいボイドが混入すると、コイルの分布容量と実効抵抗が減少しインピーダンスが変化する。**Table 1** からわかるようにベンゼンなどのような誘電率と電導度が小さく、ボイドのそれとあまり変わらない液体ではその中にボイドが混入してもコイルのインピーダンスは変化しないのでボイドは検出されにくい。

次に測定器としての精度の点からボイド-検出信号の関係を正確に求める必要がある。これには実際の気ほう(気体)では任意のボイド分布形状を与えることが困難であるので誘電率と電導度がボイドのそれとほとんど等しい固体(ガラス、樹脂など)を模擬ボイドとして、これを感応部にそう入して校正を行なう⁴⁾。すなわち、あらかじめ感応部に水を入れておき、ここに模擬ボイドがそう入されるとこの部分の水が模擬ボイドの体積分だけ除去され同じ大きさのボイドの発生を模擬できる。このようにして大きさの異なる種々の模擬ボイドを用い **Fig. 2** に示すような校正曲線を求めた。模擬ボイドを感応部の半径方向に移動させ、中央部と周辺部との差も求めたがこの結果数%の差しか認められなかった。これは半径方向の感度分布がごくわずかであることを示している。なお念のため空気-水の二相流実験装置を用いてボイド量を2個のしめ切り弁で測定して検出信号と実際のボイド量との関係を求めた結果、模擬ボイドで求めた関係と

Fig. 2 Relation between void signal and void fraction

material	dielectric constant	conductivity [$\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$]	stray capacity [pF]	Effective inductance [μH]	Effective resistance [Ω]
drinking water	80	6×10^{-5}	22.33	3.07	3.83
distilled water	80	1.5×10^{-6}	22.33	3.07	3.13
ethyl alcohol	21	1.1×10^{-6}	21.2	3.07	3.92
benzene	2.3	5.3×10^{-7}	20.33	3.07	2.78
air	1	—	20.33	3.07	2.78

Table 1 Changes of coil impedances with several materials

約3%以内で一致した。

ソレノイド形では温度変化によるコイル巻線の抵抗が変化し、これが検出信号に影響を与えるため温度変化がある場合、それに対する校正を行なう必要がある。このことはソレノイド形ボイド計の欠点と言える。

2.2 デジタル形ボイド計の原理

次に、ソレノイド形ボイド計の欠点である温度変化の影響を原理的に有していないデジタル形ボイド計について述べる。検出部は Fig. 3 に示したように細い同軸ケーブル状の先端部において心線のごく一部分を露出させ電極としたようなものである⁵⁾。

Fig. 3 Measuring principles of digital type voidmeter

いま図のような形で電極が気ほうを貫通したとすると、電極部分の静電容量と抵抗が変化するため、検出部の形状が理想的なもの（電極が点状で気ほうの径に比較し十分小さいもの）であるならば、図に示したような方形状の信号が得られる。このときの信号のパルス幅 t と気ほうの速度 u および電極の気ほう貫通距離 δ の間には次式の関係が成立する。

$$t = \delta / u \quad \dots\dots (1)$$

(1) 式が成立するならば、電極の位置での時間平均した局所ボイド α は簡単な計算により次式で求められることがわかる。

$$\alpha = \frac{\sum_i t_i}{T} \quad \dots\dots (2)$$

すなわち、十分長い時間 T の中に含まれる t の和を T で除した値としてボイドが求められる。ただしここで注意しなければならないのは (2) 式によってボイドを求めるためには (1) 式中の δ と u が電極と気ほうの衝突によって変化してはならないということである。

すなわち電極が気ほうを貫通する際にあわが変形して δ が変わったり、気ほうの運動に影響を与えて u が変化したりしてはいけな。このためには検出部の外径が気ほうの直径に比較して無視できるほどに細く、また電極先端はあわ膜をスムーズに突き破るのに十分鋭いことが必要である。さらに電極は点状のものでなければならず、電極が長いとパルス幅 t は δ に電極長

さを加えたものを u で除した値になり信号は台形状になる。理想的な形状の検出部を製作することは実際上不可能であるが種々の形状の検出部を使って実験した結果、シールドの径が 3 mm 電極長さが 0.5 mm 以下であれば測定上特に問題のないことがわかった。また実験の結果から、このような理想に近い形状の検出部に対して (2) 式で用いるべき t としては信号の半値幅をとるのが妥当であることがわかった。したがって (2) 式の変形として、信号の面積に着目した所の次式によってボイドを求めるのが信号の処理の点からもしわめて便利である。

$$\alpha = \frac{\sum_i S_i}{T \cdot V_0} \quad \dots\dots (3)$$

ここで S は Fig. 3 に示した方形状信号波形の面積、 V_0 は信号の最大値である。なおこの式は電気回路において RC 積分器により簡単に求めることができる。

次に (3) 式を使うことの妥当性について実験的にやや詳しく調べてみた。まず単一気ほうにより (1) 式の δ および u を実測し信号のパルス幅 t と比較した。

Fig. 4 に実験装置の概略を示す。約 150 mm 角のアクリル製水槽中にシールド径 1.4 mm、電極の径 0.2 mm 電極長さ 0.2 mm なる検出部を図のように置く。コンプレッサから送りこまれた空気は蓄気室を

Fig. 4 Outline of test apparatus for using single bubbles

通り、ノズルから同一形状の気ほうが一定間隔で上昇するようにしてある。電極とノズル間の距離は 15 mm なのでこの間での気ほうのゆらぎはほとんどなく、すべての気ほうが同じ形状と速度で電極に衝突する。

気ほうの大きさはノズルの穴の径と蓄気室中の水量を変えることにより直径約 2 mm のものから 15 mm までのものを得ることができる。気ほうの上昇速度 u と電極の気ほう貫通距離 δ は 16 mm カメラ (64 コマ/s) によって気ほうの運動を撮影して求め、信号のパルス幅 t は電磁オシロに記録された信号波形により求めた。

実験結果の一例として Table 2 には検出部に直径

	without diectector	detector
δ [mm]	3	2.9
u [mm/sec]	320	290
δ/u [sec]	9.4×10^{-3}	1.05×10^{-2}
t [sec]		9.2×10^{-2}
t' [sec]		

Table 2 Measured values of u and t
(diameter : about 4 mm)

約 4 mm の気ほうが発生した場合の、 δ , u および t の実測値を示した。表には検出部に衝突しない場合の電極の位置 (ノズルより 15 mm 上) での気ほうの δ , u の実測値も示した*。

表を見ると気ほうが検出部に衝突することによって δ と u がやや小さくなるのがわかる。表中の t は信号波形の底辺の幅であり、 t' は半幅幅である。表から δ/u (気ほうと電極の衝突がないときの電極位置での値) と t' はかなりよく一致していることがわかる。

このことは前述の (1) 式中の t として信号の半幅幅をとること、したがって (3) 式によってボイドを求めるのがほぼ妥当であることを示している。

以上の実験では、電極が気ほうのほぼ中心を垂直に貫通する場合のみについて調べたものであるが、実際の場合には気ほうが電極の一部をかすめて通るようなこともあり、このような場合の信号波形は三角形に近く、しかも信号の大きさが小さくなるようなこともある。

このような場合の信号も含めてボイド形の積分回路の出力として得られる局所時間平均ボイドとヘッド法によって求めた空間平均ボイドとを比較した結果、両者はかなりよく一致した。

デジタル形ではソレノイド形のような温度の影響がないので、信頼度の点ではすぐれているが、時間応答が RC の積分回路の時定数で決まるためやや難がある。

3. 検出回路

3.1 ボイド信号の検出方式

Fig. 5 に信号の検出方式をブロックダイアグラムで示した。JPDR では検出回路は図に示すように A, B の 2 回路に別れており A 回路は原子炉格納容器内に、

B 回路は制御室にそれぞれ配置してある。

検出部は交流ブリッジの一端として組み込まれ、ボイドによるインピーダンスの変化分のみをブリッジの出力として取り出しこれを増幅するようになっている。ブリッジの電源には数 Mc の安定度のよい高周波を使用する。ブリッジからの出力は高周波増幅を行なったあと 10 kc の低周波に変換しているが、これは後段においての増幅を容易にするためと特に JPDR の場合、図の A 回路、B 回路間、すなわち原子炉格納容器内か

Fig. 5 System of detecting signals in voidmeter

ら制御室までの信号の伝送に約 100 m の伝送線を必要とするため、この間の損失は数 Mc 程度の高周波ではかなり大きくなるが、低周波 (10 kc) を使用することにより損失を極力小さくすることができるためである。10 kc に変換された信号は低周波増幅を行ない、整流した後、ソレノイド形ではボイド信号が指示計 I により指示される。またデジタル形では個々の方形波信号が指示計 I で得られ、一方積分回路において積分された信号はアナログ量として指示計 II に指示される。

3.2 測定電気回路

Fig. 6 は電気回路を示したもので、 V_1 の回路は高周波の発信部であり、2 Mc の水晶振動子を用いて安定度の高い高周波を発信させ、 V_2 により緩衝増幅を行ない減衰器を経て V_3 の電力増幅器にはいり十分な電力を得てブリッジの電源となる。ブリッジについては次の項で詳細に述べる。ブリッジからの出力は V_4 , V_5 の通過帯域のせまい高周波増幅器にはいり信号の増幅とノイズ、外乱の除去を行なう。高周波増幅を行なったあと周波数変換を行なうが、ここでは回路構成が簡単で動作の確実なトランジスタスイッチング回路⁶⁾を採用している。すなわち V_6 のマルチバイブレータ回路により作り出される変換用低周波 10 kc の正弦波を V_7 で増幅しスイッチング用トランジスタ T のベースに導入し、バイアスを 10 kc で変動させると、高周波で得られたボイド信号はコレクター-エミッタ間

* Table 2 の δ が 3 mm で、気ほう径の 4 mm より小さくなっているのは気ほうが若干偏平になっていることのためである。

Fig. 6 Circuit diagram

を 10 kc で断続して流れ、この大きさはボイド信号に比例する。これを D_1 により検波して高周波分を除き、10 kc に変換されたボイド信号を出力として得る。10 kc に変換されたボイド信号は V_8 , V_9 の低周波増幅回路において十分に増幅し、さらに指示計などを働かせるに十分な電力を V_{10} にて与える。この信号は D_2 の整流器により直流に変換され種々の指示計、記録計および積分回路などに導かれる。積分回路は一般によく用いられる CR を組み合わせた簡単なもので一種の高域ろ波器である。時定数は CR の積で得られるから、これらの値をスイッチにより組合せを替え任意の時定数が容易に得られるようにしてある。

3.3 ブリッジの詳細

Fig. 7 にブリッジの回路を示す。図で Z_3 が検出部のインピーダンスを含む辺である。 Z_2 , Z_4 の可変コンデンサを調節することによってボイドが零のときブリッジの出力信号が零になるようにする。

Z_3 の回路としては Fig. 8 に示したような 2 種類が考えられる。図の (a) は並列共振回路にしたもので図の (b) は結合コイルを使用したものである。

ソレノイド形を考えると (a) では検出コイルのインダクタンス、 R はその実効抵抗、 C_x は検出コイルの分布容量も含めたコイルブリッジ間のケーブルの静電容量で R_x はその絶縁抵抗である。 C は可変コンデンサの容量である。(b) では L_1 が一次コイルのインダクタンスで R_1 はその実効抵抗、 L_2 は検出コイルのインダクタンスで R_2 はその実効抵抗である。 M は L_1 と L_2 の結合コイルの相互インダクタンスである。

デジタル形の場合を考えると (a) では L と R は補助コイルのインダクタンスと実効抵抗、 C_x は検出部ブリッジ間のケーブルも含めた検出部の静電容量

Fig. 7 Circuit of bridge

(a) Parallel resonance system (b) Coupled coil system

Fig. 8 Equivalent circuit of Z_3

使用した結合コイルのそれぞれ一次と二次のインダクタンスである。前述のごとくソレノイド形、デジタル形のいずれにおいてもボイドによって C_x と R_x (ソレノイド形では R) が若干変化する。そして純度の高い水では主として C_x の変化が検出されやすく、電導度の高い水では R または R_x の変化が検出されやすい。この傾向は特にデジタル形において著しい。

まず、(a) について考えると高周波電源の周波数を ω とすると

$$\omega^2 L(C_x + C) = 1 \quad \dots\dots (4)$$

なる共振条件を満足するように ω , L , C_x の値を選ぶ (厳密に (4) 式は $R^3 \ll L/C \ll R_x^3$ が成り立つときに成立する。ここでの条件では (4) 式は十分に成立する)。

できるだけ鋭い同調をとることによって C_x あるいは R (または R_x) が若干変化したときに全インピーダンス Z_3 が大きく変化するようになる。このとき、 ω , L および R_x は大きいほど C_x と R は小さいほど Z_3 の変化は大きくなる。しかしながら実際には種々の制限があって上記の値を任意に選ぶわけにいかない。たとえば、原子炉用ボイド計においては原子炉圧力容器内の検出部と生体しゃへい体外に置いたブリッジとは 10 m 以上ものケーブルで接続せねばならず、このために C_x は 1000 pF 以上になり (4) 式を満足させるためには ω が L を小さくする必要がある。このようなことから JPDR の場合 Fig. 6 のごとく使用周波数には 2 Mc を選定している。また Fig. 5 において回路系を A, B 2 回路に分離してあるのも上述のごとき要素に起因する。すなわちボイド測定にあたっては、すべての測定系、制御系の集中している中央制御室において行なうのが最も望ましいわけであるが、全回路を制御室に置いた場合検出部ブリッジ間のケーブルは 200 m 以上になり、上述のようなことからボイドの検出が不可能になる。

ケーブルが 20 m 以上も長くなるなどして C_x が 2 ~ 3000 pF を越える場合には、 Z_3 の変化分が小さく

なるだけでなく、(a) の回路では Z_3 の大きさそのものが大きくなるためにブリッジの効率が悪くなる。このような場合には結合コイル方式の (b) のほうがむしろ感度がよくなる。このとき、 ω , $C_x + C$ および L_2 の間で (4) 式の共振条件を満足させるようにし、 L_1 と M の大きい結合コイルを用いることによって Z_3 を大きくするようにする。以上 Z_3 の回路としては、 C_x を十分小さくすることができる場合には (a) の方式を、 C_x がどうしても大きくなるような場合には (b) の方式を採用するのが望ましい。

4. JPDR におけるボイド計の構造

Fig. 9 はボイド計炉内そう入部の組立図である。(検出部はデジタル形でダウンカマにそう入されたものを示した)。検出部①からの信号はステンレス鋼のケースパイプ②内の耐熱ケーブル(絶縁被覆にはガラス繊維を使用)によってブリッジへ伝えられる。フランジ⑥が原子炉压力容器のアクセスポートにボルト締めされることによって検出部が所定の位置にそう入される。ケーブル心線は銅棒⑤に接続されテフロンパッキン④を締めつけることによって万一検出部およびケースパイプに破損が生じても一次系の水または蒸気が炉外に漏れ出ないようにこのシール部において完全なシールを行なっている。

ケースパイプはかなり長いのでその振れ止めのためにはかに 2 本の保持パイプ⑦がフランジに溶接され 3 本のパイプが補強リング⑧によって固定される。

Fig. 10 は炉内の検出部そう入位置を示したもので、それぞれのそう入期間は C_0 が 39 年 12 月から 40 年 6 月、 C_1 と D_1 が 40 年 9 月から 40 年 12 月、 C_2 と D_2 が 40 年 12 月から 41 年 5 月までである。

Fig. 11 にはソレノイド形ボイド計の検出部の組立図を示した。ボビンには耐熱、耐圧、耐放射線の絶縁材であるアルミナを使用し、コイルの巻かれる内ボビンと補強およびコイルシールド間の電気的空間を作るための外ボビンとに別れている。内ボビンには熱膨張係数がアルミナに近い金属のリングが図のように両端面に銀ロウ付される。なお、この際にはアルミナの接着表面にあらかじめメタライズ(金属粉を高温下で溶着)する。

次にリングとシールドが図のように溶接されることによりコイルはボビンの中に完全に封入される。

ここで検出部が Fig. 11 のごとき形状であるため炉内での二相流が検出部の感応部入口において乱れを生じ感応部を通過する際には実際の二相流の挙動とかなり異なるであろうことも十分考えられる。これについては形状および大きさの全く異なる Fig. 12 に示すごときデジタル形検出部をソレノイド形検出部のそう入されたと同じ位置に取り付け同一条件でボイド測定を行ない比較した結果実測値はほぼ同じであり、大きな差は認められなかった。したがって上述のごとき影響はまずないと思われる。

Fig. 12 はデジタル形ボイド計の検出部の組立図である。Ni 線が先端で一部分露出し電極となっている。Ni 線は図のように、絶縁物であるアルミナペレットを貫通し、ペレットの内面でメタライズ、銀ロウ付してある。ペレット外壁側面もメタライズされ、シ

- ① detector
- ② case pipe
- ③ glass fibers
- ④ teflon packing
- ⑤ 5 ϕ copper rod
- ⑥ flange
- ⑦ supporting pipe
- ⑧ reinforcing rings

Fig. 9 Assembly diagram of the digital type voidmeter installed in downcomer

Fig. 10 Positions where voidmeters are inserted in JPDR

Fig. 11 Cross section of detector head of solenoid type voidmeter used inside reactor

ールドケースと銀ロウ付される。検出部先端の耐圧強度は十分に大きいものであるからここから高圧水がはいりこむことはまずないが、さらに図のように 10 ϕ ペレットがバックアップとして銀ロウ付され Fig. 9

のシール部とともに安全に対する万全の考慮がはらわれている。

上記 2 種類のボイド検出部について炉内での放射線による信号への影響が心配されたがこれについては原研・JRR-1 における放射線照射試験の結果信号に対しても、また腐食、損傷など構造上の悪影響も全くないことを確認している。

Fig. 12 Cross section of detector head of digital type voidmeter used inside reactor

5. 測定結果

Table 3 は JPDR の定格圧力 (61.5 kg/cm²) 下において熱出力を変えたときのボイド実測値を熱出力、出口蒸気流量、チムニ上端より測った炉水位、給水温度、インコアモニタ (炉心熱中性子束計) の指示および制御棒パターンなどの運転パラメータとともに示した。インコアモニタは Fig. 10 にその位置が示されているが周辺部のボイド計 C₁ に近い位置にある[13]と中央部の[12]の指示を示した。表を見るとチムニ出口ボイドは、インコアモニタの指示値にほぼ比例して増加していることがわかる。すなわち炉心熱中性子束は中央部の[12]より周辺部の[13]のほうが大きく、チムニ出口ボイドもやはり C₂ より周辺部に近い C₁ のほうが大きい。これは制御棒パターンにおいて周辺部の制御棒がより引き抜かれていることのため周辺部の熱流束が中央部に比較して大きく、したがってボイドも大きくなったものと思われる。

キャリアンダボイドも原子炉出力が増すと増加し、炉壁側の D₂ のほうがやや大きかった。これはチムニからダウンカムへ反転する再循環水の流速が炉壁面でより大きくなっていることに起因するものと考えられる。

reactor power [MWt]	11	22.5	33	45	
steam flow rate [t/h]	7	28	45	67	
feed water temperature [°C]	85	100	115	125	
in-core monitor	$\left\{ \begin{array}{l} \text{[13]} \\ \text{[12]} \end{array} \right.$	17	28	34	67
(arbitrary unit)	$\left\{ \begin{array}{l} \text{[12]} \\ \text{[13]} \end{array} \right.$	11	20	24	30
chimney exit void	$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \\ C_2 \end{array} \right.$	16	29	37	47
fraction [%]	$\left\{ \begin{array}{l} C_2 \\ C_1 \end{array} \right.$	14	22	29	37
downcomer inlet void	$\left\{ \begin{array}{l} D_1 \\ D_2 \end{array} \right.$	3	8	13	18
fraction [%]	$\left\{ \begin{array}{l} D_2 \\ D_1 \end{array} \right.$	7	11	19	22

rod pattern

90

0

55

55

0

0

55

0

55

0

90

0

77

77

0

0

77

0

77

0

90

0

105

105

0

0

105

0

105

0

90

30

130

130

30

30

130

30

130

30

rod pattern

Table 3 Exit and carryunder void vs. reactor power

キャリアンダ量は炉水位が低下すると増加する傾向にあることはよく知られている。JPDR においても原子炉の運転上支障のない範囲内で、炉水位を変化させることときのダウンカム入口部におけるボイドを実測した。

Fig. 13 はダウンカム入口部の D₂ において実測されたボイドと炉水位の関係を示したものである。水位が低くなるとキャリアンダは増加し原子炉出力が大きいほどこの効果は大きいようである。

Fig. 13 Relationship between reactor water level and carry-under steam void fraction

6. 結 言

ソレノイド形、デジタル形の 2 種類の電気式炉内ボイド計についてその測定原理、構造および性能の検討などを述べたが以上を要約すると、

(1) ソレノイド形、デジタル形のいずれも炉内ボイド計として十分な性能を有する。

(2) ソレノイド形は時間応答の点ですぐれているが温度による影響があるため温度変化のはげしいところでの精度はあまりよくない。デジタル形では検出部が小形で信頼度は高いが時間応答の点でやや難がある。したがって上記 2 種類のボイド計を、使用目的や使用箇所などにより使い分けが必要である。

(3) 検出部の絶縁材にはアルミナを使用しメタライズ、銀ロウ付などの加工を採用し、耐熱、耐圧および耐放射線構造の十分な検出部を製作した。

(4) JPDR におけるボイドの実測の結果、チムニ出口のボイドは炉心熱中性子束計とほぼ比例しており、JPDR における制御棒引き抜き方式 (周辺部の制御棒をできるだけ引き抜く) では中央部のボイドは周辺部よりも小さくなる。またダウンカム入口部のボイドは炉水位が下がるとかなり増加する。

最後に以上の研究を行なうにあたって原子炉の運転ボイド計の原子炉への据え付け、取りはずしなどにおいて種々の御配慮と御便宜を図っていただいた黒田部長、村主運転課長をはじめとする日本原子力研究所動力試験炉管理部のかたがたに深謝いたします

参 考 文 献

- 1) M. Petrick: Thermal hydraulic performance characteristics of EBWR, ANL-6693 (1963)
- 2) H. Ager hansen: Advanced In-core Instrumentation from halden, Nucleonics, 22-4, 49/56 (1964)
- 3) 遊佐: ソレノイド型ボイドメータ, 日立評論, 46-11, 28/31 (1964)
- 4) 桜井ほか: 静電容量型ボイドメータ, 日本原子力学会誌, 7-2, 64/73 (1965)
- 5) 遊佐, 里見ほか: JPDR におけるボイド測定, 日立評論, 48-11, 1/6 (1966)
- 6) 遊佐, 里見ほか: JPDR のボイド測定 (7~10) 昭和 41 年原子力学会年会要旨集, c33/c36 (1966)