技術報告

8. ボイド反応度係数の測定

藤家洋一*, 森 道明*, 松井恒夫*, 宮崎慶次**

(1967年 2月27日 受理)

On the Measurement of the Void Coefficient of Reactivity

By Yoichi FUJIE, Michiaki MORI, Tsuneo MATSUI and Keiji MIYAZAKI

An experimental study of the void coefficient of reactivity in HTR was carried out. The experiment consisted of an out-of-pile experiment on void ratio calibration and an in-pile experiment on reactivity measurement.

A stream of nitrogen gas was introduced through a pipe to the bottom of a fuel channel to produce a rising column of void bubbles. The reactivity was derived from either rod position or positive period.

The local void coefficients measured were:

- (a) Single channel void coefficient
- (b) Two channel void coefficient
- (c) Three channel void coefficient

From (a), (b), (c) the average void coefficient of HTR was determined to be $\Delta k/k = -1.4 \times 1.07 \times 10^{-3} / \% \text{void}$.

I. 緒 言

水減速型原子炉においては、出力時に生ずる蒸気ボイドの原子炉動特性に及ぼす影響は大きい。特に船用炉のように海上で使用する場合、船体の振動に伴う原子炉内蒸気ボイドの分布状態の変化が原子炉動特性に及ぼす影響を知るためには、蒸気ボイドの反応度効果はその平均的なものだけでなく、局所的な値の空間分布が必要になってくる。著者らは(株)東京原子力産業研究所の原子炉 HTR を使って、この局所的ボイド反応度係数を測定した。

実験の主な点は、局所的ボイド反応度の空間分布と重畳性においており、それらの結果から原子炉全体の平均的ボイド反応度の評価を行なった。

実験にあたって、蒸気ボイドの代わりにチッ素ガスの気泡ボイドを使用したので、実験はチッ素流量とボイド率との関係を求める炉外実験と、ボイド反応度を求める炉内実験とに大別される(炉外実験については付録参照)。ボイド反応度測定にあたっては、局所

的反応度の空間分布およびその局所的反応度の重畳性の問題を中心に実験を行なった。また、重畳性の検討のために行なった多数チャンネルに同時にボイドを発生させる実験については、その実験操作および反応度の点から考えて3チャンネル以上に同時にボイドを発生させることができないので、実験は3チャンネルまでとし、原子炉の平均的ボイド反応度係数を求め $\rho = -1.4 \times 1.07 \times 10^{-3} \Delta k/k / \% \text{void}$ であることが判明した。

II. 実験とその結果

1. 実験方法

HTR の炉心は通常燃料要素41本を第1図のように配置し、第1安全棒、第2安全棒を上限まで引き抜き、シム棒を約%挿入した状態で臨界に達する。反応度の測定は制御棒補償法および正炉周期法によって行い、

* 日立造船(株)技術研究所(Technical Lab., Hitachi Zosen, Ltd.)

** 大阪大学工学部原子核工学科(Nucl. Eng., Osaka Univ.)

第1図 炉心配置図

前者の場合は原子炉を1度臨界状態にして微調整棒を自動制御系に接続し、ボイド量を変化させても常に一定出力で臨界を保持するようにしておいて、ボイド反応度を微調整棒の等価反応度に換算して測定する。後者の場合はチッ素流量 5 l/min で炉出力 5 W の臨界に

第2図 出力レベルをパラメータとしたボイド反応度

第3図 単チャネルボイド反応度

し、チッ素流量を零にしたときの炉周期を15~85Wの間で測定し、逆時間公式から反応度を求める。

第2図はE4チャンネルにおいて炉出力500Wと5Wで測定したときのチッ素流量と原子炉反応度との関係である。これで見ると両直線は一致していると考えられる。すなわち、ボイド反応度はこの出力範囲で出力に依存しないといえる。したがって、実験中1次冷却水の循環を停止していることを考えて、実験は炉出力5Wで行うことにした。なお実験の再現性は良好であり、炉出力5Wでは中性子源の反応度への影響は無視でき、実験前と実験後の炉心の温度は変わっていない。また制御棒補償法と正炉周期法による結果とを第3図に示すが両結果に差が見られないので、実験時間の短い制御棒補償法による実験を主体にした。

2. 単チャネルボイド反応度

炉心内の各チャンネルにわたってチッ素ガス流量を1.4, 2, 4, 5 l/minの5点について反応度を測定し、両者の関係が直線であると考えて、最小自乗法により勾配を求めたものが局所的ボイド反応度の空間分布であり、この結果を第4図に示す。第4図を第4行およびE列についてグラフ表示したのが、おのおの第5図の(A), 第6図の(A)である。

	B	C	D	E	F	G	H	
$\times 10^{-2}$ $F(\%) l/m$	0.46	0.85		0.88			0.36	2
			1.43	1.29		1.06		3
$\times 294 \times 10^{-3}$ $F(\%) \text{Void}$	0.81	1.08	1.24	1.11	0.98	0.95	0.58	4
				1.10	0.99			5
			1.44	1.27		1.06		6
	0.67			0.87			0.35	7

第4図 局所的ボイド反応度分布

第5図の(A)では、反応度分布が左右非対称になっていることがわかる。また第6図の(A)については、反応度分布はほぼ対称であるが、中心付近で値が小さくなっている。これは、いずれもシム棒が挿入されているため、その近傍の中性子束が低下しているためと考えられるので、この影響を除くために、(1)第5図の(A)に対応してシム棒を上限まで引き抜き、その反応度を第1および第2安全棒を均等に挿入して補償して臨界にして、微調整棒でボイド反応度を測定した。この結果が第5図の(B)である。(2)第6図の(A)に対応してはシム棒を引き抜き、その反応度をB2の燃料棒全部とB6の

燃料棒の $\frac{3}{4}$ をはずして補償する。すなわち、炉心構成を41本炉心から39 $\frac{1}{4}$ 本炉心に変えた状態でボイド反応度を測定したのが第6図の(B)である。

第5図の(B)では、まだ中心より右側が下がり気味になっているが、これは安全棒位置が中心よりやや右側にあるので、この影響が現われたものである。第6図の(B)では、微調整棒以外の制御要素が炉心内に存在しないので、ボイド反応度の分布も中心に対称になっている。微調整棒による影響はそれほど顕著には見られない。

3. 複数チャネルボイド反応度

原子炉の動特性を考察する上で必要なのは炉心の全

体的なボイド反応度であるから、局所的なボイド反応度からそれを評価しなければならない。ことに本実験においては、炉心内のあらゆる場所に同時にボイドを発生させることは事実上不可能であるので、測定した局所的ボイド反応度にほどこすべき平均操作の妥当性に関連して、複数チャネルにボイドを発生させて実験した。

Shapiro*はFord Nuclear Reactorでのボイド実験の解析において、原子炉の全体的ボイド反応度を求めるのに、局所的ボイド反応度の体積平均として計算している。各燃料チャネルの体積は全部等しいので、結局全体的ボイド反応度は局所的ボイド反応度の代数平均として計算されていることになり、この平均操作はボイド反応度効果の重量性を仮定していることになる。もし任意の2チャネル間に中性子束変化を媒介とするボイド反応度効果の相互影響が全然ないとすれば、重量の理は完全に成立するが、実際には近似的にしか成立しない。この線形近似がどの程度妥当なものか、また線形性からの“ずれ”はいずれの方向であるかについて実験に見当をつけるために、中心部の隣接2チャネルD4とE4において、ボイド反応度効果の相互影響を調べてみた。第7図はその結果である。

第7図 局所的ボイド反応度効果の相互関係、(I)

D4, E4それぞれのチャネルに単独でボイドを発生させた場合の反応度の和 ($-1.18 \times 10^{-2} \%/\text{l/min}$) よりも両チャネル同時にボイドを発生させた場合の反応度 ($-1.30 \times 10^{-2} \%/\text{l/min}$) の方が大きくなっている。すなわち、2チャネルにボイドを発生させた場合の相互影響は、個々のチャネルの負のボイド反応度効果をたがいに強め合うように作用している。この影響を少し

* SHAPIRO, J.L.: *Nucl. Sci. Eng.*, **12**, 449~456 (1962).

方法を変えて別のチャンネルで測定した結果が第8,9図である。第4図において局所的ボイド反応度効果の最も大きな点の1つであるD3を選んで、それに隣接するC3チャンネルのボイド量(チッ素流量)をパラメータとして固定しておいて、D3チャンネルにおけるチッ素流量と反応度との関係を求めたところ第8図のようになった。C3のチッ素流量を0, 3, 5, 8 l/minとパラメトリックに増加させると、D3における負のボイド反応度効果は大きくなっていることがわかる。

第8図 局所的ボイド反応度効果の相互関係, (I)

第9図 2チャンネルボイド反応度分布(D3センター)

つぎに、C3チャンネルのボイド燃料要素をB3に移し、そのボイド量をパラメトリックに変化させてD3でボイド反応度を測定した。以下同様に第2チャンネルのボイド量をパラメータとして特定の第1チャンネルにおいてボイド反応度を測定し、第2チャンネルの位置を移動させた場合の分布を求めた。第9図はその例であって、D3を第1チャンネルとし、3行線上のD3以外のチャンネルを第2チャンネルとしてその位置を順次移動させたものである。第9図の表わす意味を考えてみる。ボイド反応度効果が完全に線形であるとすれば、第9図

のパラメータが2, 4, 6 l/minの各曲線はパラメータが0 l/minの基線に完全に一致すべきであり、そしてボイド率と反応度との関係は完全な直線で表わされる。それをボイド反応度の1次効果と名づけるなら、第9図はボイド効果の直線性からの“ずれ”, すなわち、2次以上の効果(2次効果と名づけておく)の大きさの分布図である。1次効果が炉心の至るところで負であることは単チャンネルの実験で明らかであるが、いま考えているようなボイド率の範囲内で2次効果についてもまた負である。すなわち、負のボイド反応度効果の相互影響はたがいに強め合うように働くという現象は、炉心内のあらゆる2チャンネルについて成り立っていると考えてよい。そして第9図からわかるように、2つのチャンネルの位置がある程度は離れた所でボイド反応度の2次効果の絶対値はかえって大きくなり、必ずしも隣接部で大きくはなっていない。第9図で、ボイド発生チャンネル相互の位置関係による2次効果が必ずしも両者が近いところで大きくないのは、単チャンネルボイドによる炉心内中性子束のひずみが必ずしもその近傍のみにとどまらないことを表わしていると考えられる。原子炉が今ある出力で臨界であるとする、第1次近似として炉内での中性子の反応率 R は一定であって、この反応率は出力のみに依存すると考える。この状態で炉内の点 r にボイドを発生させた場合の局所的ボイド反応度はその空間位置を考えて

$$\rho(R(r), r) \quad R(r): r \text{ 点での反応率}$$

と書ける。ここに

$$\int_{\text{core}} R(r) \cdot dr = R$$

である。原子炉内の2つのチャンネルに別々にボイドを発生させた場合のボイド反応度の和は

$$\rho_r + \rho_{r'} = \rho(R(r), r) + \rho(R(r'), r')$$

と書けるが、これを同時に発生させた場合は、各点でボイドが発生したために生じた反応率の変化がたがいに影響し合うので、この場合のボイド反応度は

$$\rho_{r+r'} = \rho(R(r), r) + \rho(R(r'), r') + \Delta\rho(\Delta R(r), \Delta R(r'))$$

となる。第9図はこの $\Delta\rho(R(r), \Delta R(r'))$ の空間分布を表わしている。

4. 局所的ボイド反応度の重畳性

前節で述べたように、局所的ボイド反応度には加算性がなく、各点での反応率の変化の相互影響のために、全体のボイド反応度は各点での局所的ボイド反応度の和より大きくなる。いま両者の関係を

$$\rho^t = \alpha \cdot \sum \rho(R(r), r) = \alpha \cdot \bar{\rho}^t$$

とおく,ここに ρ^i は全チャンネルに同時にボイドを発生させた場合のボイド反応度である。したがって, α は両者の間の非線型効果を表わしている。この非線型効果でチャンネルが2つの場合については前節で述べたので,これがチャンネル数の増大とともにどのように変化するかを確かめるために,3チャンネル同時にボイドを発生させて α の上限を求めることによって, ρ^i の最大値を推測した。炉内の第1次近似として全中性子数は N_w 個であって,この N_w は出力のみに依存しその他には無関係であると考ええる。この状態でボイドを発生させるとボイド発生チャンネルおよびその近傍では中性子数が ΔN_w だけ減少する。したがって,その場合の炉内全中性子数は,

$$N = N_w - \Delta N_w$$

になる。また,ボイド反応度はその空間位置を考慮して

$$\rho_{N_w}(r) = \rho(N_w, r)$$

と書ける。ここに $\int N_w dW = N_w$ である。

この状態では原子炉は臨界になり得ないので, r チャンネル以外の領域の中性子数をなんらかの方法で増大させて,いま減少した ΔN_w 個の中性子を補償してやらねばならない。したがって,そのバランスの式は,

$$\Delta N_w = \int \Delta N_w' dW'$$

と書ける。もちろん $\Delta N_w'$ は必ずしも正でなく,系全体で積分したものが正で ΔN_w になるということである。したがって,炉心にボイドを発生させた状態を保つ場合の炉心内の中性子束分布は,

$$r \text{ 点で } N_w - \Delta N_w$$

$$r' \text{ 点で } N_w + \Delta N_w'$$

1チャンネルでの反応度の平均 $\bar{\rho}^1$,2チャンネルの平均 $\bar{\rho}^2$,3チャンネルでの平均 $\bar{\rho}^3$ について比較したものを第1表に示す。これは3個のボイド発生チャンネルの相互位置を種々変えて測定したものであり,表中の()内

第1表 ボイドチャンネル数と反応度との関係

反応度(%/l/m)	$\bar{\rho}^1$	$\bar{\rho}^2$	$\bar{\rho}^3$
ボイドチャンネル			
D4, E4, F4	1.10×10^{-2}	1.25(13.6)	1.30(18.2)
C4, E4, G4	$1.05 \times //$	1.34(27.6)	1.37(30.5)
B4, E4, H4	$0.83 \times //$	0.85(2.4)	0.87(4.8)
C2, E4, G6	$1.01 \times //$	1.10(8.9)	1.11(9.9)

$$\bar{\rho}^1 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \rho(R(r_i), r_i), \quad \bar{\rho}^2 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \rho_{ij}$$

$$\bar{\rho}^3 = \frac{1}{8} \rho_{1,2,3}$$

の数値は $\bar{\rho}^2, \bar{\rho}^3$ の $\bar{\rho}^1$ に対する増加率を表わしている。

第1表によると,2チャンネル実験の場合と同様,非線型効果はチャンネル間がある程度はなれた所で最大になり,相当はなれると急速に小さくなっている。また,これをグラフに示したのが第10図である。第10図によると非線型効果は3チャンネルの場合,2チャンネルのものに比べてそれほど大きくなっていない。したがって,このグラフの様子からこの非線型効果の最大を推測することができる。この非線型効果は最大の点で, $\bar{\rho}^2/\bar{\rho}^1 \approx 1.31$ であるから,安全側に評価するとしても全体で $\bar{\rho}^2/\bar{\rho}^1 < 1.40$ であると考えられる。したがって,著者らは上記の補正係数をここでは

$\alpha = 1.4$
ときめた。

第10図 ボイドチャンネル数と反応度との関係

5. 炉内平均ボイド反応度

全体の平均ボイド反応度を前節で述べた方法で求めるためには, $\bar{\rho}^1$ を求めることが必要であるが,実験時間の都合上全チャンネルについて局所的ボイド反応度を求めているので,ここでは(1)実験で求めた測定値を内挿あるいは外挿して第4図の空欄を埋めたもの(第11図),炉心の行および列について変数分離が可能であるとして,(2)熱中性子束に比例するとした場合,随伴中性子束に比例するとした場合,(3)随伴中性子に比例するとした場合について, $\bar{\rho}^1$ を求めた。

(2)については,シム棒挿入の場合の4行の各チャンネルについて求めた局所的ボイド反応度を基準にしたも

	B	C	D	E	F	G	H	
$\times 10^{-2}$ $\rho(\%) / \text{m}$	0.46	0.85	0.92	0.88	0.72	0.62	0.36	2
	0.69	1.14	1.43	1.29	1.10	1.06	0.62	3
$\times 294 \times 10^{-3}$ $\rho(\%) / \text{Void}$	0.81	1.08	1.24	1.11	0.98	0.95	0.58	4
	0.66	1.07	1.23	1.10	0.99	0.95	0.58	5
	0.41	1.02	1.44	1.27	1.09	1.06	0.61	6
		0.67	0.86	0.87	0.71	0.61	0.35	7

$$\bar{\rho}^1 = 36.43 \times \frac{1}{34}$$

$$= 1.07 \times 10^{-1} \% \frac{\Delta R}{R} / \% \text{Void}$$

第11図 局所的ボイド反応度分布

第2表 平均ボイド反応度

	炉心構成	測定チャネル	平均化操作	単チャネルボイド反応度の和($\bar{\rho}^1$) $\times \% \frac{\Delta k}{k} \% \text{void}$	平均ボイド反応度($\alpha \times \bar{\rho}^1$)
1	シム棒挿入	第4図	内 外 挿	1.07×10^{-1}	1.50×10^{-1}
2	"	4行	熱中性子束(測定) ⁽¹⁾	$0.97 \times "$	$1.36 \times "$
3	"	E列	"	$1.01 \times "$	$1.41 \times "$
4	安全棒挿入	4行	" (計算) ⁽²⁾	$1.11 \times "$	$1.55 \times "$
5	39 $\frac{1}{4}$ 本炉心	E列	"	$1.18 \times "$	$1.65 \times "$
6	"	E列	随伴中性子束(計算) ⁽³⁾	$1.18 \times "$	$1.65 \times "$

結局、前述のような補正係数 α を考えるような観点に立てば、局所的ボイド反応度分布の平均化は熱中性子束で行なっても、随伴中性子束で行なっても大差ないといえる。むしろそれよりも炉心構成の違い、すなわち、どの制御棒をどう入れたか、燃料配置がどうなっているかといった問題の方が、むしろ平均ボイド反応度に大きな影響を与えていると思われる。

ここで局所的ボイド反応度の空間分布が問題になるわけであるが、第12図に示すように、この分布は熱中性

第12図 熱中性子束とボイド反応度との分布

の、E列の局所的ボイド反応度を基準にしたもの、シム棒を抜いて安全棒を挿入した場合の4行の局所的ボイド反応度を基準にしたもの、39 $\frac{1}{4}$ 本炉心の場合のE列の局所的ボイド反応度を基準にしたもの、の4通りについて $\bar{\rho}^1$ を求めた。

(3)については、測定された熱中性子束に合うように熱中性子束を数値計算し、これに対応する随伴中性子束を使用して39 $\frac{1}{4}$ 本炉心の場合について $\bar{\rho}^1$ を求めた。

以上の方法により $\bar{\rho}^1$ を第2表に示す。表中1,2,3が同一条件、5,6が同一炉心条件で測定したものである。炉心状態の変化に従って平均ボイド反応度も多少変化していることがわかるが、同一条件による結果は、平均化操作の違いによってもそれほど変化していないし、5,6の結果の一致はむしろ一致しすぎの感がある。

子束の自乗の分布より、むしろ熱中性子束分布それ自身に近い分布になっている。したがって、この実験で求めた局所的ボイド反応度の炉心全体の和を求める場合には熱中性子束分布を基準にすることにした。これを熱中性子束分布の自乗を使って求めた場合は大体上に求めたものの80~90%程度になるので、第11図から求めた結果から考えて、熱中性子束分布それ自身を使った方がより近い結果が得られるものと考えられる。

Ⅲ. 結 果

HTR 炉心内で蒸気気泡ボイドを発生させたボイド反応度測定では、ボイドの発生仕方であつた実際のものと異なるが、体積ボイドに比べるとずっと実際のものに近いであろう。実験の主点は、局所的ボイド反応度の空間分布とその重畳性(加算性)にあつたが、これらの点について得られた結論は、

- (1) 局所的ボイド反応度は炉心内の全点で負である。
- (2) 局所的ボイド反応度の加算性の成立せず、そ

のズレは10%以上になる。したがって、炉心内平均ボイド反応度の評価は、局所的ボイド反応度の体積平均に補正係数を乗じてやる必要がある。

本報はボイド反応度の性質を現象論的にまとめたものであり、その意味で細かい理由づけ等の点では不十分であるかも知れない。また、この実験に関して終始実験にご協力下さった佛東京原子力産業研究所の方、全般を通じて適切なご助言を下された京都大学工学部の西原研究室の方々に衷心より感謝いたします。

〔付 録〕

ボイド率の測定

ボイド率の測定方法には種々あるが、最も簡便で、しかも HTR の模擬燃料要素のボイド率を測定するのに適当と思われる γ 線透過法を応用した。その結果、チッ素ガス流量とボイド率との間に、ほぼ直線関係があることがわかった。

実験の方法および装置はつぎのとおりである。

チッ素ガス流量とボイド率との関係は γ 線透過法により校正を行なった。第 A1 図は実験装置の概略図である。

第A1図 炉外校正実験図

HTR 炉心の実験の状態にできるかぎり近い状態を実現させるため、高さ 7 m の塩化ビニル製水槽を設置し、その下部にアクリライト製の模擬燃料チャネルを取り付け、その中にボイド用の模擬燃料要素を挿入できるような装置を組んだ。HTR 用の燃料要素は、側板がアルミニウム製で多数の穴があいているが、本装置におけるボイド燃料要素は外から気泡が観察できるように側板をアクリライト製で、気泡ボイドを燃料要素内に閉じこめるため穴なしとし、ウラン燃料棒の代わりにアルミニウム製模擬燃料棒を使用した点を除けば、両者はまったく同じである。チッ素ガスを送るア

ルミニウムパイプはアクリライト製の側板に固定され、他端は気泡発生用ノズルを形成している。すなわち、ノズルはアルミニウムパイプの下部を U 字形に曲げて端部をふさぎ、この部分に多数の小穴をあけて作った。ノズル穴の直径は最初 0.6 mmφ のものを使用した。気泡の粒径を小さくするために 0.2 mmφ のものに変更した。ノズル穴の部分は燃料要素内のウランペレットの最下部よりも数 cm 以上低い位置にくるように取り付けた。チッ素ガス流量の調節はガスポンプの減圧弁とガス流量計との間にある調節弁(ニードルバルブ)によって行なった。

γ 線源として ^{137}Cs (γ : 0.662 MeV) を用い、コリメータ付鉛製 γ 線源格納容器と NaI シンチレーション・カウンタヘッドを枠組みで固定して 1 体とする構造のものを製作し、線源とカウンタが模擬燃料要素の中にはさんで垂直方向に滑動できるように取り付けた。写真 1 が γ 線源と検出器ユニットを取り付けたものである。したがって、線源とカウンタの相対的位置は常に固定され、 γ 線ビームは常に 4 本の模擬燃料棒を避けて燃料要素の中心軸を通り、しかもこの軸に沿って走査できるようになっている。

写真 1 γ 線源と検出器ユニット

ボイドの校正は、まず最初に種々の厚さのアクリライト製水槽を作り、水の入っている場合と水の入っていない場合の透過 γ 線の計数値の比で基準校正曲線を作った(第 A2 図)。 $\alpha = (\text{ボイド体積}) / (\text{ボイド体積} + \text{減速材体積})$ を炉心全体についてのボイド率と定義し、 α_l は 1 燃料チャネル内のボイド体積および減速材体積を上式に適用した場合の α として定義する。つぎに、チャネルにチッ素ガスを流してボイドを発生させて測ったときには、

$$N_0 = N e^{-41\mu - 14\mu'}$$

$$N_\alpha = N e^{-41(1-\alpha)\mu - 14\mu'}$$

$$\therefore \ln N_\alpha / N_0 = 41\mu\alpha_l$$

$$\therefore \ln N_\alpha / N_0 = \ln N_\alpha / N_0$$

x : 水槽の厚さ(cm)
 N_x : 水槽の厚さが x cm の場合の計数値
 $N_{4.1}$: 水槽の厚さが 4.1 cm の場合の計数値
 α : 局所的ボイド率

第A2図 基準校正曲線

写真2 模擬ボイドチャンネル

ここに, N_0, N_α : ボイド率が0, α の場合の透過 γ 線の計数値

μ, μ' : 水, チャネル壁(アクリライト)材の γ 線吸収係数

であるから, N_α/N_0 を求めれば基準校正曲線によって、チッ素ガス流量と局所的ボイド率との関係を求めることができる。

実際の原子炉チャネルでは、隣接チャネルを通じて冷却水の循環ループを形成できるので、炉外実験でも写真2のようにして循環できるようにした。

チッ素ガス流量 3 l/min の場合の気泡の状態を写真に撮って見ると、ほぼ一様に気泡が分布している。またチッ素ガス流量 9 l/min の時の気泡の状態は、3 l/min の時のように一様でなく、気泡がところどころ層状となり膜沸騰現象に似た流れの状態を呈している。

写真1のように循環ループを形成している場合の結果を第A3図に示す。

第A3図 チッ素流量ボイド率の校正曲線 ($T=35^\circ\text{C}$) (流量計 15 l 用)

本会誌バックナンバー

会員は2割引で入手できる

本会誌の和文、欧文とも、一部の欠本(欧文 Vol.4, Nos. 1~3)を除いてバックナンバーは創刊以来揃っております。

会員には定価の2割引で頒布しますので、お申し込み下さい。(送料実費)

なお、上記欠本お譲り願える方はご一報願います。

「和文誌」・「欧文誌」各専用

合本ファイル

和文、欧文各誌約 12 冊を、簡単な操作で自由に入替えてできるファイルです。

布装幀で、金文字の和文、欧文の各誌名が入った美麗・堅牢なもの。

大変便利で好評をいただいております。

1冊 ￥200円(円別)