

ブローダウン時における圧力容器内流体の熱水力的挙動 (一体型炉ブローダウン実験装置による実験)

成合 英樹*・永留 正市**・阿曾 滋男**

Thermo-Hydraulic Behavior of Fluid in Pressure Vessel during
Blowdown
(Results and Discussions of the Experiments with the Facility
for the Blowdown Behavior of Integrated Type Marine Reactors)

By

Hideki NARIAI, Masaichi NAGATOME and Shigeo ASO

Summary

Thermo-hydraulic behavior of fluid in pressure vessel during blowdown was experimentally investigated with the Facility for the Blowdown Behavior of Integrated Type Marine Reactors. The dimensions of the pressure vessel used for the experiments were 284mm ID and about 1700mm height. 34 experiments were conducted with various combinations of following parameters: three orifice diameters (25.4, 12.7 and 6.4mm), three initial saturation pressures of fluid (50, 40 and 30kg/cm²g), three break positions (upper, middle and lower), two liquid levels, and two volume numbers (with and without internals). Pressures in pressure vessel, differential pressures between upper and lower nozzles, and void fractions at vertically 6 points in pressure vessel were measured during blowdown. A computer code (BLODAC-IV) was developed to analyse the single volume blowdown characteristics. The code includes so-called bubble gradient model for the steam distribution in water and some input parameters. The experimental results of pressures, void fractions and falling speed of liquid level were compared with the calculational results, and the combinations of the values of input parameters were determined so that the results of calculations fit well for the experimental results. The blowdown characteristics and the combinations of input parameters were explained by the newly derived experimental results of void distributions in water.

目 次

- 1. まえがき
- 2. 実 験

- 2.1 実験装置

- 2.1.1 実験装置本体

- 2.1.2 計 装

- 2.2 実験方法

- 2.2.1 実験概要と手順

- 2.2.2 実験条件

- 2.2.3 実験データの整理

- (1) 圧力特性の整理

- (2) 差圧特性の整理

*原子力船部 **三井造船株式会社

原稿受付：昭和52年2月23日

- (3) ボイド率の整理
- 2.3 実験結果
 - (1) 3ボリューム上部破断実験
 - (2) 1ボリューム上部破断実験
 - (3) 1ボリューム下部破断実験
 - (4) 1ボリューム中部破断実験
- 3. 実験結果の考察
 - 3.1 破断口位置と圧力降下特性
 - 3.2 破断口径と圧力降下特性
 - 3.3 その他の圧力特性
 - (1) 1ボリュームと3ボリュームの相違
 - (2) ブローダウンの再現性
 - 3.4 差圧とボイド率及び水面降下の関係
 - 3.5 ヒーター有無によるボイド率の相違
 - 3.6 破断口径とボイド率
 - 3.7 気泡勾配モデルとボイド率
 - 3.8 ヒーター表面温度について
- 4. 解析
 - 4.1 RELAP 3 及び4解析コードについて
 - 4.2 BLODAC コードの概要
 - (1) 圧力容器内のエネルギー及び質量の式
 - (2) 気泡勾配モデル
 - (3) 流出流量の式
 - (4) 流出流体エンタルピ
 - (5) BLODAC コード
 - 4.3 BLODAC と RELAP 3 及び4 との比較
 - 4.4 BLODAC コードにおけるインプットパラメータ C_{D2} , V_B の整理
 - 4.5 可変パラメータモデルの検討
 - 4.5.1 流量係数 C_D について
 - 4.5.2 気泡離脱速度 V_B について
 - 4.5.3 可変パラメータモデルによる比較
- 5. まとめ
- 6. 引用文献
- 7. あとがき

要 旨

一体型炉ブローダウン実験装置により、圧力容器からのブローダウン特性を調べるため34回の実験を行った。圧力容器の寸法は内径284mmで高さ約1,700mmである。実験は放出オリフィスが25.4mm, 12.7mm及び6.4mmの3種、初期飽和水圧力が50kg/cm²g～30kg/cm²g, 破断口位置が上部、中部および下部の各種条件下で行った。

圧力と圧力容器内上下間の差圧および圧力容器内の垂直方向6ヶ所のボイド率の測定を行い、特にブローダウン中のボイド率分布について新しいデータを得た。

1ボリュームブローダウン特性の解析のため、気泡勾配モデルを含む解析コード BLODAC-1Vを作成し、圧力、ボイド率及び水位降下速度の実験データをよくあわせて計算結果を与えるインプットパラメータの組合せを求めた。

ボイド率に関する実験結果よりインプットパラメータ及びブローダウン特性に関する考察を行った。

1. ま え が き

一体型船用加圧水炉は、船用原子炉のコンパクト化を目指したものであって、大型の圧力容器の中に蒸気発生器を内装し、ポンプを圧力容器へ直接取付け、さらに自己加圧方式を採用することによって独立な加圧器をはぶくなどして、一次水循環用主配管のない構造にし、さらに、この圧力容器を圧力抑制式格納容器へ組込んだものである。

この船用炉を安全性の観点からみた場合、従来の加圧水炉と異なって、大口径の一次冷却水循環用主配管がないため、想定される冷却水喪失事故は、制御棒駆動用の貫通孔の破損などによるもので、いわゆる発電用軽水炉の中小破断に相当するものと考えられる。この際の冷却水流出（ブローダウン）特性、残留水と崩壊熱除去特性、非常用冷却水（ECC水）による燃料棒冷却特性、流出した高温の水蒸気の圧力抑制室内における圧力抑制効果特性などの把握が重要になる。

本研究は、圧力容器からのブローダウン特性を模擬実験的に把握する目的で、「一体型炉ブローダウン実験装置」を製作し、実験及び解析を行ったものである。従来の加圧水炉では、配管系の破断に伴って、圧力容器、加圧器、蒸気発生器とこれらを結ぶ配管系内を蒸気と水の混合物が複雑に流動して破断口から流出するのに対し、一体型船用炉におけるブローダウン現象の特徴は、圧力容器貫通部の破断口や中小配管からの流体の流出であって、これに伴い圧力容器内の水位は低下し燃料棒を露出させる場合があることである。このような観点から一体型船用炉では、圧力容器内の水のブローダウン時における熱流力の挙動の把握が特に重要であり、模擬実験装置もこの点を考慮して製作を行った。すなわち、圧力容器の破断口が、上部、中部、下部の3つの位置である場合の実験が行えるこ

と、破断口径を変えられること、压力容器内に内部構造物を入れて、蒸気発生器の存在を模擬する実験が行えることなどであり、压力容器内の熱流力の挙動の把握のために压力容器内圧力、压力容器内垂直方向6ヶ所におけるボイド率（蒸気体積率）、及び压力容器内の上部と下部間の差圧の測定を行うようになっている。

本実験装置により34回の実験を行った。実験は压力容器内に内部構造物を取付けたいわゆる3ボリューム実験（上部破断のみ）を7回、1ボリューム実験のうち上部破断実験9回、中部破断実験5回、下部破断実験13回である。

本報告は、これらの実験結果を整理し、さらにこれまで行った検討結果、特に1ボリューム実験について、解析結果との比較により行った検討結果を中心に、まとめたものである。

本研究の結果ブローダウン中の压力容器内の垂直方向ボイド率分布について新しいデータを得たこと、こ

のボイド率分布を利用してブローダウン特性の説明を行ったこと、解析モデルのインプットパラメータを、圧力特性とボイド率特性の両方から決めるという方法を行ったことなど、ブローダウン特性の把握に多くの有益な知見が得られた。これらは、将来の一体型炉ブローダウン解析コードの作成上の資料として利用できるものと考えられる。

2. 実 験

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置本体

図2-1に実験装置のフローシートを示す。図に示すように、実験装置本体は压力容器とダンプタンク及びこれらをつなぐ放出系配管よりなるものであって、これに計装配管、給排水配管及びN₂ガス系配管が取付けられており、全体を架台に組込んで固定したものである。

図2-2に压力容器の主要寸法を示す。压力容器は

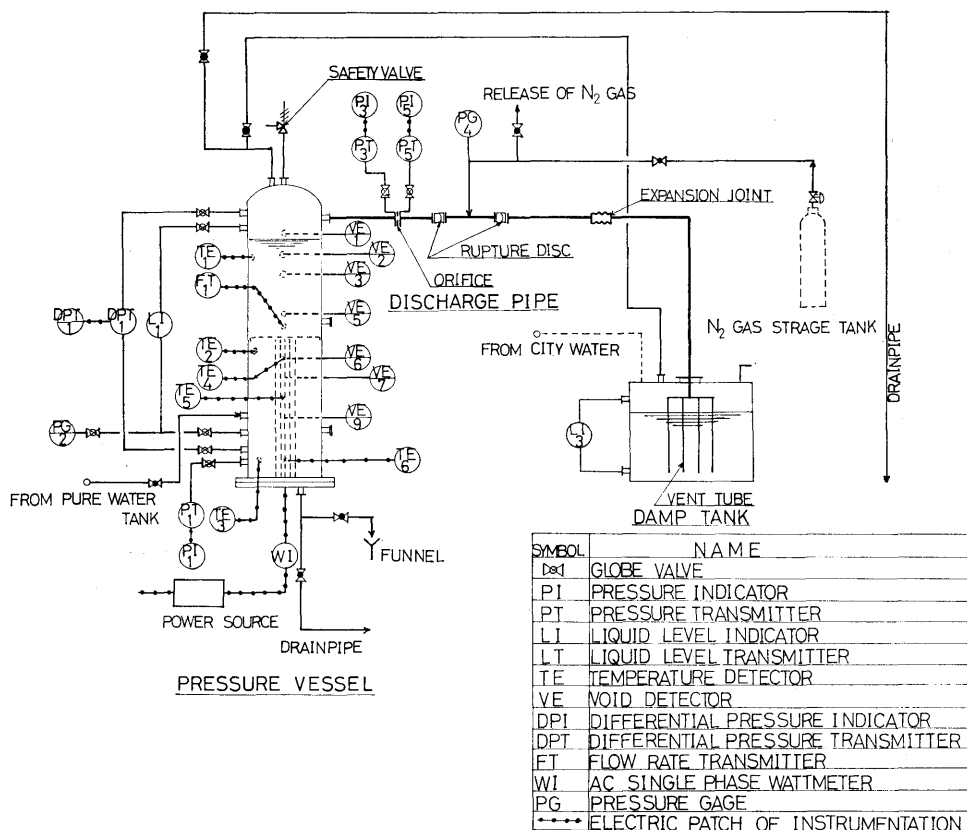


図 2-1 実験装置 フローシート

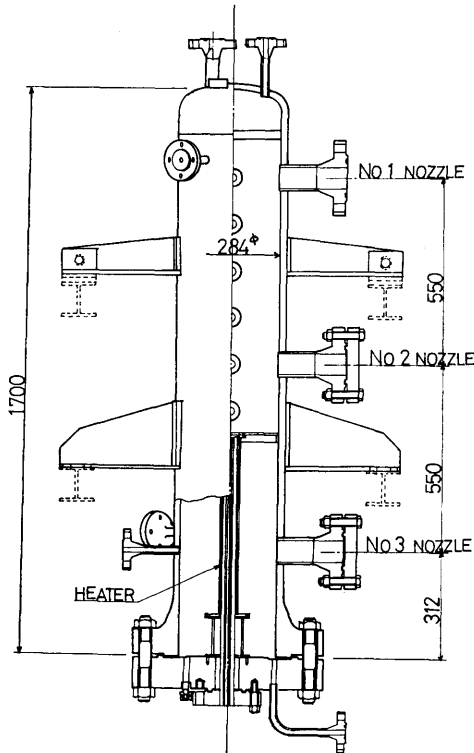


図 2-2 圧力容器 主要寸法

内径約 284mm ϕ 、高さ約 1700mm であって、下部の取付フランジからヒーターを出し入れできる構造になっている。圧力容器側面には 3 本のノズルが取り付けられている。このノズルに放出系配管を取付けることにより、No. 1 ノズルの場合上部破断、No. 2 ノズルの場合中部破断、及び No. 3 ノズルの場合下部破断の実験を行えるようになっている。各ノズルの位置は下部フランジ面より、1412mm (No. 1 ノズル) 862mm (No. 2 ノズル)、312mm (No. 3 ノズル) である。

本圧力容器の主要設計仕様は以下の通りである。

設計圧力	60kg/cm ² g
設計温度	276°C
使用圧力	50kg/cm ² g 以下
使用温度	264°C 以下
材質	S T P T 38 及び S F 45

なお、本圧力容器にはヒーター周囲に内部構造物を取付けられるようになっている。これはヒーター上部プレナム部、ヒーター外周部、ヒーター部の 3 つに圧力容器内の空間を分割し、それらの間は小孔で連絡するようになっており、ある程度、実際の一体型船用炉の圧力容器内の上部プレナム部、蒸気発生器部、等を

模擬した実験ができるようになっている。この内部構造物の主要寸法を図 2-3 に示す。

図 2-4 に放出系配管の主要寸法を示す。図にみるように、放出系配管はオリフィス、ラプチャディスク、及び伸縮継手とそれらをつなぐ配管よりなるものである。オリフィスは破断口径を模擬するものであり、本実験では以下の仕様のものを使用した。

開口径	25.4mm ϕ (1 インチ)
	12.7mm ϕ (1/2 インチ)
	6.4mm ϕ (1/4 インチ) の 3 種

材質 SUS304

ラプチャディスクは破断を模擬するためのものであって、希望する時に破断を生じさせるため 2 枚方式をとっている。すなわち、圧力容器内流体が 50kg/cm²g の時破断を生じさせるためには、35kg/cm²g で破断する 2 枚のラプチャディスクを使用し、この 2 枚のラプチャディスク間を N₂ ガスで 25kg/cm²g に加圧しておく。その場合、圧力容器内流体と N₂ ガスの間の差圧は 25kg/cm² であり、又 N₂ ガスと下流側との差圧も 25kg/cm² であるためラプチャディスクは破断しない。破断を生じさせる時にはこの N₂ ガスを抜いてやることにより、まず上流側ラプチャディスクの差圧が 35kg/cm² 以上となって破裂し、次いで下流側ラプチャディスクの差圧が 35kg/cm² 以上となって破裂することになる。

ラプチャディスク主要仕様は以下の通りである。

破裂差圧	35kg/cm ² (50kg/cm ² 実験用)
	30kg/cm ² (40kg/cm ² ")
	25kg/cm ² (30kg/cm ² ")

呼 径 3^B

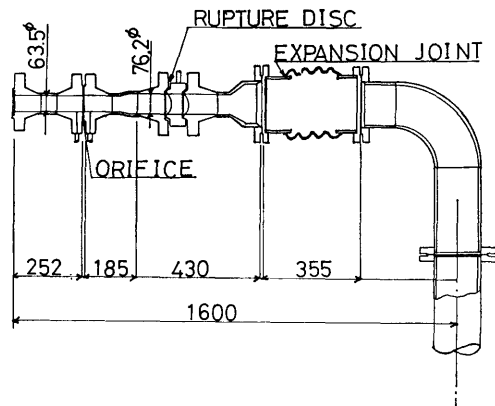


図 2-4 放出系配管 主要寸法

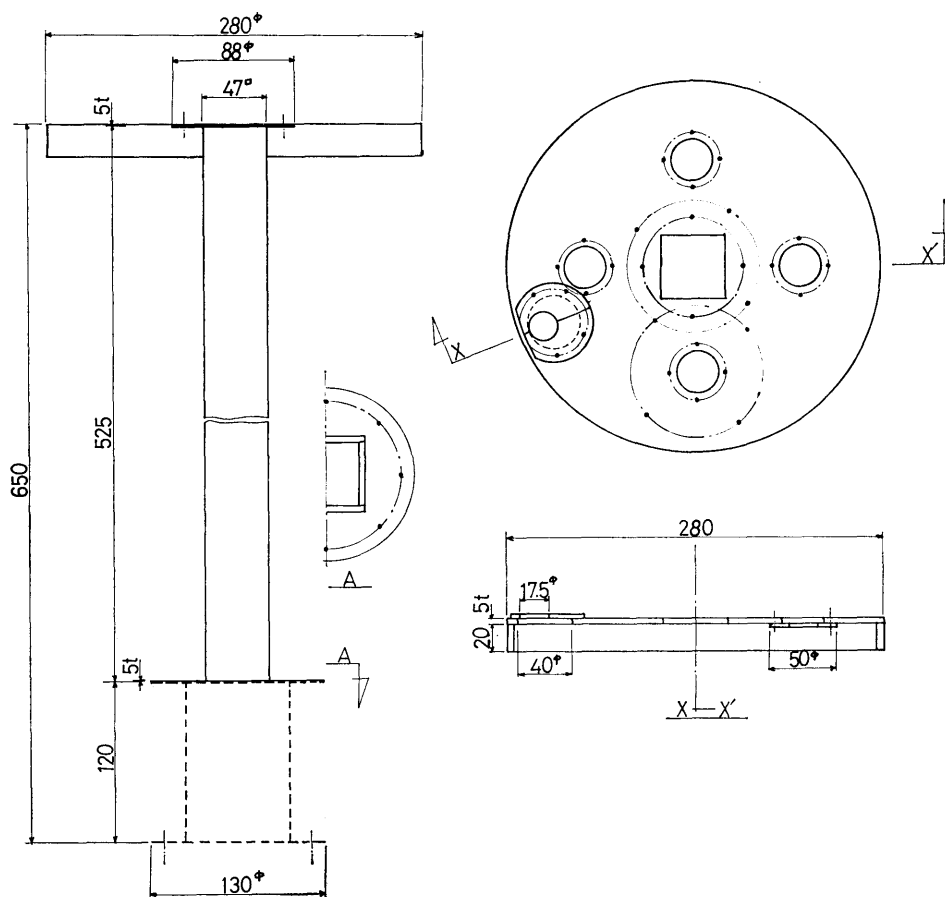


図 2-3 内部構造物 主要寸法

材 質 SUS316

伸縮継手は配管の熱膨張を逃げ、さらにオリフィスやラプチャディスクの交換の際に配管をよせるため用いるものであって以下の仕様である。

型式 ベローズ型

寸法 6B×355L

材質 SB42 及び SF45

ダンプタンクは、幅900mm、長さ900mmで、高さ1mのSS41製角型タンクで、中に水道水を入れて、放出系からきた蒸気を凝縮させる構造になっている。放出管（ベント管）は長さ 550mm、呼径 2^B のSGP管 8本よりなるものである。

圧力容器内部のヒーターはシースヒーターであり以下の仕様に従っている。

型 式 シースヒーター

数 量 9本（3×3の四角配列ピッチ15.5mm）

外 径 11mm

発熱部長さ 590mm

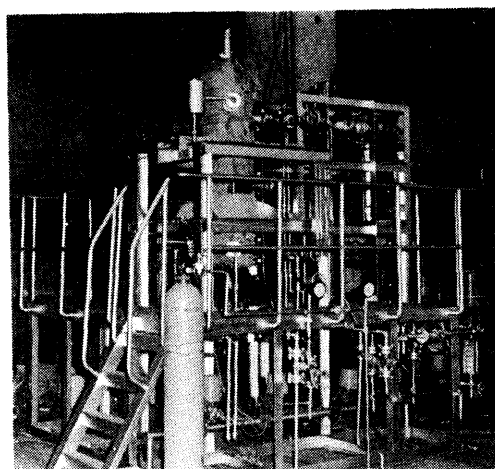


写真 2-1 装置全体写真

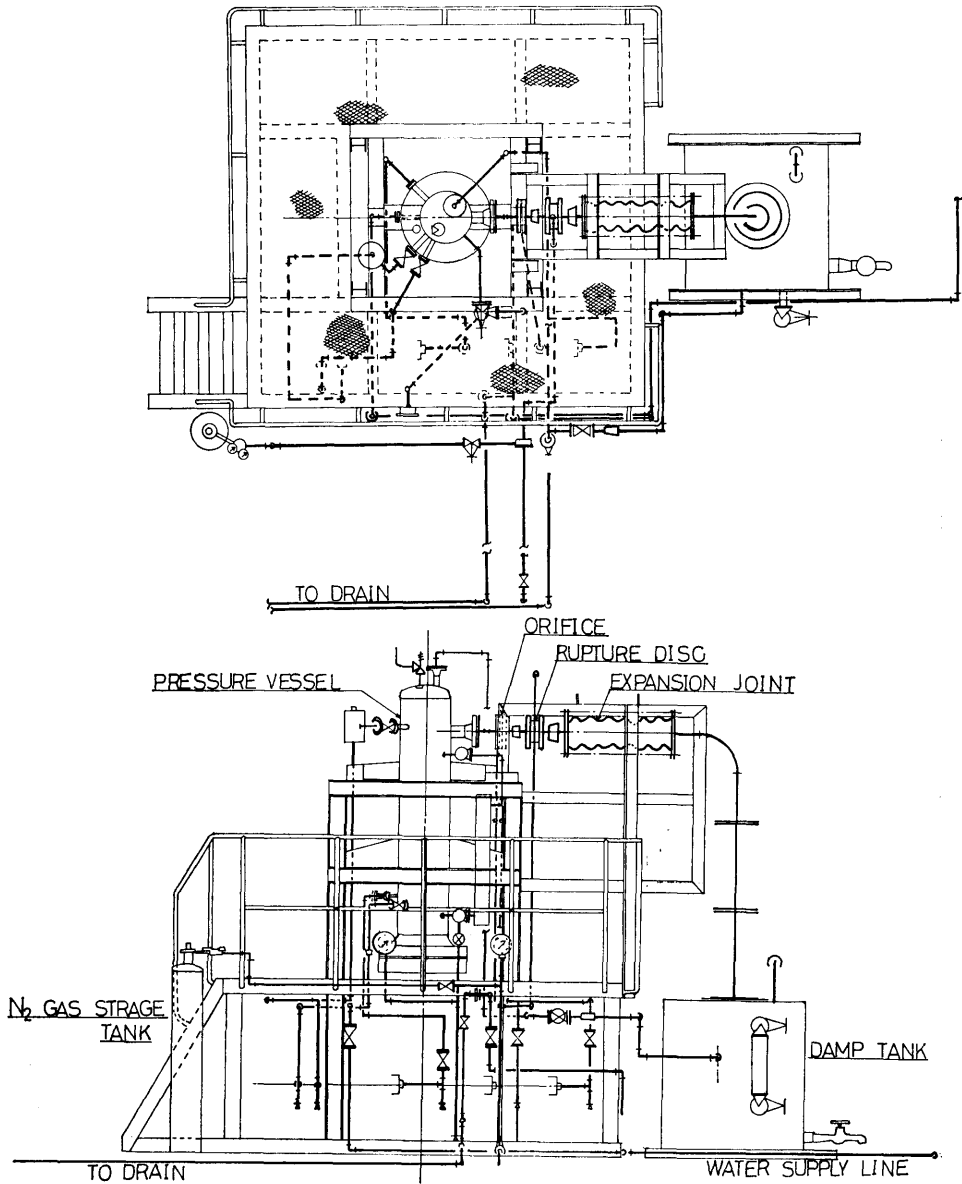


図 2-5 実験装置 全体図

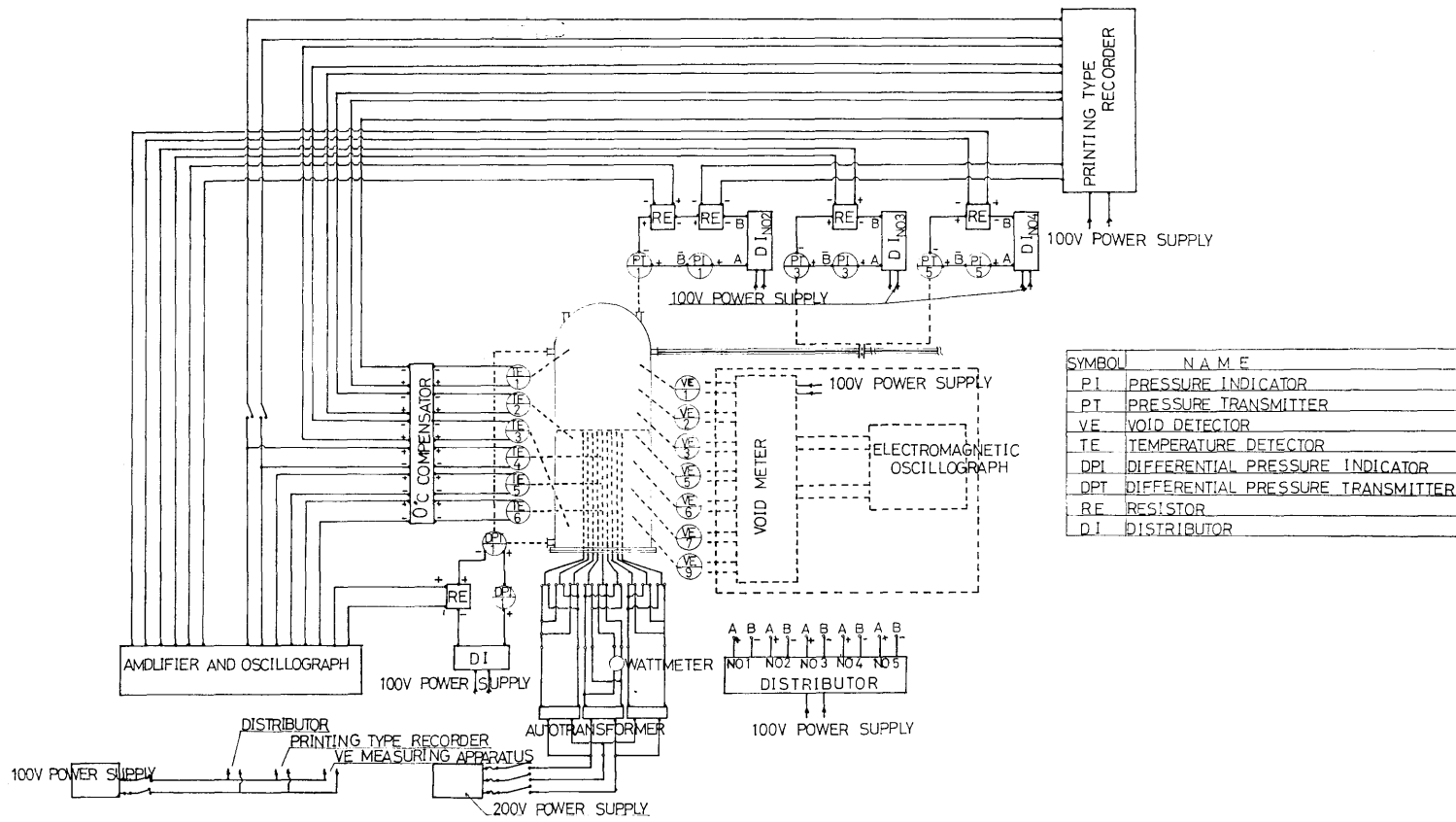
電気出力 2.25kW/本
 最大使用電圧 200V A C
 設計耐外圧 60kg/cm² g
 最大熱流束 0.8×10⁹kcal/m²h
 材 質 インコネル 600 (シーブ)
 MgO (絶縁体)

図 2-5 に実験装置本体の全体図を示す。写真 2-

1 に装置全体の写真を示す。

2.1.2 計 装

図 2-6 に計装配線図を示す。計測として压力容器内圧力 (P T-1), 放出系オリフィス上流側圧力 (P T-3), 放出系オリフィス下流側圧力 (P T-5) の 3 点の圧力の測定, 压力容器内の No. 1 ノズルと No. 3 ノズル間の差圧 (D P T-1) の測定, 圧力容



SYMBOL	N A M E
PI	PRESSURE INDICATOR
PT	PRESSURE TRANSMITTER
VE	VOID DETECTOR
TE	TEMPERATURE DETECTOR
DPI	DIFFERENTIAL PRESSURE INDICATOR
DPT	DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER
RE	RESISTOR
DI	DISTRIBUTOR

圖 2-6 計 裝 配 線 圖

表 2-1 測定器リスト

記号	名称	検出変換器	検出変換器仕様	増幅器
TE-1	圧力容器内流体温度	シーース熱電対	クロメル・アルメル	直流増幅器 6L1-P (三栄測器)
TE-2	〃		接地型	
TE-3	〃		外径 1.0φ	
TE-4	ヒーター表面温度	シーース熱電対	クロメル・アルメル	
TE-5	〃		接地型	
TE-6	〃		外径 1.6φ	
PT-1	圧力容器内圧力	ベローズ式 圧力変換器	レンジ 0~100kg/cm ² g 出力シグナル 4~20mA DC (横河電機)	〃
PT-3	オリフィス上流圧力			
PT-5	オリフィス下流圧力			
DPT-1	圧力容器内差圧	キャプセル型 差圧変換器	レンジ 0~1500mmH ₂ O 出力シグナル 4~20mA DC	〃
VE-1 VE-9	ボイド計		触針式	直流増幅器 6L1-P型 6L3型 (三栄測器)

器内の垂直方向3ヶ所の流体温度 (TE-1~TE-3) 及び中心のヒーター棒の垂直方向3ヶ所の外壁面に取付けた熱電対によるヒーター表面温度 (TE-4~TE-6) の測定, 触針式ボイド計による圧力容器内の垂直方向最大6点のボイド率の測定 (VE-1~VE-9) を行った。

また記録は, 圧力容器内の3点の流体温度と1点のヒーター表面温度, 及び圧力容器内圧力について, 打点式記録計で記録して, 実験条件の設定に利用し, 実験中の記録として各圧力と差圧及びヒーター表面温度を直流増幅器を通して電磁オッシログラフで記録すると共に, 最大6点のボイド計からの信号を電磁オッシログラフに記録した。

また, ヒーターの入力は電力計で読みとった。

各測定器のリストを表2-1に示す。

このほか圧力容器内圧力 (PG-2) 及びラプチャディスク間の N₂ ガス圧力 (PG-4) をブルドン管ゲージ圧力計で監視すると共に, 圧力容器内水位とダンブタンク内水位をそれぞれ LL-1 及び LL-3 で読みとった。

2.1.3 ボイド計

本実験のボイド率の測定に触針式ボイド計を用いた。この原理を図2-7に示す。すなわち, ボイド計の先端に蒸気が来るか, 水が来るかを抵抗の変化として記録しようとするものであって, 3Vの直流をセン

サー先端の針とスリーブ間 (間隔 1mm以下) に加えておいて抵抗の変化に伴って変化する電流の変化を直流増幅器で増幅して電磁オッシログラフ上に記録するものである。

このボイド計の取付位置を図2-8に示す。すなわ

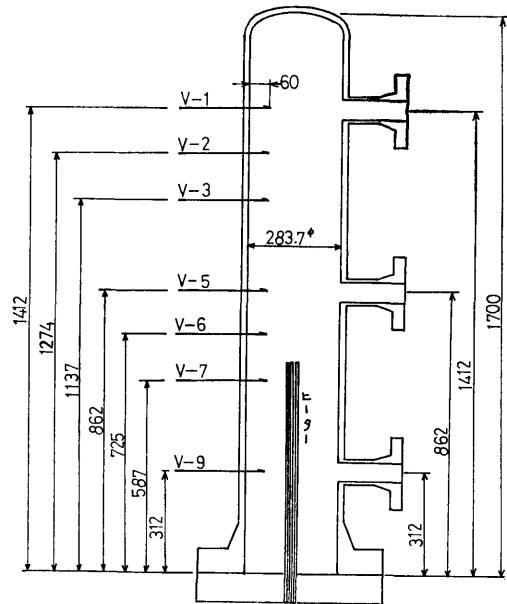


図 2-8 ボイド計取付位置

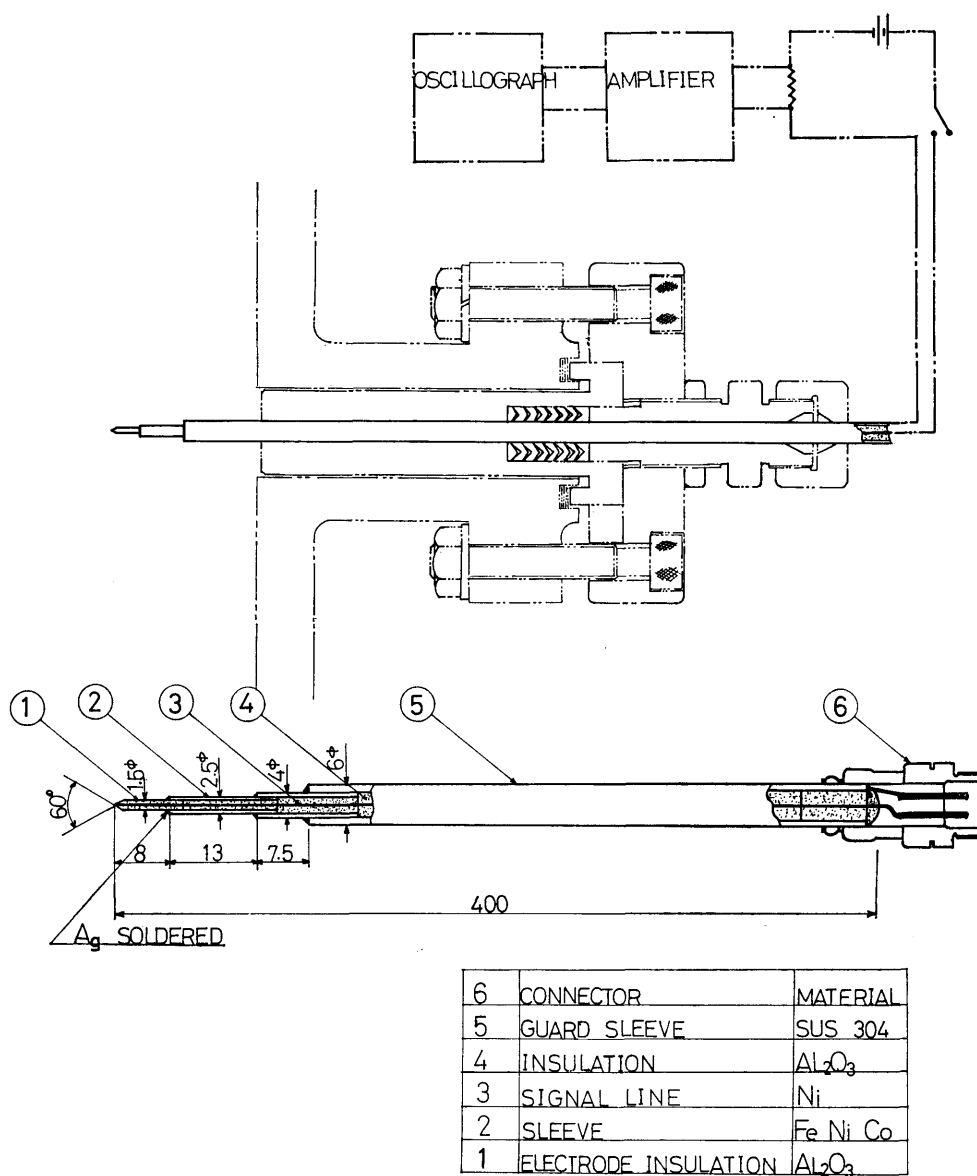


図 2-7 触針式ボイド計原理図

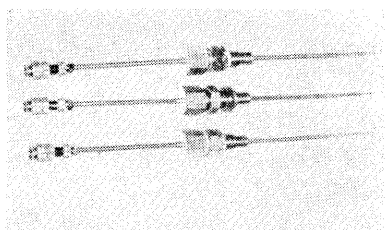


写真 2-2 ボイド計センサー写真

ち、V-1～V-9が各取付位置におけるボイド計の呼称であって、上方より番号をつけたものである。各番号間の距離は37.5mmである。また図に示すように、ボイド計の先端は壁面より約60mmの位置に調整した。センサーの写真を写真2-2に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 実験概要と手順

本実験は圧力容器内で高温高圧の飽和水をつくり、破断口を模擬するオリフィスを通して大気圧のダンプタンク中へ放出させることによって、ブローダウン現象を模擬するものであって、この間の圧力容器内の圧力、温度、差圧と共に圧力容器内のボイド率の測定を行うことによって、ブローダウン時の圧力容器内流体の熱流力的現象を把握しようとするものである。ダンプタンク中へ放出された蒸気と水の混合物をダンプタンク中の水中で凝縮させ、圧力上昇をふせぐと共に、大気中への気水混合物の噴出をふせぐようになっている。

実験は以下の手順で行う。まず、実験条件に従って放出系のオリフィスと2枚のラプチャディスクを取付ける。また、測定すべき位置にボイド計を取付ける。装置の準備が終了後、直流増幅器とビジグラフ及びボイド測定器を調整して記録に備える。次に水道水をダンプタンク内の適当な位置まで入れ、さらに圧力容器には所定の位置までイオン交換樹脂で処理した水を入れる。圧力容器の上部大気開放弁を開いて、上部空間を大気へ開放した状態でヒーターをONにして大気圧下で加熱し、打点記録計による圧力容器内の流体温度記録を監視しつつ、沸騰状態になるのを待つ。沸騰状態をしばらく続け、十分脱気を行って後大気開放弁を閉じ加圧を開始する。この際、水位が所定の値となるよう水抜きなどを行って調節する。圧力の上昇に伴って2枚のラプチャディスク間に N_2 （窒素）ガスを加えていく。すなわち、圧力容器内の圧力の上昇に伴い、ほぼその半分の圧力まで大体 5 kg/cm^2 ごとに N_2 ガスを加えていくことにより、ラプチャディスク間差圧のバランスを保ち、最終的に所定の圧力に対し半分の圧力の N_2 ガスがラプチャディスク間に加わっていくようにする。

実験条件が整ったところで、記録計を動かす。次いで N_2 ガス放出用弁を開いて、ラプチャディスク間の圧力を抜くことにより、順次ラプチャディスクを破壊させてブローダウンを生じさせる。ブローダウンにより圧力容器内圧力がほぼ大気圧まで降下し、流体の激しい動きがなくなったところでブローダウン終了とみなし、記録計を停止して実験を終る。

この実験では以下の如き状況が生ずる。すなわち、 N_2 ガスを抜くとしばらくして、ドンという音と共にラプチャディスクの破断が生ずる。通常1回の音しか聞こえないので2枚のラプチャディスクの破壊はほとんど同時に行われていると思われる。ラプチャディス

クが破壊するとダーという音と共に圧力容器内の水と蒸気が放出系を通してダンプタンク中へ噴出する。この際、場合によっては実験装置全体がゆれる程の大きな力が作用することがある。また、下部破断などブローダウン量が多くて激しい時には、放出系にあった空気が蒸気に押されてダンプタンクへ激しい勢いで押し込まれるので、ダンプタンク内の水が大気開放孔を通して空気銃砲式に空中へ飛出すことがある。ブローダウンは時間が経過するに従って激しさが減少してくるが、 6.4 mm のオリフィスによる実験の際、圧力が $30 \sim 20 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ へ低下した時、ダンプタンク内での蒸気の凝縮現象と関連して、 $10 \sim 20$ 秒間隔でダンという装置全体をゆるがす衝撃音がいくつか続けて発生したことが特徴的であった。

2.2.2 実験条件

実験は総計34回行った。始めの7回は圧力容器内部に内部構造物を入れた状態で行ったが、後の27回は内部構造物を取り除いた状態で実験し、1ボリュームでの圧力容器内の熱流力的特性を把握することを主目的としたデータを得た。表2-2に全実験データを示す。すなわち、表には実験番号、実験年月日、実験条件（3ボリューム又は1ボリューム）、破断口位置（上部、中部、又は下部）、圧力容器内飽和水初期圧力、破断口径（1インチ、1/2インチ又は1/4インチ）、飽和水初期水位、ヒーター出力（大部分の実験ではOFFとした。）ボイド計取付位置（×印は測定失敗、△印は始めから蒸気部分に取付けられているためボイド率を測定できなかったもの、を示す。）実験終了後に圧力容器内に残った残留水量及び備考として参考事項がのせられている。この表よりわかるように、3ボリュームの上部破断実験を7回、1ボリュームの上部破断実験を9回、1ボリュームの中部破断実験を5回、1ボリュームの下部破断実験を13回行った。ヒーターは3ボリュームの実験及び5回の1ボリュームの上部破断実験にはONとし、約 $8 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ の熱流束に相当する $2.2 \sim 2.3 \text{ kW}$ /本の加熱をブローダウン中に行いヒーター表面温度の変化をみた。熱流束が小さいため、加熱の影響はあまりみられず、表面温度も水位が降下してヒーターが完全に露出して後上昇を始めた。初期飽和圧力は設定したものと、実際の値とが若干異っており表中には、その両者が記されている。水位は実験開始時に水位計で読みとった値（%）と、これを換算計算によって高さ（m）に直した値の両者を記した。残留水量は、残留水を台秤で測ったものである。

表 2-2 実験条件

実験 番号	年月日	Vol. 数	破断口 位置	初期 圧力	破断 口径	初期水位		ヒー ター	ボイド計			残留 水量	備 考
				atg	1"	%	m					kg	
1	1974年 10月16日	3	上部	50	1"	87.5	1.30	OFF	1	5	9	6.85	
2	10月23日	3	上部	30	1	89	1.27	2.25 ^{kw}	1	5	9	12.95	
3	11月9日	3	上部	40	1	90	1.30	2.33 ^x	1	5	9	10.0	
4	11月13日	3	上部	50	½	90.5	1.34	2.25	1	5	9	19.2	
5	11月15日	3	上部	30	½	90	1.28	2.25	1	5	9	26.0	
6	11月22日	3	上部	50	½	90.5	1.34	2.22	1	4	5	17.8	No.4 ボイド計位置 内壁より 147mm
7	11月29日	3	上部	50	½	90	1.33	2.20	1	4	5	18.5	No.4 ボイド計位置 内壁より10mm
8	12月6日	1	上部	50	½	89.5	1.33	2.24	1	5	9	25.7	
9	12月9日	1	上部	30	½	90.5	1.29	2.25	1	5	9	33.5	
10	12月13日	1	上部	30	1	90	1.28	2.34	1	5	9	20.4	TE-4 95秒で上昇
11	12月16日	1	上部	50	1	90	1.33	2.20	1	x	x	14.1	TE-4 70秒で上昇
12	1975年 2月10日	1	上部	30	1	90	1.28	OFF	1 2 3	x	x	20.6	DPT測定せず
13	2月14日	1	上部	30	1	89.6	1.27	2.18	1 2 3	x	x	20.4	DPT測定せず
14	4月1日	1	上部	50	1	90	1.33	OFF	1 2 3	x	x	14.9	
15	4月10日	1	上部	30	1	59.5	0.91	OFF	1 2 3	x	x	21.2	
16	4月21日	1	上部	50	1	60.5	0.95	OFF	1 2 3	x	x	15.2	
17	9月8日	1	下部	50	1	90.5	1.34	OFF	△	1 2 3	5 7 9	2.7	
18	9月20日	1	下部	30	½	90	1.28	OFF	△	1 2 3	5 7 9	7.6	
19	9月26日	1	下部	50	½	60	0.95	OFF	△△△	1 2 3	5 7 9	6.1	
20	10月2日	1	下部	44	½	90		OFF	△△	1 2 3	5 7 9	6.4	DT-1 測定できず (所定の値に達する 前にブロー)
21	10月8日	1	下部	50	½	86.5	1.29	OFF	△△	1 2 3	5 7 9	6.7	

実験 番号	年月日	Vol. 数	破断口 位置	初期 圧力	破断 口径	初期水位		ヒー ター	ボイド計	残留 水量	備 考
				atg	1/2"	%	m		△	kw	
22	1975年 10月16日	1	下部	50	1/2"	91	1.34	OFF	△ 1 2 3 5 7 9	5.9	
23	10月22日	1	下部	30	1/2	60	0.92	OFF	△△△ 1 2 3 5 7 9	9.15	
24	12月10日	1	下部	50	1	60	0.95	OFF	△△△ 1 2 3 5 7 9	4.0	
25	12月24日	1	下部	30	1	90	1.28	OFF	△△ 1 2 3 5 7 9	4.7	
26	12月26日	1	下部	30	1	60	0.92	OFF	△△△ 1 2 3 5 7 9	4.2	
27	1976年 1月14日	1	下部	50	1/4	90	1.33	OFF	△△ 1 2 3 5 7 9	8.2	途中でブローさせた ため早く圧力落ちる (圧力記録が切れた)
28	1月29日	1	下部	50	1/4	90	1.33	OFF	△△ 1 2 3 5 7 9	7.0	
29	2月5日	1	下部	30	1/4	90	1.28	OFF	△△ 1 2 3 5 7 9	10.0	
30	4月14日	1	中部	50	1	90	1.33	OFF	× 2 3 5 6 7 9	9.3	
31	4月15日	1	中部	30	1	90	1.28	OFF	2 3 5 6 7 9	10.15	
32	4月17日	1	中部	30	1/2	90	1.28	OFF	×× 2 3 5 6 7 9	20.85	
33	4月23日	1	中部	50	1/2	90	1.33	OFF	× 2 3 5 6 7 9	16.65	
34	4月26日	1	中部	50	1/4	90	1.34	OFF	× 2 3 5 6 7 9	21.75	

2.2.3 実験データの整理

(1) 圧力特性の整理

ビジグラフ上に圧力容器内圧力P-1及び放出オリフィス前後の圧力P-3, P-5の時間的変化が得られた。これから1秒ごとの圧力値を読みとりグラフとして整理した。なお、P-1とP-3の圧力変化はほぼ同じ値を与え、またP-5はラプチャディスク破断後すぐ大気圧へ向って急降下する特性を示したので、P-3, P-5はチェックを目的とし、本報告にはP-1の結果のみを示した。

(2) 差圧特性の整理

上部放出ノズルと下部放出ノズル間の水位を測定する目的で、この間の差圧の時間的変化をビジグラフ上に記録した。圧力容器内の飽和水と飽和蒸気の比重量は圧力によって異なるため、差圧指示計の読みと実際の水位も圧力によって異なる。そこで大気圧の下で、

差圧指示計と差圧変換器の出力電流及び差圧計のスパン間水位の関係を検定し、これをもとに任意圧力の水位を差圧指示計の読みから求める方法をとった。

○ 検 定

表2-3に検定値として求めた差圧指示計の指示値(0~100%)、差圧変換器の出力電流(4~20mA)、及び差圧計のスパン間水位(mm)の関係を示す。これを差圧指示計の指示値と、差圧変換器の出力電流及びスパン間の水位の関係として与えたのが図2-9である。この図より明らかなように、指示計指示値の0~100%が差圧変換器の出力電流4~20mAにはほぼ対応して設計通りになっていること及び指示計の指示値と水位には直線性があることがわかる。

○ 任意圧力における差圧指示計の指示値(又は出力電流)と水位の関係

大気圧における検定データより、任意圧力における

表 2-3 差圧計の検定値

差圧指示計	出力電流	スパン間水位
91%		805mm
81%	17.1 mA	710mm
70%	15.4 mA	608mm
60%	13.8 mA	510mm
50%	12.2 mA	410mm
40%	10.65 mA	320mm
30%	8.95 mA	220mm
20%	7.35 mA	125mm
50%	12.1 mA	405mm
80%	16.95 mA	700mm
91%	18.65 mA	805mm

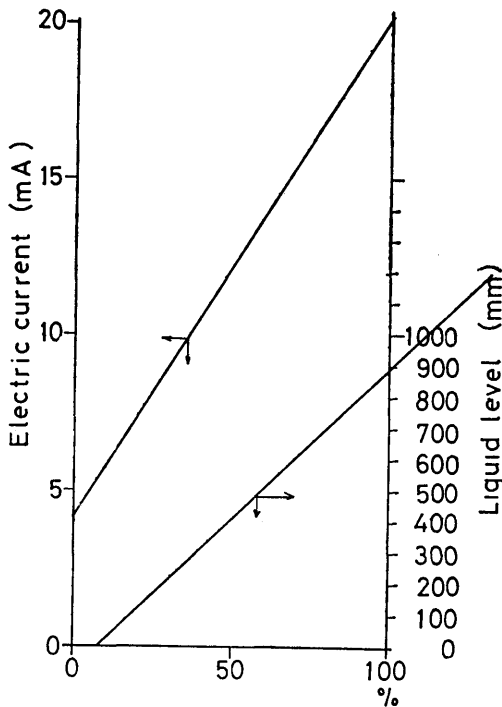


図 2-9 差圧計検定線図

指示値と実際の水位との関係を求める。そのため、まず差圧変換器の調整による Suppression 差圧: S_{up} (kg/m^2) 及び Span 差圧: S_{pan} (kg/m^2) を定めなければならない。図 2-10 に示すように、スパンを H

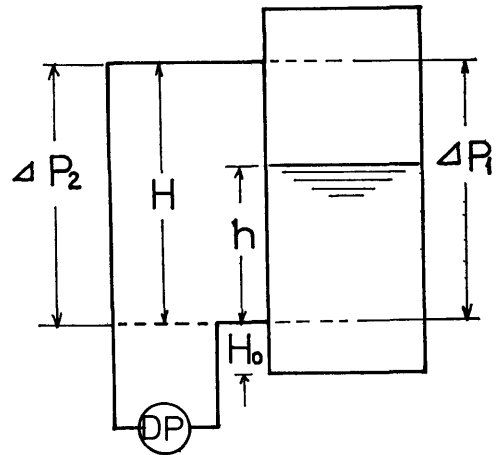


図 2-10 差圧測定記号図

(m)、水位をスパン間で h (m)、压力容器内で $h+H_0$ (m) とすると、压力容器内のスパン間差圧 ΔP_1 は

$$\Delta P_1 = h\gamma_l + (H-h)\gamma_g$$

導圧管内のスパン間差圧 ΔP_2 は、

$$\Delta P_2 = H\gamma_r$$

ただし、 γ_l , γ_g はその圧力での水と蒸気の比重量、 γ_r は 40°C の水の比重量である。この場合 $\Delta P_2 > \Delta P_1$ なので、 h の増大と共に ΔP_1 が増大して差圧計 DP の出力は減少することになる。そこで ΔP_2 に Suppression をかけて引落とし、

$$\Delta P_1 > \Delta P_2 - S_{up}$$

となるようにしている。また、指示計指示値 0 ~ 100% になるよう $\{\Delta P_1 - (\Delta P_2 - S_{up})\} / S_{pan}$ の形で Span を用いる。以上により指示計指示値を $x\%$ とすると

$$\frac{x}{100} = \frac{h(\gamma_l - \gamma_g) + H\gamma_g - (H\gamma_r - S_{up})}{S_{pan}}$$

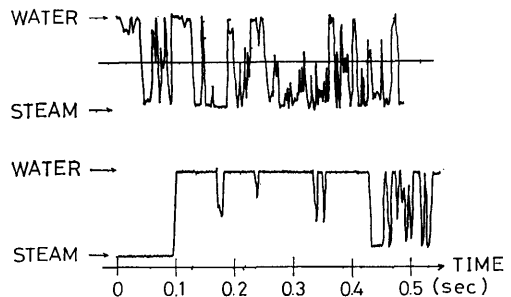


図 2-11 ボイド計測定記録例

初期ボイドデータ例

実験条件 圧力 50 atg
 破断口径 1 in. ϕ
 Vol. 1

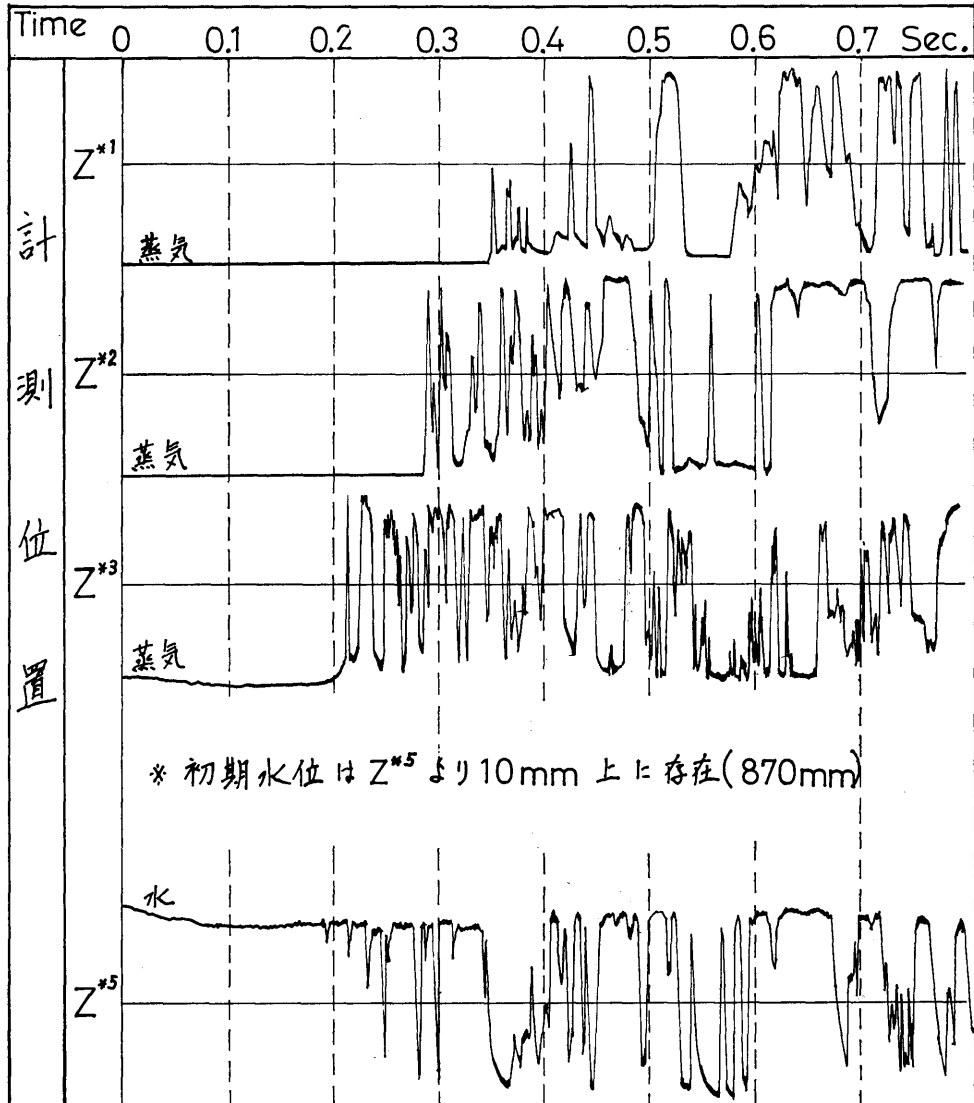


図 2-12 破断直後のボイド計記録例

検定データより

$$x=100\% \text{ で } h=0.895\text{m}$$

$$x=50\% \text{ で } h=0.410\text{m}$$

また、20°C の γ_l と γ_g 及び 40°C の γ_r を用い、 $H=1.148\text{m}$ とすると、

$$S_{pan}=96.831\text{kg/m}^2$$

$$S_{up}=1213.9\text{kg/m}^2$$

これより、スパン間水位 h と指示値 $x\%$ 及び各圧力の物性値との関係は

$$\frac{h}{H} = \frac{8.435x - 65.15 - \gamma_g}{\gamma_l - \gamma_g}$$

ただし、 $H=1.148\text{m}$ 、 $H_0=0.312\text{m}$ である。

本報告では実験データとして、差圧計指示値 $x\%$ と時間の関係を示したが、これと圧力特性曲線を利用することにより、水中に蒸気泡が含まれない場合の水位の時間的变化を求めることができる。

(3) ボイド率の整理

触針式ボイド計のビジュグラフ上の記録は、図2-11に2例を示すように、ボイド計の先端に蒸気がくるか水がくるかを時間の経過と共に示すようになっている。すなわち蒸気に接触している時間の長い程、その部分でのボイド率が大きいことになる。図2-12は水位が約870mmの1ボリューム上部破断実験のブロードダウン開始直後のボイド記録の変化例である。この例では、始め水位がV-3とV-5のボイド計の間にあるため、V-5は水を指示し、V-1～V-3は蒸気を示している。ブロードダウンを開始して数百m sec経過すると、圧力容器内の水中に蒸気泡が発生し、これによって水位が上昇する。そのためV-3、V-2、V-1の順で水に接触するようになることがわかる。一方、V-5は蒸気泡を検知するようになる。

このような多くのデータをボイド率として整理するため、記録紙上の適当な位置（主に水と蒸気の記録の中央）に直線をひき、0.2ないし1.0秒の間に蒸気が何秒を占めているかでボイド率とした。このようにして、全データにつき、全てのボイド計の記録を整理し、実験結果としてもこの形で以下に示すこととする。

2.3 実験結果

図2-13～図2-46に実験データとして、実験番号順にブロードダウン中の圧力、差圧、及びボイド率の時間的变化を示す。

(1) 3ボリューム上部破断実験

図2-13～図2-19には上部破断の3ボリューム実

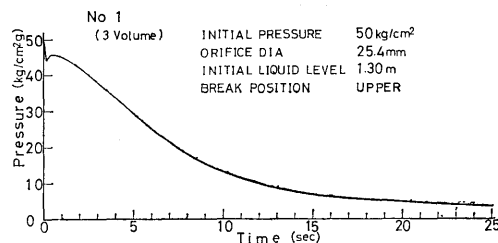


図 2-13(a) No. 1 実験の圧力記録

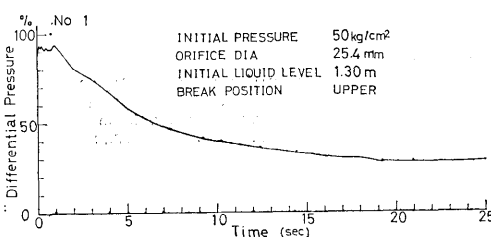


図 2-13(b) No. 1 実験の差圧記録

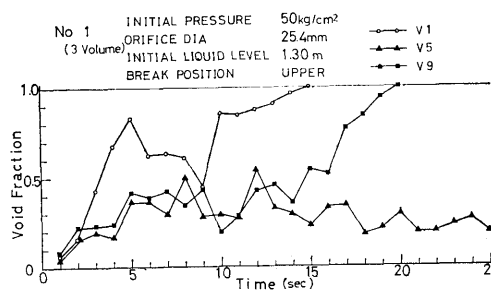


図 2-13(c) No. 1 実験のボイド率記録

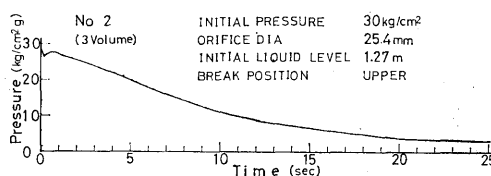


図 2-14(a) No. 2 実験の圧力記録

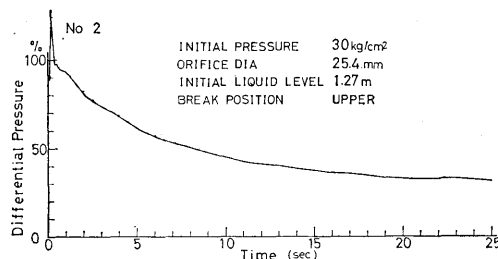


図 2-14(b) No. 2 実験の差圧記録

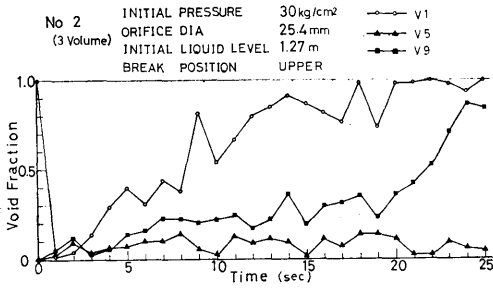


図 2-14(c) No. 2 実験のボイド率記録

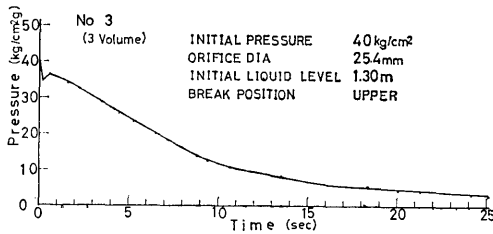


図 2-15(a) No. 3 実験の圧力記録

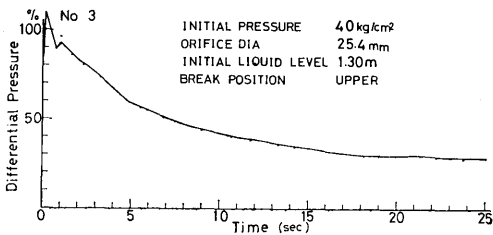


図 2-15(b) No. 3 実験の差圧記録

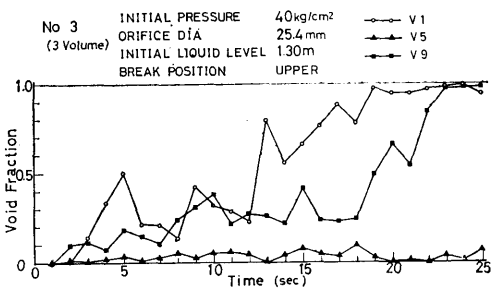


図 2-15(c) No. 3 実験のボイド率記録

験データを示す。3 ボリューム実験は、圧力容器内に内部構造物を挿入することにより、圧力容器内空間をヒーター部、ヒーター上部プレナム部、ヒーター周囲の環状部の3 ボリュームに区分けて、このような体系におけるブローダウン時の圧力容器内の流体の挙動を調べようとするものである。実験は、破断オリフィ

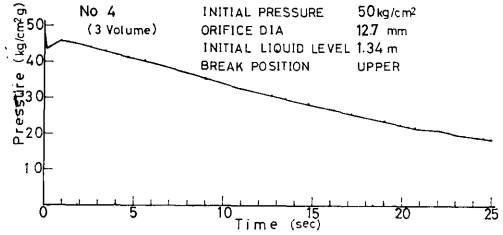


図 2-16(a) No. 4 実験の圧力記録

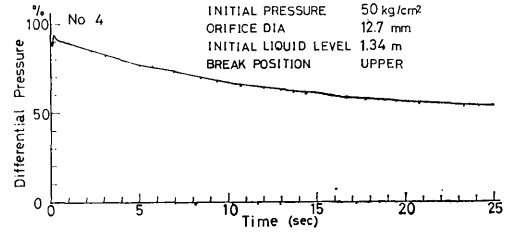


図 2-16(b) No. 4 実験の差圧記録

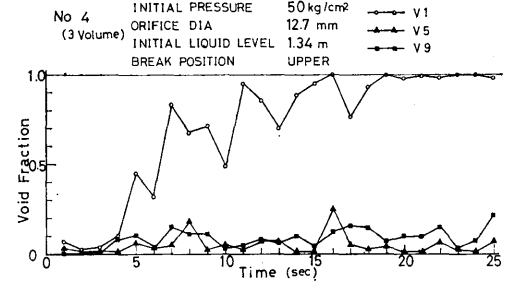


図 2-16(c) No. 4 実験のボイド率記録

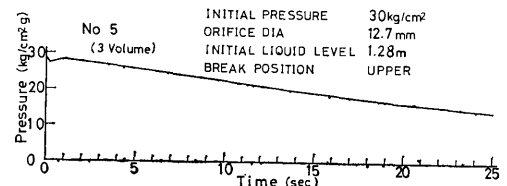


図 2-17(a) No. 5 実験の圧力記録

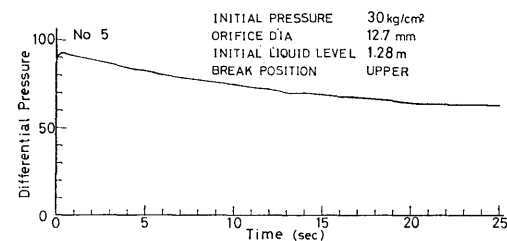


図 2-17(b) No. 5 実験の差圧記録

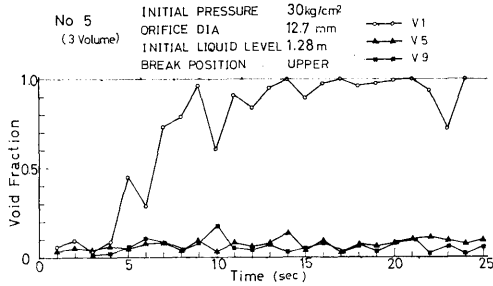


図 2-17(c) No. 5 実験のボイド率記録

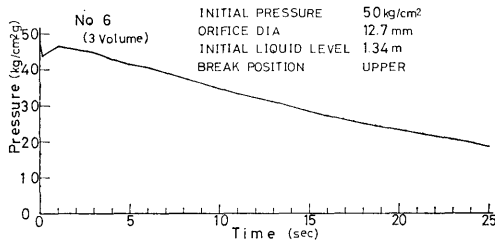


図 2-18(a) No. 6 実験の圧力記録

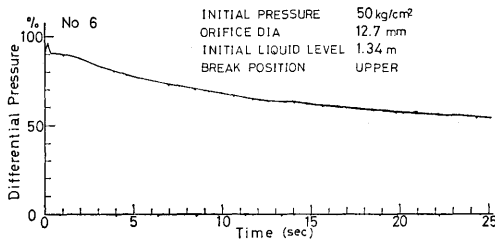


図 2-18(b) No. 6 実験の差圧記録

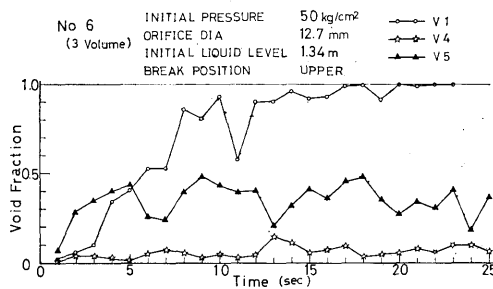


図 2-18(c) No. 6 実験のボイド率記録

ス口径を 25.4mm (1 インチ) と 12.7mm (1/2 インチ) の 2 種類, 水位を指示計の指示値でほぼ 90% とし, 初期飽和水圧力を 50kg/cm²g, 30kg/cm²g (1 ケースだけ 40 atg) として行った。なおヒーターは第 1 回実験のみ OFF としたが, 第 2 回以後は全て ON と

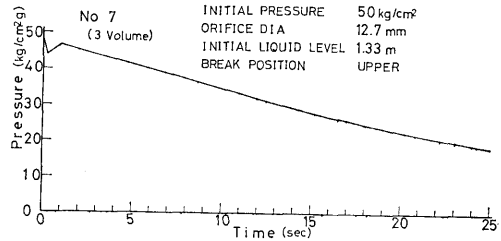


図 2-19(a) No. 7 実験の圧力記録

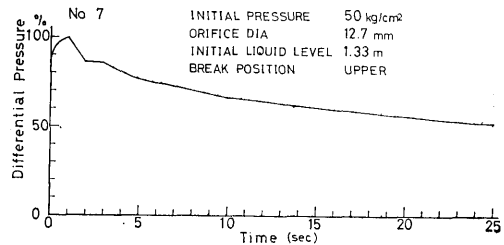


図 2-19(b) No. 7 実験の差圧記録

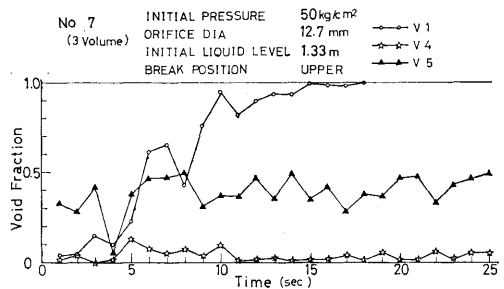


図 2-19(c) No. 7 実験のボイド率記録

した。ボイド計は 3 ヶを使用し, 最初の 5 回は V-1, V-5, V-9 の 3 本に取付けて, ヒーター上部プレナム部にある V-1, V-5 と, ヒーター周囲環状部の V-9 によるボイド率の変化を測定した。

圧力の時間に対する変化は図よりわかるように, 1 秒以内にアンダーシュートがみられ, 回復した後, 次第に減少していく様子がわかる。また, ボイド率の時間的変化の図には, 1 秒ごとの各ボイド計によるボイド率の時間的変化が示されている。特徴的なことは, V-1 のボイド率が一番始めに 100% に上昇し, 次いで V-9, であり, V-5 が一番低い値を示すことである。これは上部プレナム部にある V-1 と V-5 のうち, V-5 が下部にあるのに対し, V-9 がヒーター周囲環状部の中程にあるため早く水位が低下するからである。

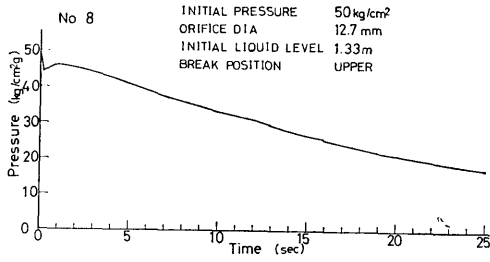


図 2-20(a) No. 8 実験の圧力記録

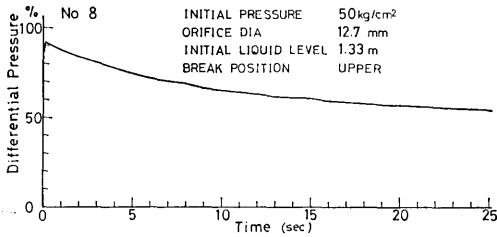


図 2-20(b) No. 8 実験の差圧記録

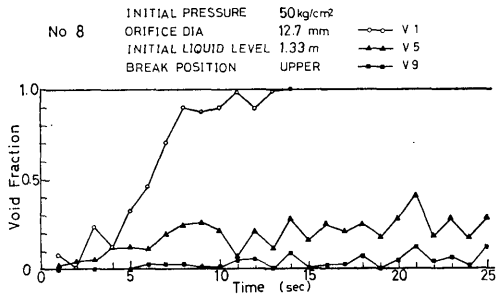


図 2-20(c) No. 8 実験のボイド率記録

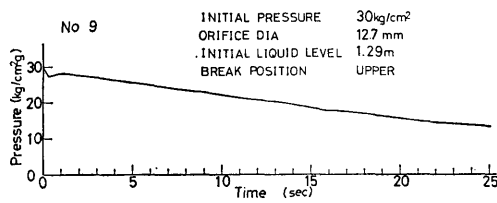


図 2-21(a) No. 9 実験の圧力記録

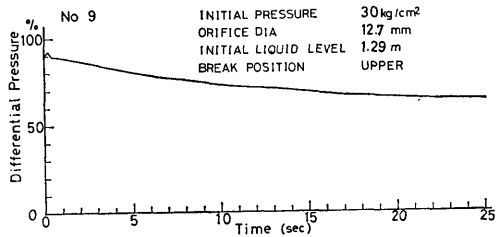


図 2-21(b) No. 9 実験の差圧記録

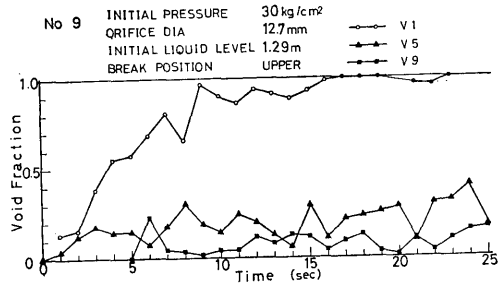


図 2-21(c) No. 9 実験のボイド率記録

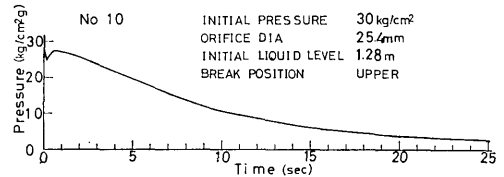


図 2-22(a) No. 10 実験の圧力記録

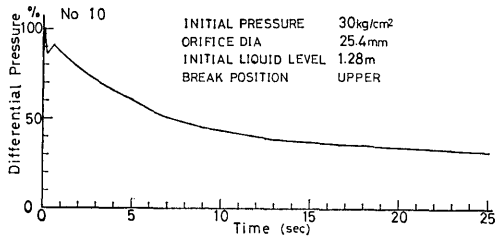


図 2-22(b) No. 10 実験の差圧記録

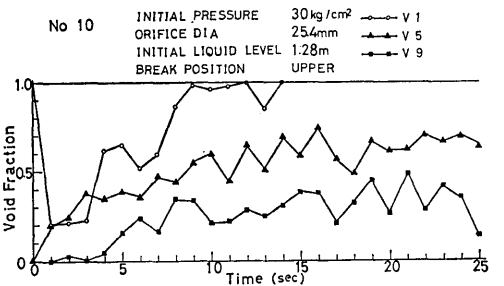


図 2-22(c) No. 10 実験のボイド率記録

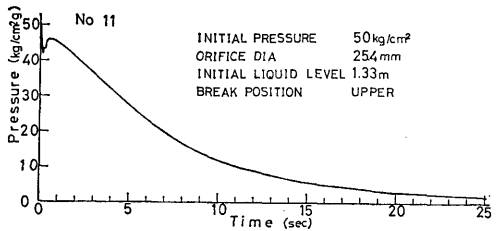


図 2-23(a) No. 11 実験の圧力記録

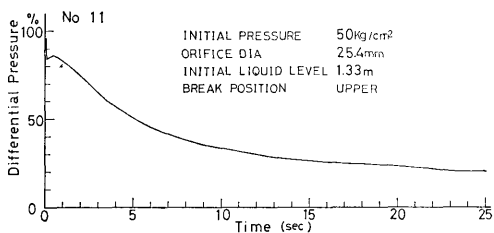


図 2-23(b) No. 11 実験の差圧記録

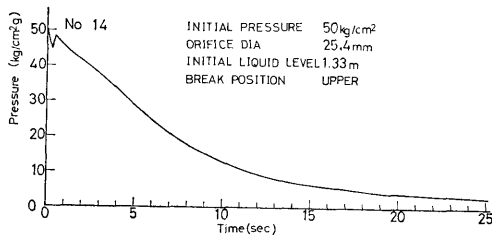


図 2-26(a) No. 14 実験の圧力記録

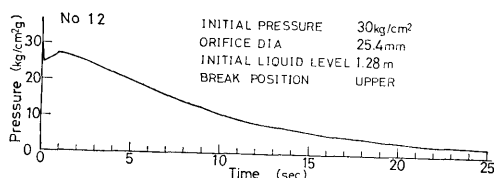


図 2-24(a) No. 12 実験の圧力記録

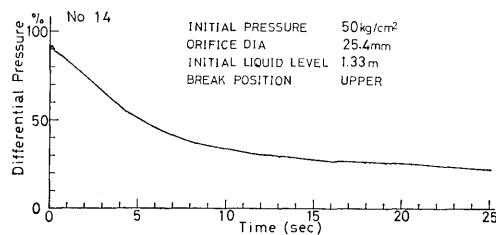


図 2-26(b) No. 14 実験の差圧記録

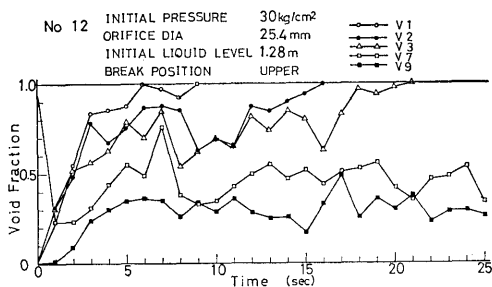


図 2-24(b) No. 12 実験のボイド率記録

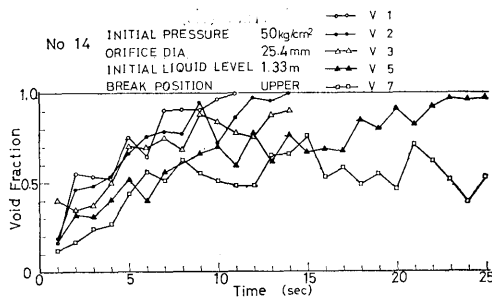


図 2-26(c) No. 14 実験のボイド率記録

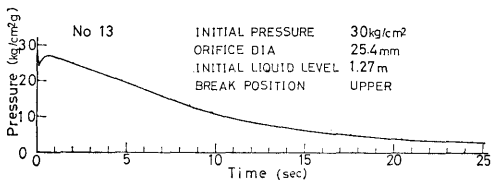


図 2-25(a) No. 13 実験の圧力記録

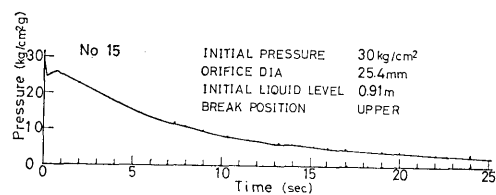


図 2-27(a) No. 15 実験の圧力記録

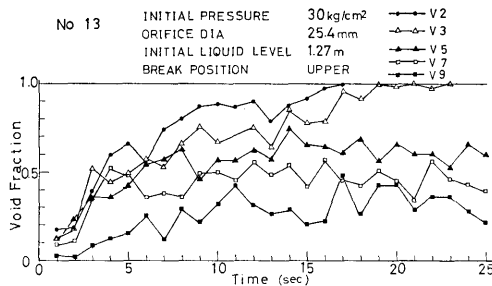


図 2-25(b) No. 13 実験のボイド率記録

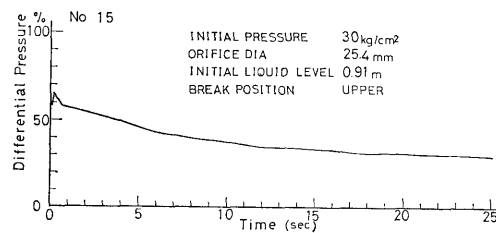


図 2-27(b) No. 15 実験の差圧記録

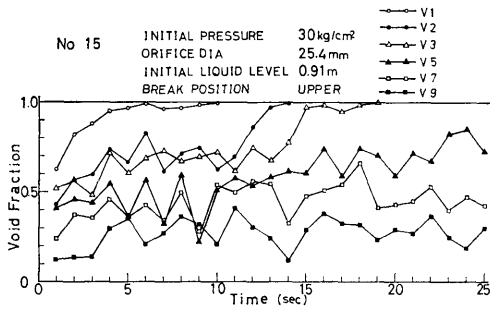


図 2-27(c) No. 15 実験のボイド率記録

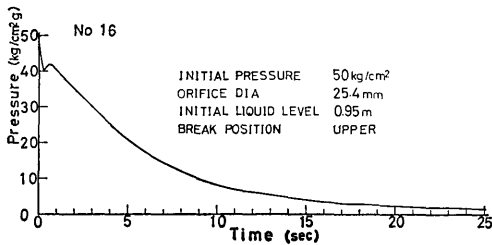


図 2-28(a) No. 16 実験の圧力記録

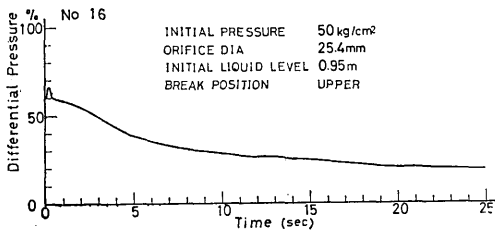


図 2-28(b) No. 16 実験の差圧記録

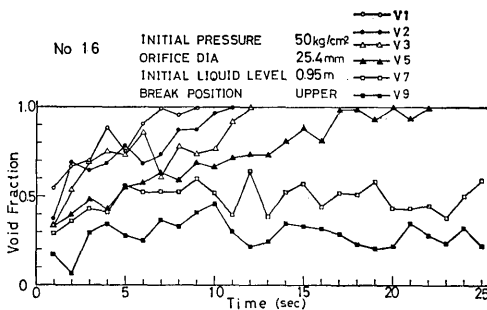


図 2-28(c) No. 16 実験のボイド率記録

差圧の時間に対する変化をみると、ブローダウン直後に差圧が一寸上昇して再び元にもどるのがみられる。ブローダウン直後の差圧は、ほぼ上部プレナムとヒーター周囲環状部間の差圧を示す。残留水量は破断

口径が大きく、初期圧力が大きい程少なくなっている。

(2) 1 ボリューム上部破断実験

図 2-20~2-28 に 1 ボリュームの上部破断実験結果を示す。初期圧力は $50\text{kg/cm}^2\text{g}$ 及び $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ 、破断口径は 25.4mm (1 インチ) 及び 12.7mm (1/2 インチ)、初期水位は約 90% と約 60% であり、ヒーターは No. 8, 9, 10, 11, 13 について ON とし、その他は OFF とした。また、ボイド計は No. 8~No. 11 については V-1, V-5, V-9 の 3 本を用い、No. 12 以後は V-1, V-2, V-3, V-5, V-7, V-9 に取付けた 6 本を用いた。No. 10, No. 11 の 2 つについては、さらにブローダウン後のヒーター壁面温度の上昇を調べた。No. 12, 13 では差圧の測定を行わず、また、No. 11 実験ではボイド率の測定に失敗した。

圧力の時間的变化に対する図にみられるように、1 ボリュームの上部破断実験においても、ブローダウン直後に圧力のアンダーシュートがみられることがわかる。アンダーシュート後は圧力は回復して次第に低下する。

ボイド率の時間的变化をみると、1 ボリュームの場合には、V-1, V-5, V-9 の順に、下部程ボイド率が低いことがわかる。No. 10 のボイド率の例でみるように、V-1 のボイド計はブローダウン前は蒸気部に出ているものが、ブローダウン直後急に低下し、1~2 秒間、V-5 の方が大きなボイド率の状態が続く、その後 V-5 より大きなボイド率となる。これはブローダウンにより水面下で発生した蒸気が水面を押し上げるにより、V-1 のボイド計が蒸気から水を感じるように変るためであって、V-5 部の方が発生蒸気が多いことを示している。No. 12 以後は、6 本のボイド計によるボイド率の変化を示しているが、上部に取付けたボイド計によるボイド率の方が高い値を示すこと、各ボイド率は時間的に変動するため、局所的には下部の方が大きなボイド率となることもあるなどがわかる。一般に破断口径が大きく、初期圧力が高い程ボイド率が高くなることがわかる。

差圧の時間的变化の図より上部破断の場合もブローダウン直後に若干の差圧のオーバーシュートがみられ、その後、次第に減少することがわかる。ブローダウン直後のオーバーシュートは圧力容器内上下の圧力差及び水柱の上方への加速のためのものであり、それ

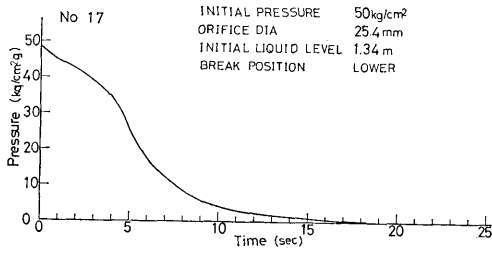


図 2-29(a) No. 17 実験の圧力記録

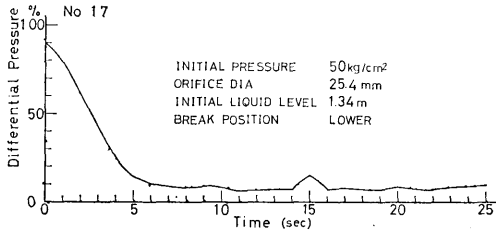


図 2-29(b) No. 17 実験の差圧記録

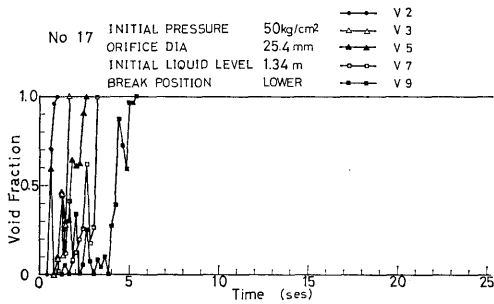


図 2-29(c) No. 17 実験のボイド率記録

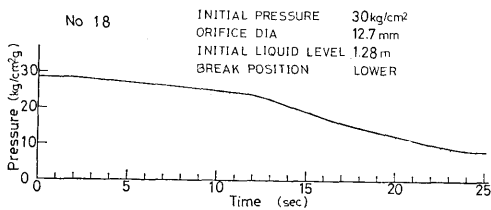


図 2-30(a) No. 18 実験の圧力記録

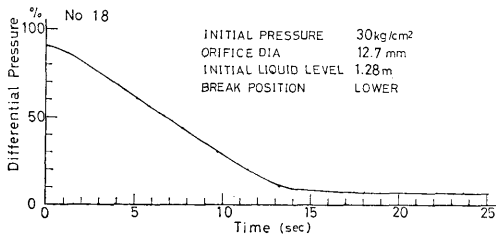


図 2-30(b) No. 18 実験の差圧記録

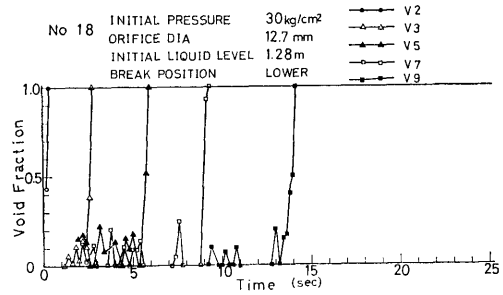


図 2-30(c) No. 18 実験のボイド率記録

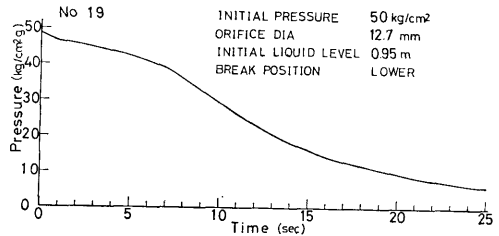


図 2-31(a) No. 19 実験の圧力記録

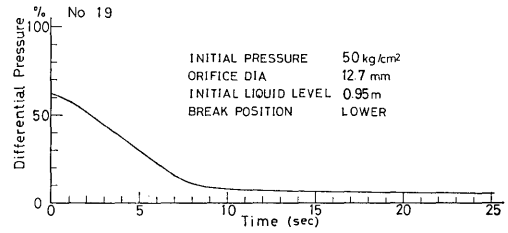


図 2-31(b) No. 19 実験の差圧記録

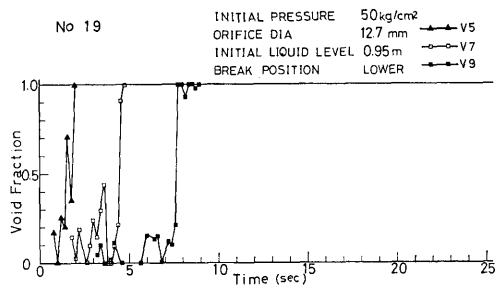


図 2-31(c) No. 19 実験のボイド率記録

以後の次第に低下していく傾向は、圧力容器内の水量の低下を示していると考えられる。

残留水量は3ポリュームの場合と同様に破断口径が大きく、初期圧力が大きい程少くなっている。しかし、同じ条件で比較すると3ポリュームの時にくらべ残留水量が多くなっているのが特徴的である。

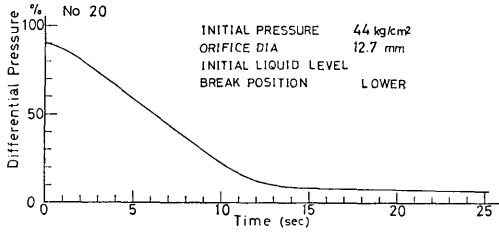


図 2-32(a) No. 20 実験の差圧記録

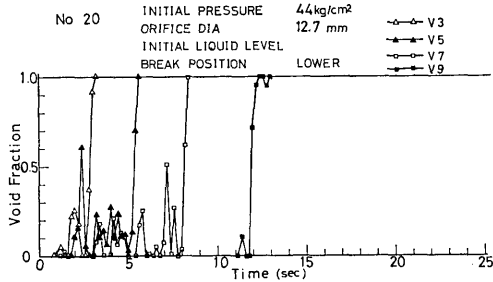


図 2-32(b) No. 20 実験のボイド率記録

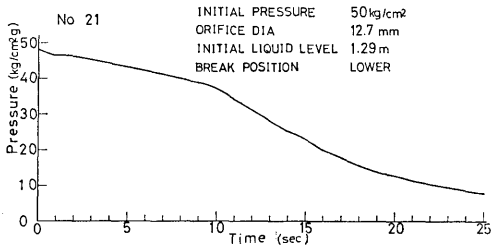


図 2-33(a) No. 21 実験の圧力記録

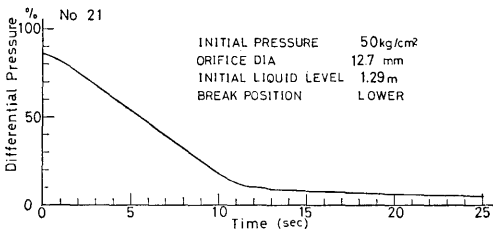


図 2-33(b) No. 22 実験の差圧記録

なお、ヒーターをONとした場合とOFFとした場合の比較のための実験を初期圧力 $50\text{kg/cm}^2\text{g}$ と $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ で1インチの条件で行い、ヒーターのON、OFFがあまり影響しないことを確かめた。これは、ヒーター出力が小さいためと考えられる。

(3) 1 ボリューム下部破断実験

図 2-29~図 2-41に、下部破断実験の結果を示す。実験は上部破断実験と同様に、初期圧を $50\text{kg/cm}^2\text{g}$

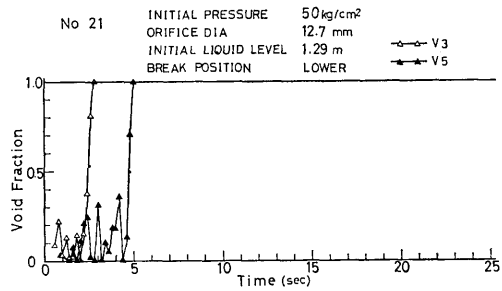


図 2-33(c) No. 21 実験のボイド率記録

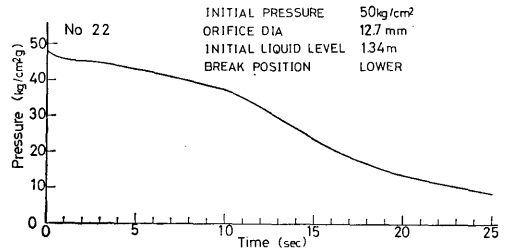


図 2-34(a) No. 22 実験の圧力記録

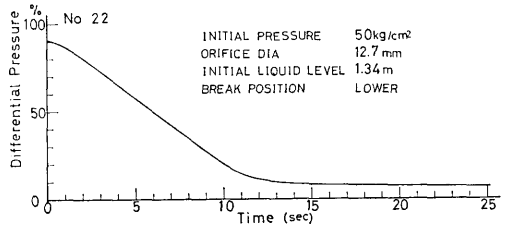


図 2-34(b) No. 22 実験の差圧記録

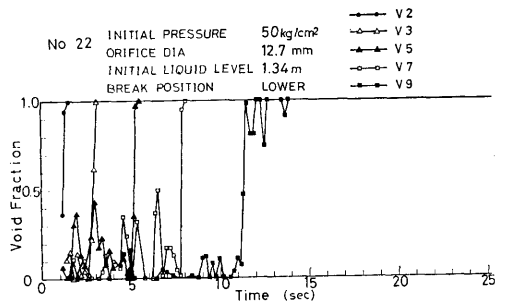


図 2-34(c) No. 22 実験のボイド率記録

cm^2g 及び $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ の2種類、破断口径を 25.4mm (1インチ)、 12.7mm (1/2インチ) 及び 6.4mm (1/4インチ) の3種類、初期水位を90%と60%の2種類についていろいろな組合わせで行った。ヒーターは全てOFFとした。また、ボイド計は6本取付け

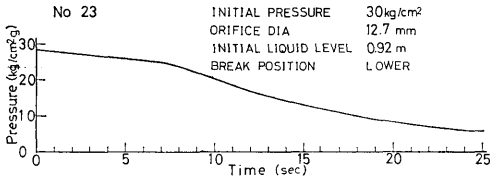


図 2-35(a) No. 23 実験の圧力記録

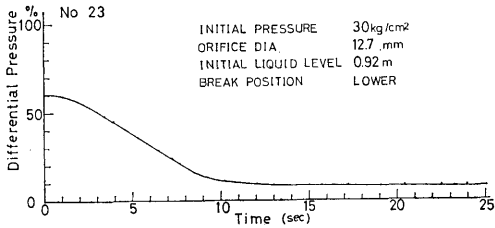


図 2-35(b) No. 23 実験の差圧記録

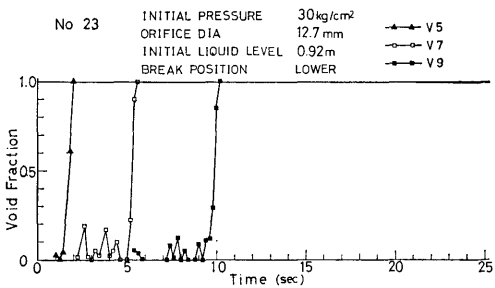


図 2-35(c) No. 23 実験のボイド率記録

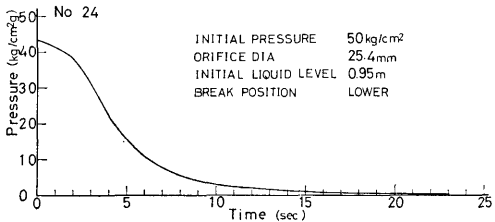


図 2-36(a) No. 24 実験の圧力記録

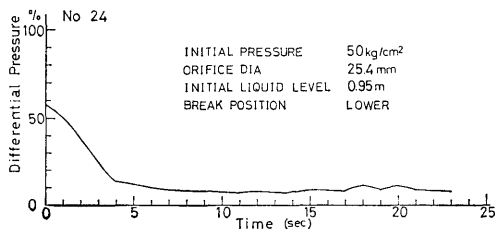


図 2-36(b) No. 24 実験の差圧記録

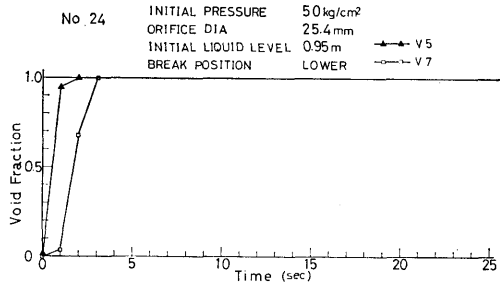


図 2-36(c) No. 24 実験のボイド率記録

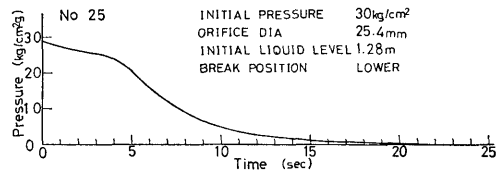


図 2-37(a) No. 25 実験の圧力記録

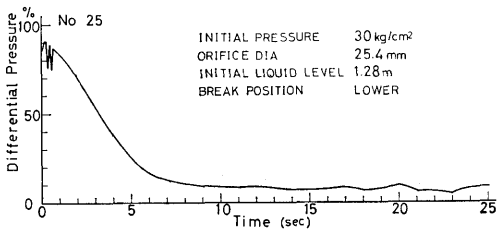


図 2-37(b) No. 25 実験の差圧記録

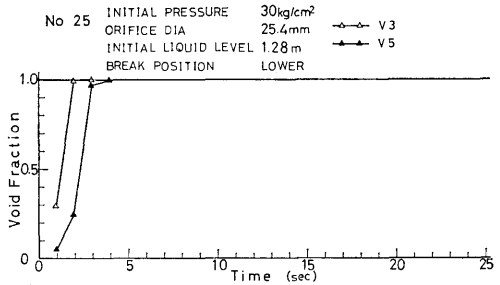


図 2-37(c) No. 25 実験のボイド率記録

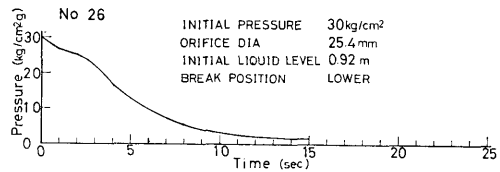


図 2-38(a) No. 26 実験の圧力記録

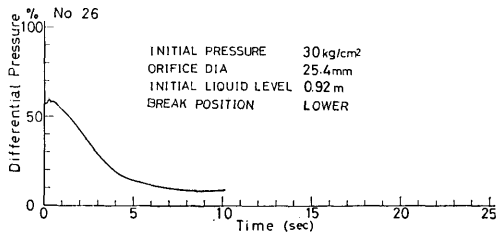


図 2-38(b) No. 26 実験の差圧記録

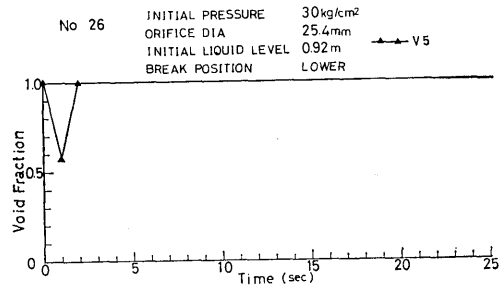


図 2-38(c) No. 26 実験のボイド率記録

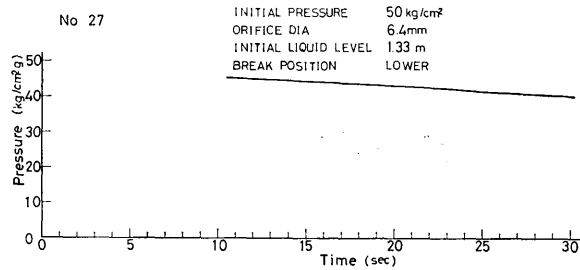


図 2-39(a) No. 27 実験の圧力記録

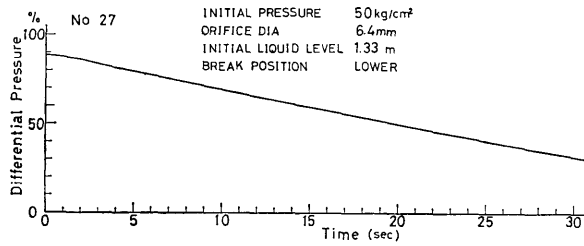


図 2-39(b) No. 27 実験の差圧記録

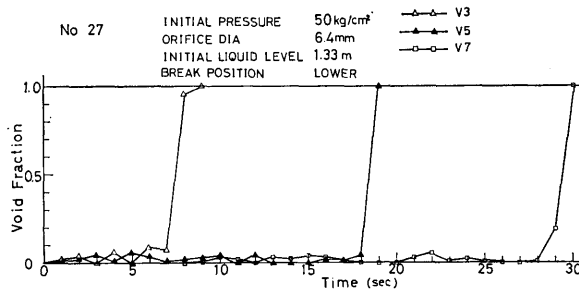


図 2-39(c) No. 27 実験のボイド率記録

た。

なお、No. 20 の実験は、所定の初期圧力に達する以前 ($44\text{kg/cm}^2\text{g}$) に、 N_2 ガス系の漏洩のためブローダウンをさせたものであり、または No. 27 ブローダウン直後の圧力の測定ができず、かつ途中で大気へ

開放させたため実験として失敗したものである。

下部破断の場合の圧力特性は、図にみるように 2 段階に分れていることがわかる。すなわち、ある時間まで比較的ゆるやかな圧力降下を示していたものが、その後急に圧力降下が大きくなることである。これ

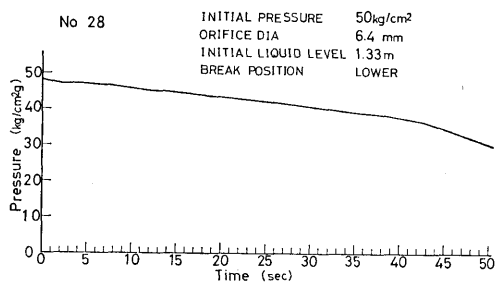


図 2-40(a) No. 28 実験の圧力記録

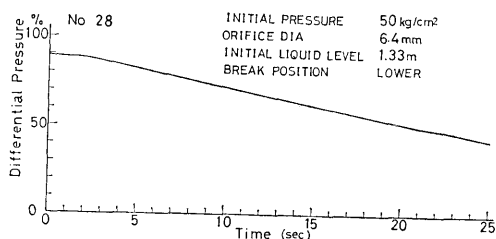


図 2-40(b) No. 28 実験の差圧記録

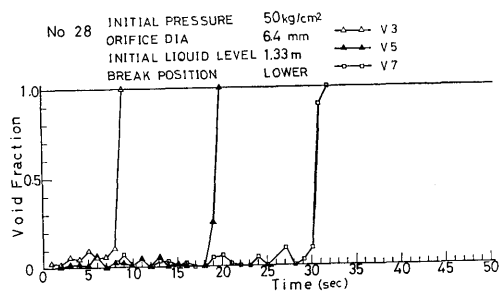


図 2-40(c) No. 28 実験のボイド率記録

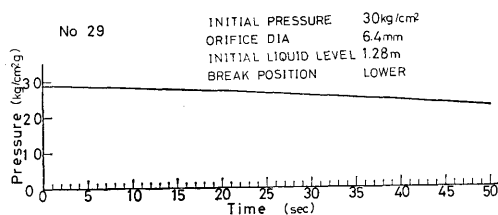


図 2-41(a) No. 29 実験の圧力記録

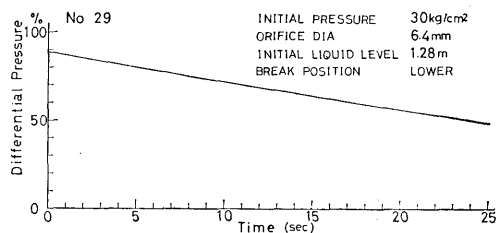


図 2-41(b) No. 29 実験の差圧記録

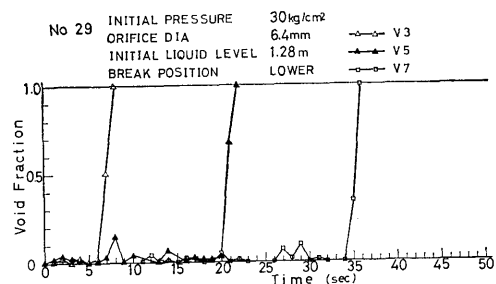


図 2-41(c) No. 29 実験のボイド率記録

共に 100% のボイド率へ急上昇する特性を示す。そこで、V-1, V-2, V-3, V-5, V-7, V-9 の順で 100% へ上昇する時間がおそくなることになる。また一般に下部破断ではボイド率は多くの場合 10~20% 以下と比較的低いことが図よりわかる。

なお、上部破断と異なって、水面はブローダウン後降下する一方なので、初めから蒸気部へ出ていたボイド計によるボイド率は最後まで 100% であった。

差圧の測定値も 2 段階に分れる。すなわち、ブローダウン後二相流の流出時期に、ほぼ一定の割合で降下していたものが、水面が破断口に達したところではほぼ一定の値になることである。下部破断の場合には、ボイド率が低いので、この差圧と圧力及び水の比重量を用いて、水面の降下を計算できる。

残留水量は、上部破断と比較し、ずっと少なくなっているが、これは破断口より下の容積が小さいことによる。

(4) 1 ボリューム中部破断実験

図 2-42~図 2-46 に中部破断実験の結果を示す。実験は初期圧力 50 kg/cm² g、及び 30 kg/cm² g、破断口径 25.4 mm (1 インチ), 12.7 mm (1/2 インチ) 及び 6.4 mm (1/4 インチ)、初期水位 90% とし、ヒーターは OFF とした。また、ボイド計は V-2, V-3, V-5, V-6, V-7, V-9 の位置に合計 6 本取付けた。

は、下部破断のためブローダウン後しばらくは気液 2 相の流出が行われるが、水面が破断口位置に達すると急に蒸気の流出に変わるため、圧力降下が早くなるためである。

ボイド率の特性も上部破断の時とは大きく異なる。すなわち、ボイド計取付位置を水面が通過する前は比較的低いボイド率を示していたものが、水面の通過と

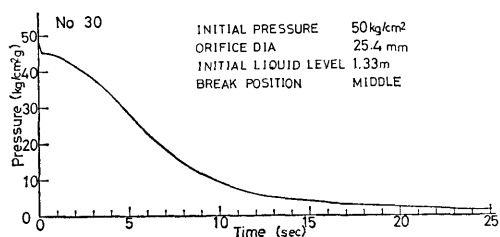


図 2-42(a) No. 30 実験の圧力記録

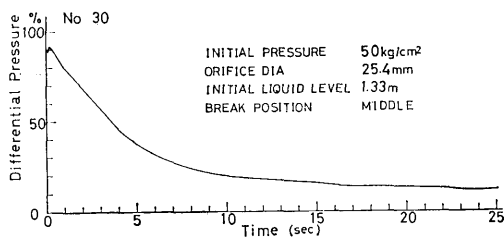


図 2-42(b) No. 30 実験の差圧記録

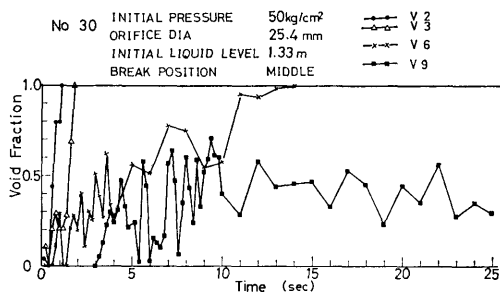


図 2-42(c) No. 30 実験のボイド率記録

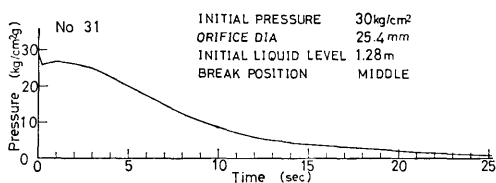


図 2-43(a) No. 31 実験の圧力記録

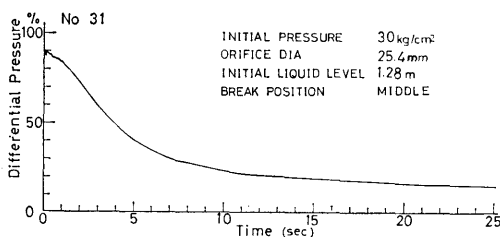


図 2-43(b) No. 31 実験の差圧記録

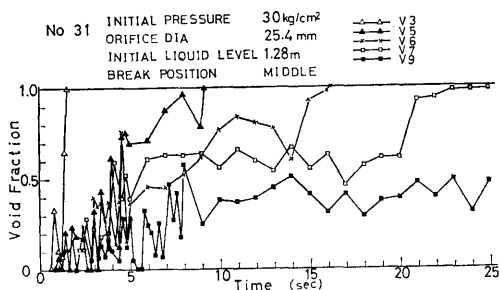


図 2-43(c) No. 31 実験のボイド率記録

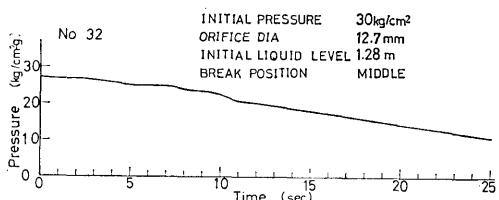


図 2-44(a) No. 32 実験の圧力記録

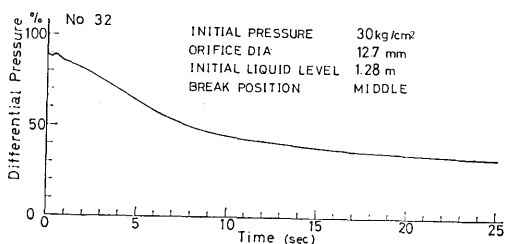


図 2-44(b) No. 32 実験の差圧記録

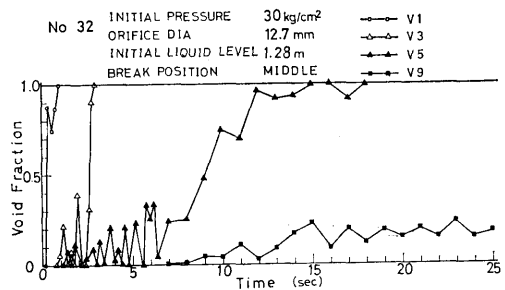


図 2-44(c) No. 32 実験のボイド率記録

実験結果は、上部破断と下部破断の中間の傾向を示すものであって、それぞれの特徴があらわれている。すなわち、圧力は最初二相流出のため下部破断に近いゆっくりした降下特性を示すものが、水面が破断口に達すると急に圧力降下が大きくなることである。ボイド率の特性も同様で、V-2、V-3は下部破断

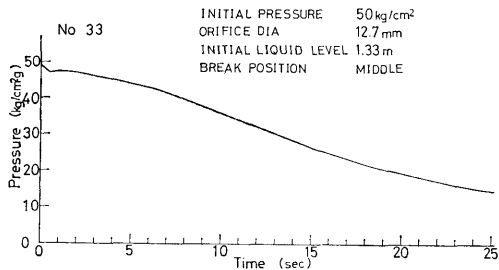


図 2-45(a) No. 33 実験の圧力記録

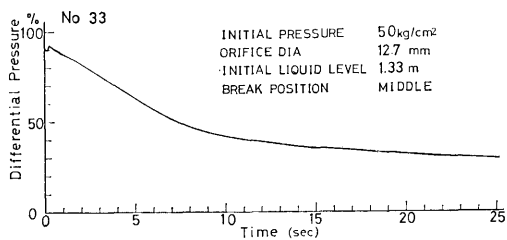


図 2-45(b) No. 33 実験の差圧記録

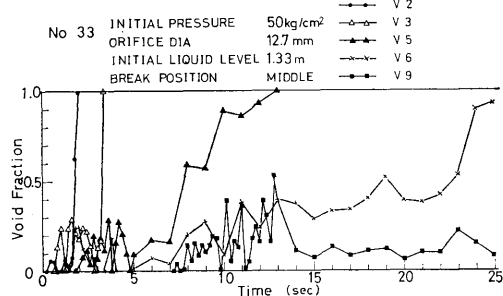


図 2-45(c) No. 33 実験のボイド率記録

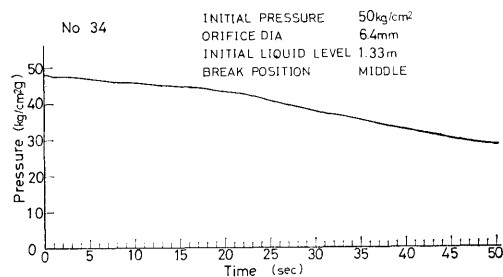


図 2-46(a) No. 34 実験の圧力記録

断の時と同じく、水面の降下と共に急に 100% へ上昇するのに対し、V-6、V-7、V-9は、水面が破断口へ達して以後上部破断の場合と同様の、比較的高いボイド率を示すことになる。

差圧特性も同様で、水面が破断口まで低下する間

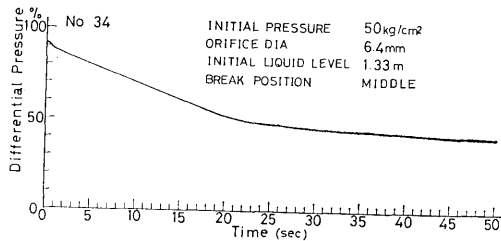


図 2-46(b) No. 34 実験の差圧記録

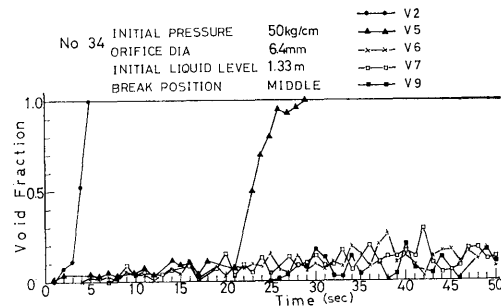


図 2-46(c) No. 34 実験のボイド率記録

は、早い速度で低下するが、それ以後はほぼ一定のゆっくりした降下を示す。この差圧が下部破断より大きいことは残留水量がそれだけ多いことを示す。

残留水量は上部破断と下部破断のほぼ中間の値を示している。

3. 実験結果の考察

3.1 破断口位置と圧力降下特性

図 3-1～図 3-5 に、初期飽和水条件が同じ場合の破断口位置の差による圧力降下特性を示す。初期条件に若干の差があるためある程度ばらついているが、一般に次のような傾向がみられる。すなわち、上部破断の場合には、ブローダウン直後のアンダーシュートがみられること、及びその後の圧力降下が急なこと、また下部破断の場合には、始め圧力降下がゆっくりしており、水位が破断口まで低下して後圧力降下が急になることである。また中部破断の場合には、上部破断と下部破断の中間的性質を示すことがわかる。上部破断の場合に始め圧力降下特性が急な理由は蒸気部からの流出のためであり、下部破断の場合には始め気液 2 相流の流出のため、圧力降下がそれほど急にはならない。上部破断の場合にブローダウン時間が長いのは、残留水量が多いことによる。

3.2 破断口径と圧力降下特性

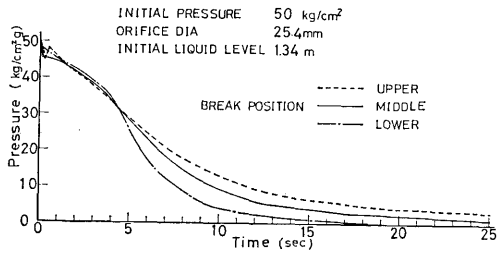


図 3-1 破断口位置と圧力特性

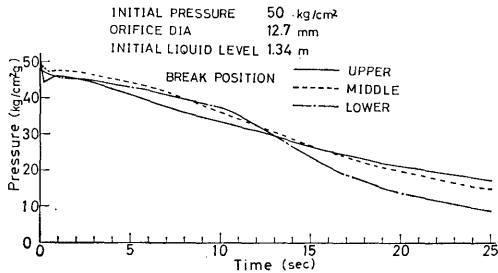


図 3-2 破断口位置と圧力特性

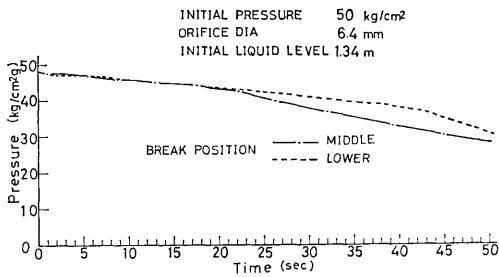


図 3-3 破断口位置と圧力特性

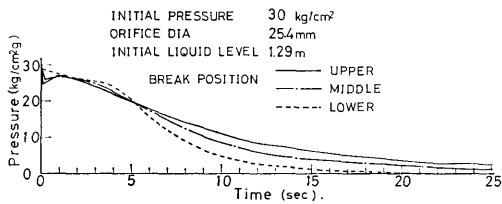


図 3-4 破断口位置と圧力特性

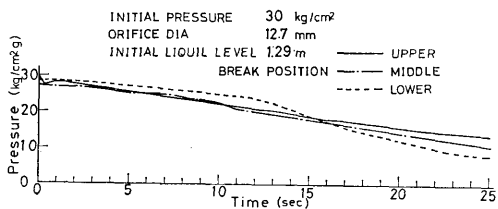


図 3-5 破断口位置と圧力特性

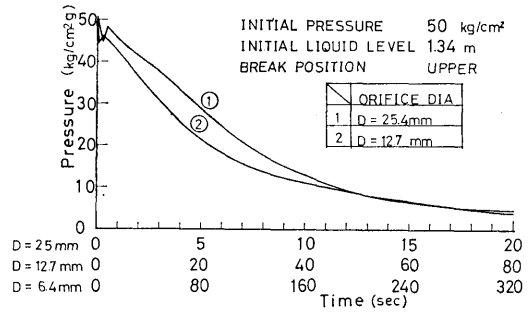


図 3-6 破断口径と圧力特性の関係

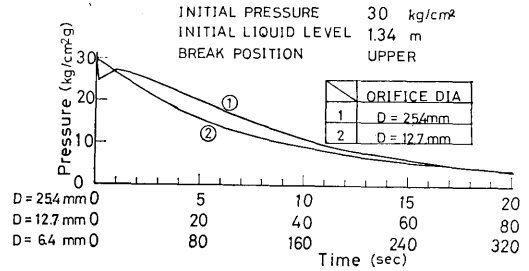


図 3-7 破断口径と圧力特性の関係

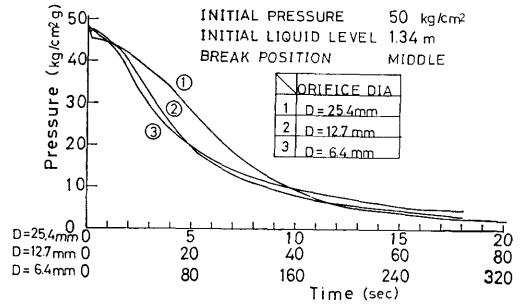


図 3-8 破断口径と圧力特性の関係

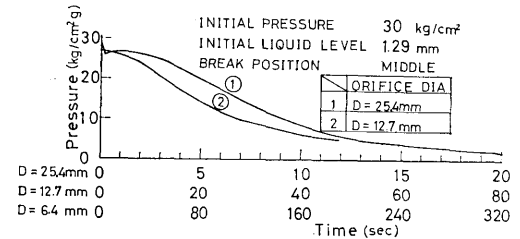


図 3-9 破断口径と圧力特性の関係

図 3-1 ~ 図 3-5 にもみられるように、破断口径の大きい方がブローダウン時間が短い。

ブローダウン時間は大体の傾向として、破断口の断面積に反比例すると考えられる。そこで、破断口径

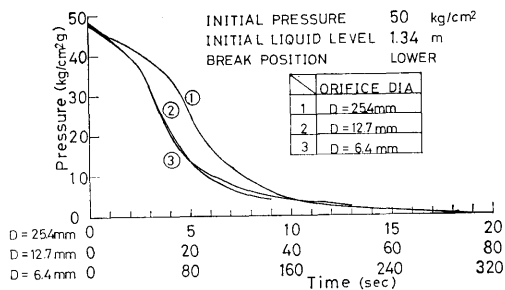


図 3-10 破断口径と圧力特性の関係

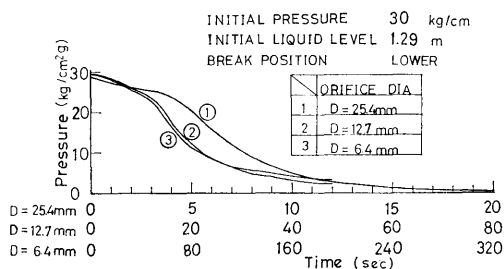


図 3-11 破断口径と圧力特性の関係

25.4mm (1インチ) のブローダウンに対し、12.7mm (1/2インチ) のブローダウン特性の時間軸を1/4とし、6.4mm (1/4インチ) のブローダウン特性の時間軸を1/16として、同じ条件のブローダウン特性を比較したものが、図3-6～図3-11である。これらの図より明らかのように、破断口径の小さい方が相対的にブローダウン時の圧力降下が早くなっている。これは上部破断の場合には、破断口径の大きい方が流出流体に水が混った2相流の流出となっている時間が相対的に長く、ゆっくりとしたブローダウン特性を示すことによる。また、下部破断の場合には、破断口径の小さい方が、水が低乾き度状態で流出する割合が大きく、破断口径が大きくなるとブローダウンに伴う減圧沸騰が激しくなって、破断口を高乾き度状態で流出する割合が大きくなるためと考えられる。それ故、破断口径の小さい方が相対的にブローダウン時間が早くなると考えられる。

中部破断の場合も同様の傾向を示すことは、中部破断が上部破断と下部破断の両方の性質を兼ねていることから明らかである。

なお、長時間経過後には、破断口径の小さいものの方が相対的に高い圧力を示すことは、残留水量が破断口径の小さい場合の方が多きことによる。すなわち、

破断口径の大きいものの方が減圧沸騰が激しく、従って特に水面が破断口以下となった場合のキャリーオーバーとしての液の流出が多くなることによる。

3.3 その他の圧力特性

(1) 1ボリュームと3ボリュームの相違

圧力容器内部に内部構造物を入れた3ボリュームと、それを取除いた1ボリュームでの実験の比較という意味で、図3-12に初期飽和圧力50kg/cm²g、破断口径12.7mm、初期水位1.34m (約90%) という初期条件下における圧力の時間的変化を示した。

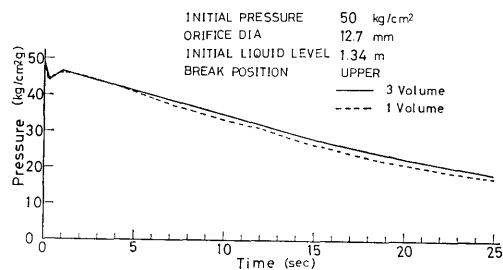


図 3-12 1ボリュームと3ボリュームの圧力特性の比較

この図よりわかるように、3ボリュームの方がブローダウン時間が若干長くなる。これは、内部構造物があると、中の流体の動きに抵抗力が働くことになり、各ボリューム間の流体の移動のおくれがあらわれるためと考えられる。それ故、ボリューム間抵抗の増大と共にこの差は大きくなると考えられる。

(2) ブローダウンの再現性

本ブローダウン実験の再現性を確認する意味で、同じ初期条件の実験における圧力特性の比較を行った。図3-13に、3ボリュームで初期圧力50kg/cm²g、破断口径12.7mmの場合の圧力特性の例を示す。これで見られるように、3回の実験における圧力特性の再現性はきわめてよい。

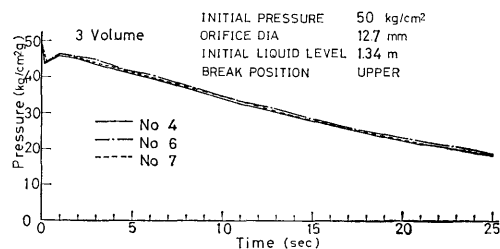


図 3-13 圧力特性の再現性

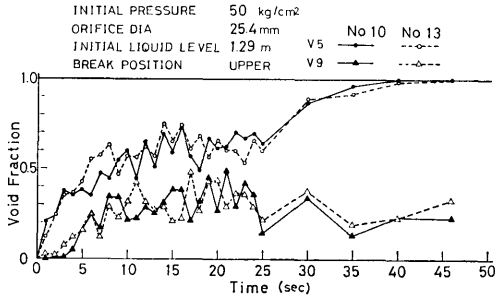


図 3-14 ボイド率特性の再現性

また、図 3-14 に 1 ボリューム上部破断で初期圧力 30kg/cm²g、破断口径 25.4mm の場合のボイド率特性の例を示す。これでわかるように、ほぼ同条件で行った No. 10 と No. 13 の実験におけるボイド率の時間変化の再現性はきわめてよい。

3.4 差圧とボイド率及び水面降下の関係

2.2.3 節に記した如く、水面下に蒸気泡がない時のスパン間水位 h (m)、スパン間距離 H (m)、差圧計指示値 x (%) の間には、水と蒸気の比重量を r_l 及び r_g (kg/m³) として、次の関係がある。

$$\frac{h}{H} = \frac{8.435x - 65.15 - r_g}{r_l - r_g} \quad (3.4-1)$$

ところで、スパン間の水面下の平均ボイド率を α_m とすると、みかけのスパン間水位 h' (m) と、差圧指示値 x (%) との関係は、

$$\frac{h'}{H} = \frac{8.435x - 65.15 - r_g}{(1 - \alpha_m)(r_l - r_g)} \quad (3.4-2)$$

である。すなわち、 $\alpha_m = 0.5$ の時は、スパン間水位は、 $\alpha_m = 0$ の時にくらべ 2 倍になる。

上部破断の場合、水面下のボイド率が大きいので、蒸気ボイドを考慮して、ボイド率を含んだ形の式を使わなければならない。

一方、下部破断の場合には、水面下ボイド率が小さいことが、実験結果からわかっており、この場合には、ボイド率 $\alpha_m \div 0$ として、計算することにより水位を計算できる。

図 3-15 は、下部破断の場合のボイド率の変化と、差圧計及び圧力の記録から計算した水位の降下との関係で、矢印は各ボイド計位置を水位が横切る時間を示したものである。図よりわかるように、下部破断の場合は水面下のボイド率が小さいので、ボイド率が 100% へ飛ぶ時刻と、差圧計の読みから $\alpha_m = 0$ とおいて計算した水位降下による各ボイド計の横切位置とはよ

(312)

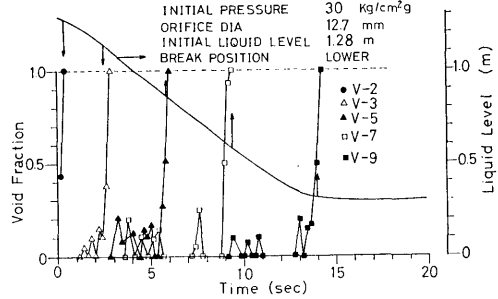


図 3-15 差圧から計算した水位降下とボイド計による記録の比較 (下部破断の例)

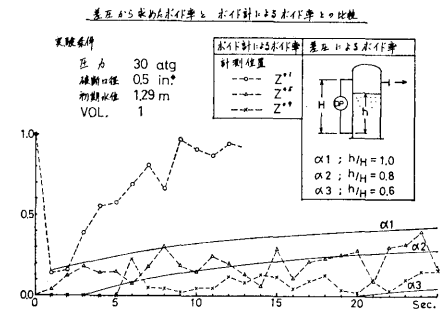


図 3-16 差圧から計算した水位降下とボイド計による記録の比較 (上部破断の例)

く一致している。

図 3-16 は、上部破断におけるボイド率の変化と、差圧計および圧力計の記録から計算した平均ボイド率の関係を比較したものである。水位の降下と共に、差圧計のスパン間水位 h とスパン間長さ H の比 h/H は 1.0 から次第に小さくなる。そこで、差圧計の記録から平均ボイド率を求める際は (3.4-2) 式を利用し、水位 h/H ((3.4-2) 式における h'/H) をパラメータとした α_m として計算値が求められる。図 3-16 は、この h/H を 1.0, 0.8, 0.6 と仮定して、差圧計および圧力計の記録から計算した α_m を $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ として与えてある。

図よりわかるように $h/H = 1.0$ とすると平均ボイド率は次第に上昇するが、一方 V-5 の測定値からは次第にずれてくる。これは、水位が低下した効果と考えられ、 h/H を 1.0 以下にしたものが実際の平均ボイド率を示すと考えられる。一方、水位が低下すると、ボイド計による平均ボイド率も V-5 → V-6 → V-9 が平均ボイド率を示すようになる。 $h/H =$ 一定の曲線が各ボイド計位置のボイド率データを横切ることが

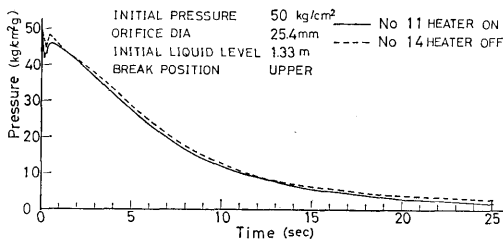


図 3-17 ヒーターのONとOFFによる相違 (圧力特性)

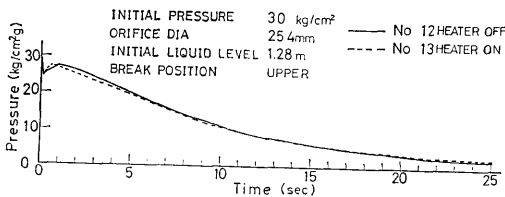


図 3-18 ヒーターのONとOFFによる相違 (圧力特性)

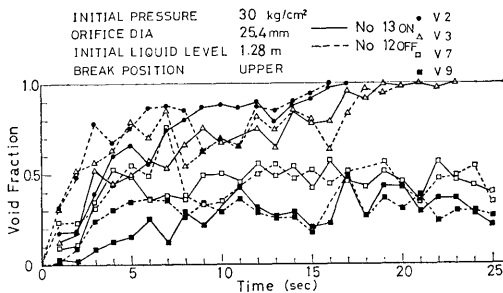


図 3-19 ヒーターのONとOFFによる相違 (ボイド率特性)

このことを示している。

3.5 ヒーター有無によるボイド率の相違

ヒーターをONとした場合とOFFとした場合のブローダウン特性の相違を圧力特性及びボイド率特性について示したものが図3-17～図3-19である。図3-17及び図3-18は、それぞれ初期圧力 $50\text{kg/cm}^2\text{g}$ 、及び $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ で、オリフィス口径 25.4mm の場合の圧力特性を示し、図3-19は初期圧力 $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ でオリフィス口径 25.4mm の場合のボイド率特性について示したものである。

図よりわかるように、各ブローダウン特性は、ヒーターがONの場合とOFFの場合でほとんど差がない。これは、ヒーターの出力がブローダウンに伴うエンタルピー変化に比べ小さいことによると考えられる。特に、ブローダウン時の変化の激しい場合、すなわち破断口径の大きい場合には、ヒーターの影響が小さいと考えられる。

本実験では、上部破断にヒーターをONとしたものもあったが、以上の理由により、ヒーターをOFFとしたものと同じものと考えて整理及び考察を行った。

3.6 破断口径とボイド率

ブローダウン時間は大きざっぱな傾向として、破断口の面積に逆比例するのであろうことは3.2節で示した。そこで、次に3.2節と同様にオリフィス口径 25.4mm を実時間とし、 12.7mm のデータを時間軸で $1/4$ 、 6.4mm のデータを時間軸で $1/16$ にして、それぞれのボイド率の時間的変化を示したのが図3-20～図3-22である。図3-20は初期圧力 $50\text{kg/cm}^2\text{g}$ の上部破断の場合のボイド率について、V-1とV-5をオリフ

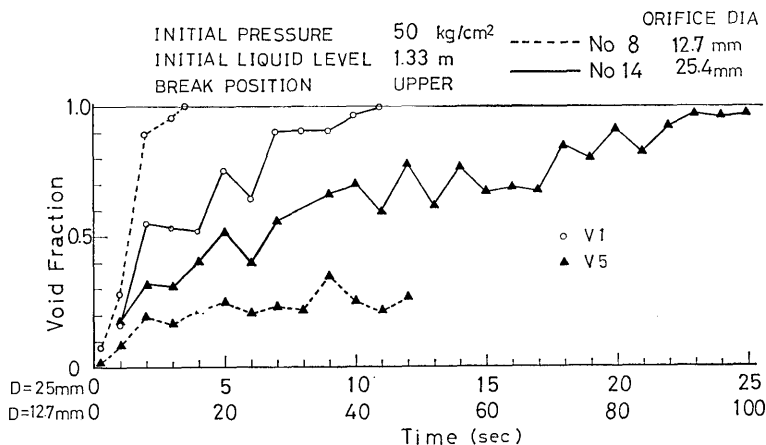


図 3-20 破断口径とボイド率の関係

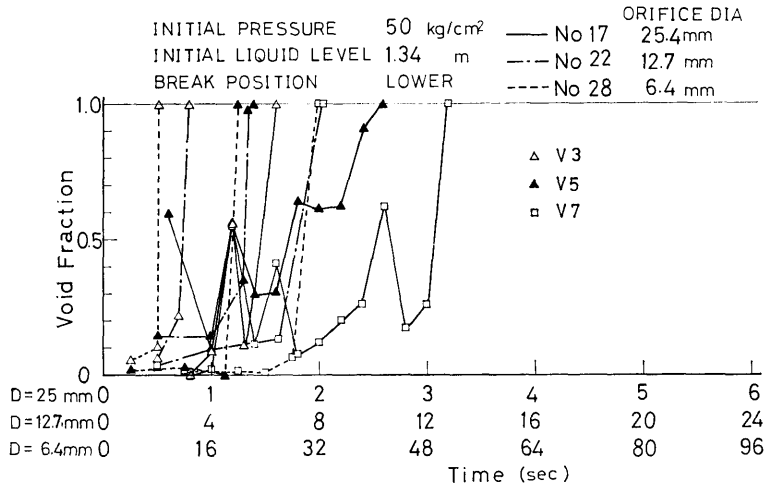


図 3-21 破断口径とボイド率の関係

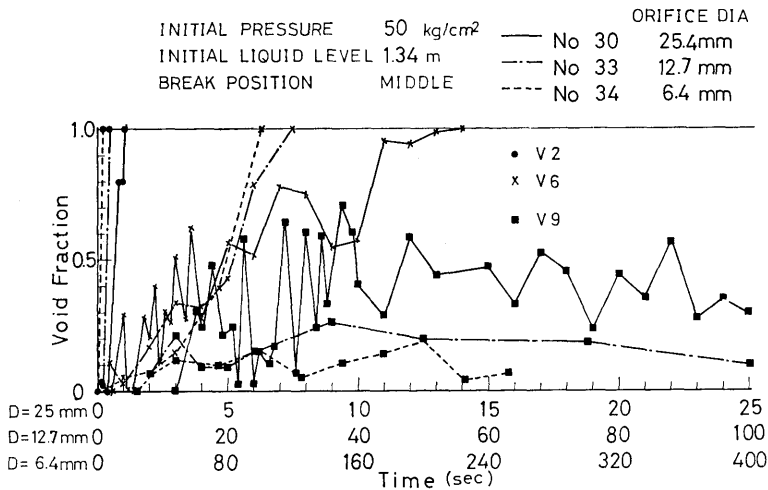


図 3-22 破断口径とボイド率の関係

イス口径25.4mmと12.7mmについて示したものである。図よりわかるように、オリフィス口径が小さい方が相対的に水位降下が早く、そのため早くボイド率が100%へ変る。一方、V-5のボイド率はオリフィス口径が小さい方が低くなっている。これは3.2節でも示したように、オリフィス口径が小さい方がブロードダウン過程、従って、減圧沸騰の激しさが小さいため、水位以下のボイド率が小さく、水位の降下が早くなるものと考えられる。図3-21は初期圧力50kg/cm²gの下部破断のボイド率をオリフィス口径が25.4mm、12.7mm及び6.4mmについて示したものである。図よりわかるように一般に、破断口径の小さい方が相対

的に早くボイド率が100%になる。(すなわち水位降下が早い。)また、ボイド率が100%へ移る以前においては破断口径の小さい方がボイド率が低い。これも3.2節で示したように破断口径の小さい方が減圧沸騰の激しさが小さくそのため水位以下のボイド率は小さく、低乾き度の飽和水としての放出に近くなるのに対し、破断口径の大きい場合減圧沸騰が激しくて、破断口での放出乾き度が相対的に大きくなるためと考えられる。図3-22は初期圧力50kg/cm²gでオリフィス口径25.4mm、12.7mm及び6.4mmの中部破断の場合のV-2、V-6及びV-9の比較を行ったものである。これは3.2節に示した考察と同様に、上部破断

と下部破断の中間的性質を示している。すなわち、破断口以上にあるV-2は下部破断の時と同様にオリフィス口径の小さい方が相対的に早く水位降下していることがわかる。V-6の特性をみると、ブロードダウン初期にはオリフィス口径が小さい方がボイド率が低いが、水位降下がV-6に近づく頃には、逆にオリフィス口径の小さい方がボイド率が高くなって、相対的に早く水位降下する。一方V-9をみるとオリフィス口径の小さい方が相対的にボイド率が低く、上部破断と同様の傾向を示すことがわかる。

3.7 気泡勾配モデルとボイド率

次章で詳細を示すように、本実験結果の解析のためブロードダウン中の圧力容器内の流体に対し、いくつかのモデル化を行った。その1つに気泡勾配モデルがあ

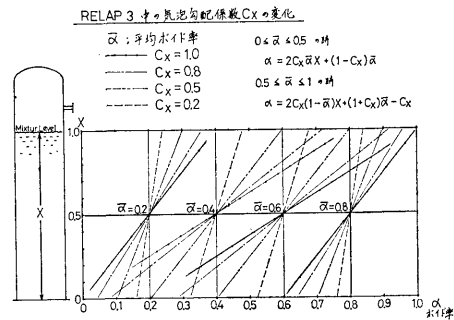


図 3-23 気泡勾配パラメータとボイド率の関係

る。これは RELAP 3 や 4 などのブロードダウン現象解析コードに用いられているもので、水位以下のボイド率が直線的に上方ほど大きな値をとるとするものであ

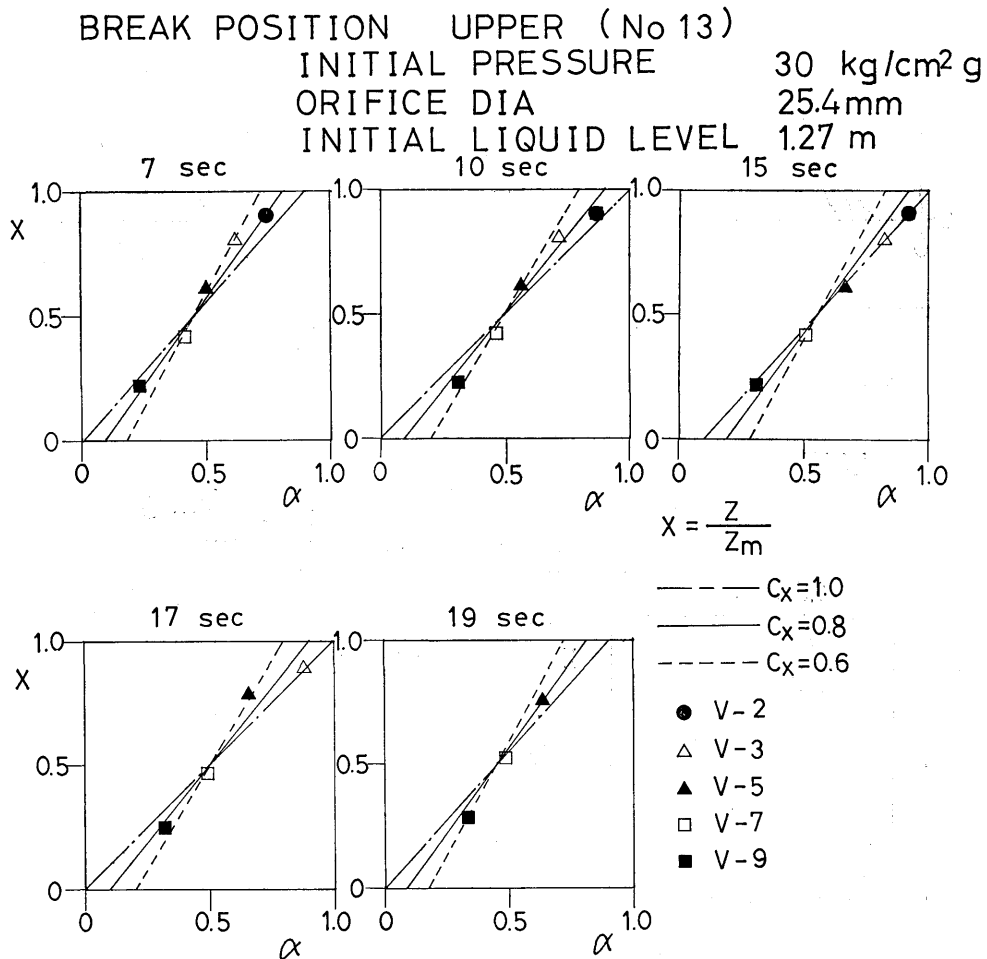


図 3-24 時間によるボイド率分布の変化 (上部破断)

BREAK POSION UPPER (No 16)

INITIAL PRESSUR 50 kg/cm²g
 ORIFICE DIA 25.4 mm
 INITIAL LIQUID LEVEL 0.95 m

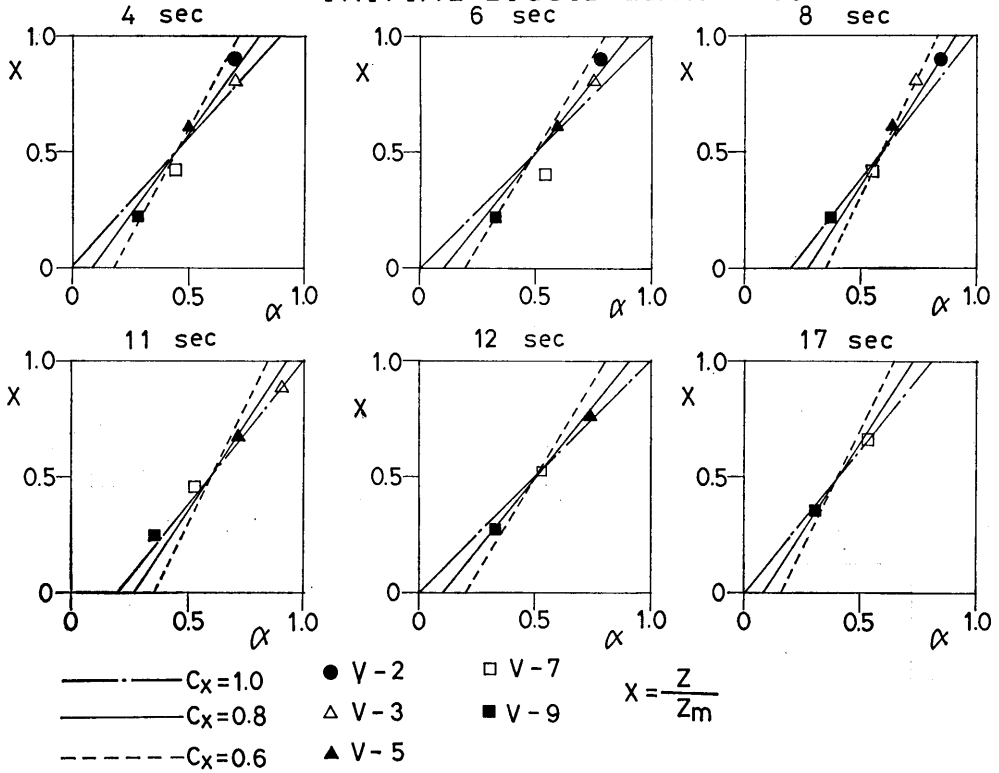


図 3-25 時間によるボイド率分布の変化 (上部破断)

LOWER BREAK (No 17)

INITIAL PRESSURE 50 kg/cm²g
 ORIFICE DIA 25.4 mm
 INITIAL LIQUID LEVEL 1.34 m

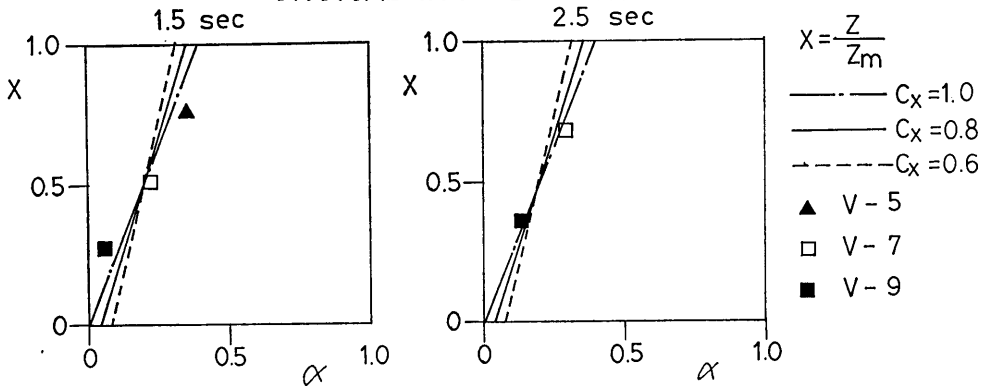


図 3-26 時間によるボイド率分布の変化 (下部破断)

LOWER BREAK (No 22)

INITIAL PRESSURE 50 kg/cm²g
 ORIFICE DIA 12.7 mm
 INITIAL LIQUID LEVEL 1.34 m

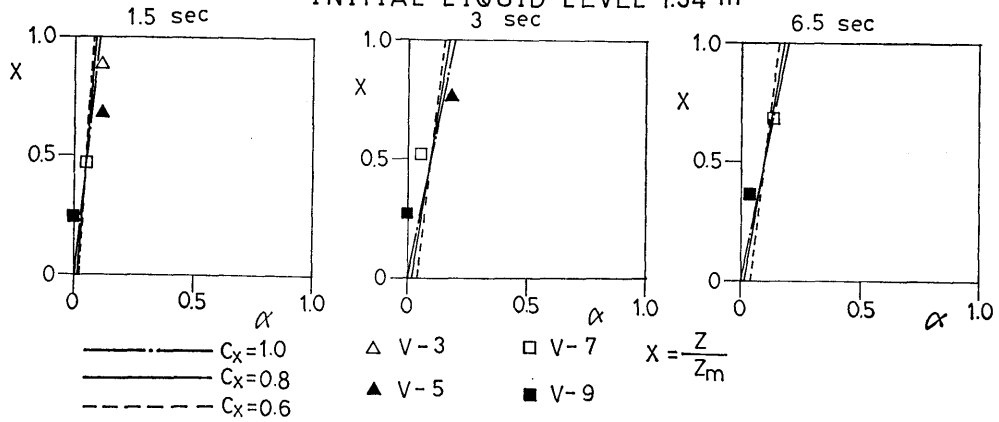


図 3-27 時間によるボイド率分布の変化 (下部破断)

MIDDLE BREAK (No 31)

INITIAL PRESSURE 30 kg/cm²g
 ORIFICE DIA 25.4 mm
 INITIAL LIQUID LEVEL 1.28 m

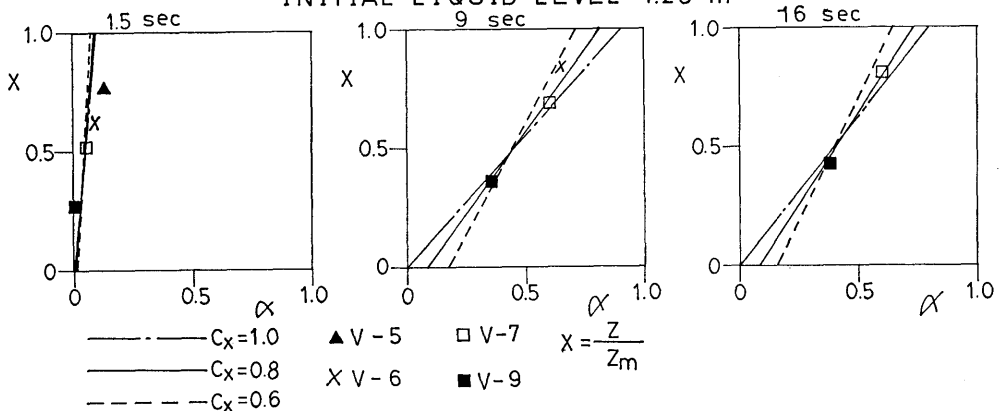


図 3-28 時間によるボイド率分布の変化 (中部破断)

る。すなわち、圧力容器底面からの水位の高さを z_m (m), 任意の高さ z (m) とし、水位以下の平均ボイド率を $\bar{\alpha}$, 気泡勾配係数を C_x , z (m) におけるボイド率を $\alpha(z)$ とすると,

$$X = \frac{z}{z_m}$$

$0 \leq \bar{\alpha} \leq 0.5$ の時

$$\alpha(z) = 2C_x \bar{\alpha} X + (1 - C_x) \bar{\alpha}$$

$0.5 \leq \bar{\alpha} \leq 1.0$ の時

$$\alpha(z) = 2C_x(1 - C_x)X + (1 - C_x)\bar{\alpha} - C_x$$

として z (m) の高さのボイド率を定義するわけである。 $\alpha(z)$ は、平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ と共に C_x の関数となっている。 C_x を 1.0, 0.8, 0.5, 0.2 とした場合の水位以下のボイド率分布の例を図 3-23 に示す。これにより、 C_x が大きい程ボイド率分布の勾配が大きくなることがわかる。なお、 $C_x = 0$ とすると、水位以下の

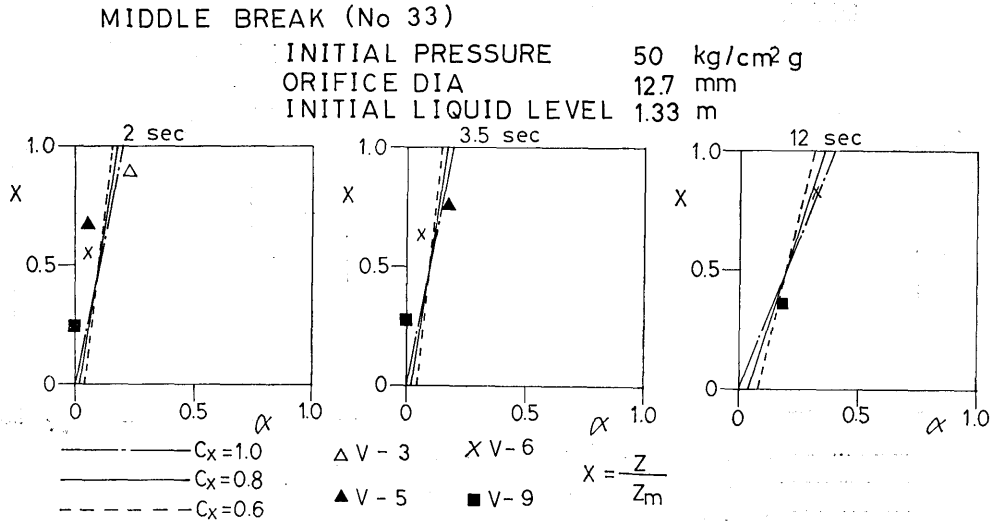


図 3-29 時間によるボイド率分布の変化 (中部破断)

気泡は完全混合となることが式より明らかである。

ボイド率の実験データより、垂直方向にボイド率がいかなる分布をしているか調べたものが、図 3-24～図 3-29 である。これは、ブローダウン開始後のある時間における垂直方向のボイド率がいかなる分布をしているかを求めるもので、縦軸にその時の水位高さで割ったボイド計取付位置 ($X = z/z_m$)、横軸にボイド率をとったものである。ここで、ボイド率はばらつきをならし、時間的に平均値と思われる値をえらんだ。

図 3-24 は初期圧力 30 kg/cm²、破断口径 25.4 mm の上部破断の場合で、破断後 7 秒、10 秒、15 秒、17 秒、19 秒の 5 点について調べたものである。図中には、比較のため、気泡勾配モデルにおける $C_x = 1.0$ 、0.8、0.6 の各直線を示してある。これら 5 枚の図から明らかなように、若干のばらつきはあるが、 $C_x = 0.8$ とすれば比較的、全体としてよく実験値とあうことがわかる。

図 3-25 は、初期圧力 50 kg/cm²、破断口径 25.4 mm の上部破断の場合であり、ブローダウン開始後 4 秒、6 秒、8 秒、11 秒、12 秒、17 秒におけるボイド率分布を示したものである。この場合においても、ボイド率分布はばらつきはあるが、垂直方向にほぼ直線的になっており、 C_x に関しては $C_x = 0.8$ がよい近似となっていることがわかる。

図 3-26 は、初期圧力 50 kg/cm²、破断口径 25.4 mm の下部破断におけるボイド率分布を、ブローダウン開

始後 1.5 秒、2.5 秒について示したものである。1.5 秒、2.5 秒の時に V-3 と V-5 のボイド率がそれぞれ 100% へ変ったため、この時、水位がそれぞれのボイド計取付位置を通過したものととして、図の縦軸を定めた。1.5 秒の時、ボイド率分布の勾配が気泡勾配モデルによるものより急になっているのが特徴的である。

図 3-27 は、初期圧力 50 kg/cm²、破断口径 12.7 mm の下部破断の場合であり、ブローダウン開始後 1.5 秒、3 秒、5.5 秒について示した。これらの図より明らかなように、ボイド率分布は気泡勾配モデルで示すものより急勾配となっている。これは、下部破断の場合、ブローダウン時間が短く、水位が早く低下し、その際、水面近くで蒸気が多く発生し、下部ではあまり発生しないことを示している。

図 3-28 は、初期圧力 30 kg/cm²、破断口径 25.4 mm の中部破断の場合をブローダウン後、1.5 秒、9 秒、16 秒について示したものである。1.5 秒は V-3 の点を水面が通過した時であって、ボイド分布は下部破断の特徴を示して気泡勾配モデルより急な分布となっている。9 秒の時水位が破断口位置まで下り、これと 16 秒の時の分布は上部破断の特徴に似ており、 $C_x = 0.8$ が近い分布になっている。

図 3-29 は、初期圧力 50 kg/cm²、破断口径 12.7 mm の中部破断の場合で、ブローダウン後 2 秒、3.5 秒、12 秒について示してある。2 秒と 3.5 秒の時は、下部

破断と同様の特徴を示して、ボイド率分布は急勾配となっており、水位が破断口位置まで下った12秒には、 $C_x=0.8$ に近い分布となっている。

以上、ボイド率分布についてまとめてみると、上部破断の場合、ボイド率は大きな値をとり、垂直方向にほぼ直線的に分布しており、それは気泡勾配モデルの $C_x=0.8$ に近いものとなっている。なお、ブローダウン直後の数秒のボイド特性は、きれいな直線的分布にならないで全体的に蒸気が発生すると考えられる。下部破断の場合、ブローダウン時間が短いことと、水位降下が早いことがあって、気泡勾配モデルで示すより急なボイド率分布となっている。これは減圧沸騰が水面に近いほど激しくなっていることを示すものである。しかし、ボイド率自体の絶対値は小さい。中部破断の場合、初め下部破断の場合と同様のボイド率分布を示し、水位が破断口位置まで降下すると上部破断の場合と同様に $C_x=0.8$ に近い垂直分布を示すようになる。

3.8 ヒーター表面温度について

3 ポリウム実験において、ヒーターをONとした場合に、ヒーター表面温度の変化を測定した。測定は、ヒーター表面にうめ込んだシース熱電対により行ったもので、うめ込位置は、有効発熱長さ590mmの上端から、110mm (TE-4)、310mm (TE-5)、510mm (TE-6)である。ヒーターからの熱流束は約 $8 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ であって、それ程大きなものではない。そこでブローダウン中は流体の飽和温度より一寸高い値を与え、かつ、ヒーターが水、又は蒸気と水の混合体でおおわれている限り、ヒーター温度の上昇はみられなかった。

図3-30及び図3-31には初期圧力がそれぞれ30kg

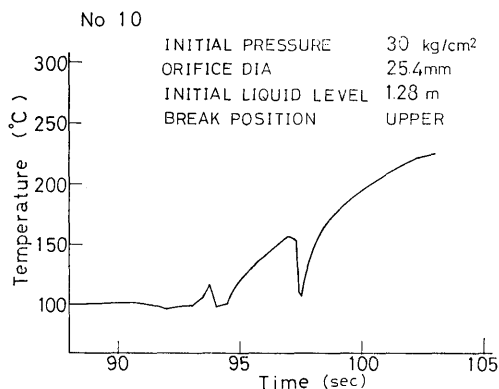


図 3-30 ヒーター表面温度の上昇例

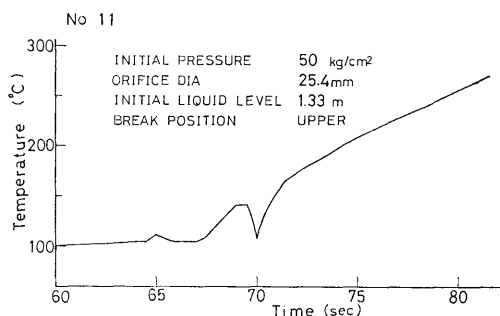


図 3-31 ヒーター表面温度の上昇例

$/\text{m}^2\text{g}$ 及び $50\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ で、オリフィス口径25.4mmの上部破断実験において、ヒーターをONとして長時間待ち、TE-4による壁面温度の上昇過程を調べたものである。水位が低下して、熱電対取付位置に近くなると、何回かの壁面温度の上昇と再低下がくり返されて後、単調に増加する様子がわかる。

4. 解 析

4.1 RELAP 3¹⁾及び4²⁾解析コードについて

RELAP 3及びRELAP 4解析コードは、米国 Aerojet Nuclear 社でPWRの配管破断に伴うブローダウン事故時の流体の挙動を解析するために開発されたものである。すなわち、RELAP 3は压力容器や蒸気発生器などを含む原子炉一次系を適当なポリウムとそれらをつなぐジャンクションに分け、各ポリウム内でのエネルギー及び質量保存則とジャンクション部における運動量式とを解くことにより、原子炉一次系からの飽和水や蒸気の流出に伴う一次系内各部での圧力、温度や蒸気と水の存在量などを時間を追って解析するものである。この解析コードは安全解析が問題とされた初期に作成され、かつ公開されていることもあり、原子炉メーカーの作成する多くの解析コードの基本となっているものである。RELAP 4はRELAP 3をさらに高度にしたものであるが、扱っているモデル自身に大差はない。

RELAP 3に取入れられている代表的なモデルは、以下のようなものがあげられる。

- (イ) 破断口からの気液2相流の流出に対しては Moody による気液2相臨界流の式を用い、これに流量係数 C_D を掛けることとする。 C_D は縮流係数と実験定数の両方の意味を持つ。
- (ロ) ポリウム内の流体に対し3.7節に記したような

気泡勾配モデルをとっており、 C_x をインプットパラメータとしている。

(f) ボリューム内の流体に対し、水面から上方の蒸気空間へ気泡が上昇して抜けると考える。この気泡離脱速度として V_B (m/s 又は ft/s) をインプットパラメータとして入れるようになっている。

この RELAP 3 又は 4 の解析コードを本実験に適用することは、原子炉に適用することと比較して最も単純なケースであって、 C_D , V_B , C_x をインプットとして与えることにより、解析結果を得ることができ。当初、上部破断実験のいくつかについては、この RELAP 3 を用いて実験結果との比較評価を行った。

4.2 BLODAC コードの概要

本実験における圧力容器内のブローダウン現象を解析するため、1 ボリュームブローダウン解析コード BLODAC (BLOWDOWN ANALYSIS CODE) を作成した。これは船舶技研の共用計算機 TOSBAC 5600モデル 120 により 1 ボリュームのブローダウン現象を解析して、本実験結果との比較評価に使用するためのものであって、RELAP 3 などとほとんど同等のモデルを含むものである。

(1) 圧力容器内のエネルギー及び質量の式

ブローダウン中における、ある瞬間における圧力容器内の流体の重量を W (kg), 圧力容器内容積を V (m^3), 流体の内部エネルギーを U (kcal) とし、蒸気と液をあらわす添字として、それぞれ v, l を用いると以下の関係が全ての瞬間に成立っている。ただし、 v は比容積 (m^3/kg), u は比内部エネルギー (kcal/kg) である。

$$U = u_v W_v + u_l W_l \quad \dots\dots(4.2-1)$$

$$W = W_l + W_v \quad \dots\dots(4.2-2)$$

$$V = W_v v_v + W_l v_l \quad \dots\dots(4.2-3)$$

ところで、圧力容器内のこの流体に破断口から G (kg/s) の速度で h_i (kcal/kg) の比エンタルピの流体が流出し、かつ、 Q (kcal/s) の加熱が外部からなされたとする。この場合のエネルギー式は以下のようなる。

$$\frac{dU}{dt} = -Gh_i + Q \quad \dots\dots(4.2-4)$$

A を仕事の熱当量 $1/427$ (kcal/kg \cdot m) として、比内部エネルギー u を比エンタルピ h へ次の関係で書き直すことにする。

$$U_v = h_v - A p v_v \quad \dots\dots(4.2-5)$$

$$U_l = h_l - A p v_l \quad \dots\dots(4.2-6)$$

(320)

これらと (4.2-1) 式を (4.2-4) 式へ代入すると次の関係が得られる。

$$\frac{d(h_v W_v + h_l W_l)}{dt} - A V \frac{dp}{dt} = -Gh_i + Q \quad \dots\dots(4.2-7)$$

一方、流体の質量保存則より、

$$\frac{dW}{dt} = -G \quad \dots\dots(4.2-8)$$

(4.2-2) 式を代入することにより

$$\frac{d(W_v + W_l)}{dt} = -G \quad \dots\dots(4.2-9)$$

また、圧力容器の容積は一定なので、内部の流体には次の関係が成立たなければならない。

$$W_v v_v + W_l v_l = V \quad \dots\dots(4.2-10)$$

これを微分形にすると

$$\frac{d(W_v v_v + W_l v_l)}{dt} = 0 \quad \dots\dots(4.2-11)$$

以上、(4.2-7), (4.2-9), (4.2-11) の3式が解くべき式である。

さて、圧力容器内の蒸気と水は全ての瞬間に飽和状態にあるとする。すると、比エンタルピ h_v, h_l 及び比容積 v_v, v_l は全て飽和状態にあることになり、圧力のみ関数として与えられることになる。この場合 (4.2-7), (4.2-9), (4.2-11) の3式は次のように書ける。

$$h_v \frac{dW_v}{dt} + h_l \frac{dW_l}{dt} + \left(W_v \frac{\partial h_l}{\partial p} - A V \right) \frac{dp}{dt} = -Gh_i + Q \quad \dots\dots(4.2-12)$$

$$\frac{dW_v}{dt} + \frac{dW_l}{dt} = -G \quad \dots\dots(4.2-13)$$

$$v_v \frac{dW_v}{dt} + v_l \frac{dW_l}{dt} + \left(W_v \frac{\partial v_v}{\partial p} + W_l \frac{\partial v_l}{\partial p} \right) \times \frac{dp}{dt} = 0 \quad \dots\dots(4.2-14)$$

すなわち、マトリックスで書くと

$$\begin{pmatrix} h_v & h_l & W_v \frac{\partial h_v}{\partial p} + W_l \frac{\partial h_l}{\partial p} - A V \\ 1 & 1 & 0 \\ v_v & v_l & W_v \frac{\partial v_v}{\partial p} + W_l \frac{\partial v_l}{\partial p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dW_v}{dt} \\ \frac{dW_l}{dt} \\ \frac{dp}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Gh_i + Q \\ -G \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(4.2-15)$$

(4.2-15) 式よりわかるように、ある瞬間の圧力容器内圧力 p 、蒸気と水の存在重量 W_v 、 W_l 、及び流出速度 G 、流出流体比エンタルピ h_i 、加熱速度 Q が与えられると、その時の圧力 p 及び蒸気と水の存在重量 W_v 、 W_l の時間的変化、 dp/dt 、 dW_v/dt 、 dW_l/dt が計算できることになる。

(2) 気泡勾配モデル

圧力容器内に存在する飽和水と飽和蒸気の状態に対して、気泡勾配モデルを仮定することにする。このモデルは圧力容器内の、ある高さまで水面が存在すると仮定するもので、水面より上部は飽和蒸気が存在し、水面より下部は気泡を含んだ飽和水が存在するものとする。そして、水面下の気泡のボイド率が高さ方向に直線的に分布するものとする。このモデルは RELAP 3 など多くのブローダウン解析用に用いられているもので、本解析でもこれを用いることとする。

さて、圧力容器内の断面積を一定の $S(\text{m}^2)$ 、水面の高さを $z_m(\text{m})$ とすると、水面下の流体の体積 $V_m(\text{m}^3)$ は次のようになる。

$$V_m = Sz_m \quad \dots\dots(4.2-16)$$

一方 V_m は水面下に存在する蒸気の重量 $W_{vb}(\text{kg})$ と次の関係がある。

$$V_m = V - v_v(W_v - W_{vb}) \quad \dots\dots(4.2-17)$$

この W_{vb} の時間的変化は、蒸気量全体の時間的変化 dW_v/dt 、及び水面より上部へ上昇する蒸気速度と水面下にある破断口から直接持ち去られる蒸気速度により次の関係で与えられる。

$$\frac{dW_{vb}}{dt} = \frac{dW_v}{dt} - \psi x_i G - \frac{SV_B \alpha_{zm}}{v_v} \quad \dots\dots(4.2-18)$$

ここで、

$$\psi = \begin{cases} 1 & (\text{放出口が水面より下}) \\ 0 & (\text{放出口が水面より上}) \end{cases} \quad \dots\dots(4.2-19)$$

であり、 x_i は破断口から流出する流体の蒸気重量率、 V_B は水面近くにある蒸気泡が水面より上へ上昇する速度、 α_{zm} は水面直下でのボイド率である。

V_B はインプットデータとして与える場合が多いが、別の実験で得られた実験値を利用することもできる。 x_i は破断口から流出する流体の蒸気重量率であって、本解析では圧力容器内の破断口の直径分の範囲に存在する平均ボイド率 $\bar{\alpha}_i$ を用いて次のように求めた。

$$x_i = \frac{\bar{\alpha}_i / v_v}{(1 - \bar{\alpha}_i) / v_l + \bar{\alpha}_i / v_v} \quad \dots\dots(4.2-20)$$

水面が破断口の直径の範囲より下に低下すると $\bar{\alpha}_i$ は 1.0 になり、直径の範囲より上にあれば破断口の中心位置のボイド率に等しくなる。また、水面が直径の範囲内にあれば、その範囲内での蒸気体積率として与えた。

水面下のボイド率 α は高さ方向に直線的に変化するとして次のように与えた。まず、平均ボイド率 α_m が次のように与えられる。

$$\alpha_m = \frac{W_{vb} v_v}{V_m} \quad \dots\dots(4.2-21)$$

これにより、高さ $z(\text{m})$ でのボイド率 α_z は

$$\alpha_z = m \frac{z}{z_m} + b \quad \dots\dots(4.2-22)$$

ただし

$$0 \leq \alpha_m \leq \frac{1}{2} \text{ の時} \quad \begin{cases} m = 2C_x \alpha_m \\ b = (1 - C_x) \alpha_m \end{cases} \quad \dots\dots(4.2-23)$$

$$\frac{1}{2} \leq \alpha_m \leq 1 \text{ の時} \quad \begin{cases} m = 2C_x(1 - \alpha_m) \\ b = (1 + C_x) \alpha_m - C_x \end{cases} \quad \dots\dots(4.2-24)$$

そこで、水面近くでのボイド率 α_{zm} は次で与えられることになる。

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_m \leq \frac{1}{2} & \alpha_{zm} = \alpha_m(1 + C_x) \\ \frac{1}{2} \leq \alpha_m \leq 1 & \alpha_{zm} = \alpha_m + C_x(1 - \alpha_m) \end{cases} \quad \dots\dots(4.2-25)$$

(4.2-23)~(4.2-25) 式にあらわれる C_x は、気泡分布パラメータであって、インプットデータとして与えるものである。

(3) 流出流量の式

破断口から流出する流体の流出速度を与える式として、飽和蒸気流出の場合と飽和蒸気及び飽和水の二相流流出の場合の 2 つを考慮した。

(a) 飽和蒸気流出

破断口が水面より上部にあり、流出流体が単相の飽和蒸気である場合には、流出速度は臨界流又は通常の単相流として流出する。破断オリフィス上流側の圧力を $p(\text{kg}/\text{m}^2)$ 、飽和蒸気の断熱指数を κ とすると、臨界圧力 $p_c(\text{kg}/\text{m}^2)$ は次で与えられる。

$$p_c = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\kappa / \kappa - 1} p \quad \dots\dots(4.2-26)$$

p_b をオリフィス下流側の圧力とする。(本実験では大

気圧中へ放出したので $p_b = 1.033 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ となる。) すると流量 $G(\text{kg/s})$ は

$p_c \geq p_b$ (臨界流となる)

$$G = C_{D1} \frac{A_D}{v_v} \sqrt{\frac{2g\kappa}{\kappa+1} p v_v} \quad \dots\dots(4.2-27)$$

$p_c \leq p_b$

$$G = C_{D1} \frac{A_D}{v_v} \sqrt{\frac{2g\kappa}{\kappa-1} p v_v \left\{ 1 - \left(\frac{p_b}{p} \right)^{k-1/k} \right\}} \quad \dots\dots(4.2-28)$$

ここで A_D は破断口オリフィスの断面積であり, C_{D1} は流量係数である。 ($C_{D1} \approx 0.6$)

(㊦) 二相流流出

破断口が水面より下にある場合には, 気液二相流の流出となる。この場合の計算法として, RELAP 3 などと同様, 本解析でも現在世界的に広く用いられている Moody による二相臨界流の計算方法³⁾ を用いるものとする。これはオリフィス上流側 (すなわち压力容器内) の流出流体のエンタルピとエントロピを知って臨界流量を求めるものである。まず, 流出流体の比エントロピ S_0 と比エンタルピ h_0 は, (4.2-20) 式の x_i を用いて,

$$S_0 = S_l + x_i(S_v - S_l) \quad \dots\dots(4.2-29)$$

$$h_0 = h_l + x_i(h_v - h_l) \quad \dots\dots(4.2-30)$$

S_l, S_v, h_l, h_v は压力容器内圧力 p の飽和水及び飽和蒸気の比エントロピと比エンタルピである。

流出流量 G は, J を熱の仕事当量とすると,

$$G = C_{D2} A_D \left\{ 2gJ \left[h_0 - h_{lc} - \frac{(h_{vc} - h_{lc})}{(S_{vc} - S_{lc})} (S_0 - S_{lc}) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{\left(\frac{v_{vc}}{v_{lc}} \right)^{\frac{1}{3}} (S_{vc} - S_0) v_{lc}}{S_{vc} - S_{lc}} + \frac{(S_0 - S_{lc}) v_{vc}}{S_{vc} - S_{lc}} \right]^{-1} \times \left[\frac{S_0 - S_{lc}}{S_{vc} - S_{lc}} + \frac{S_{vc} - S_0}{\left(\frac{v_{vc}}{v_{lc}} \right)^{2/3} (S_{vc} - S_{lc})} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(4.2-31)$$

$S_{vc}, S_{lc}, h_{vc}, h_{lc}, v_{vc}, v_{lc}$ はそれぞれ臨界圧における蒸気及び水の比エントロピ, 比エンタルピ, 比容積をあらわす。この臨界圧状態は (4.2-31) 式で

$$\frac{dG}{dp} = 0 \quad \dots\dots(4.2-32)$$

の条件を満足する時として求めることができる。なお (4.2-31) 式中の C_{D2} は二相流状態における流量係数であって, インพุットパラメータとして与えるものである。

(4) 流出流体エンタルピ

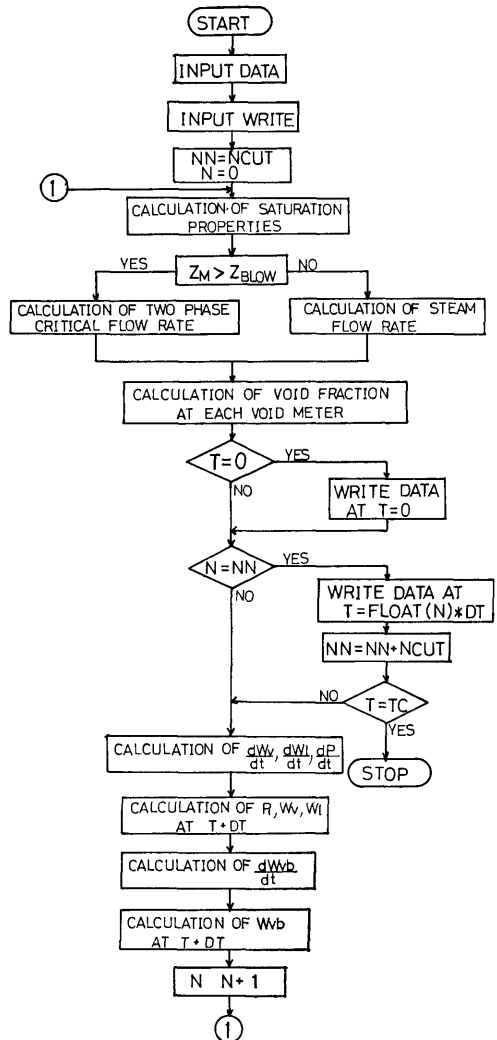


図 4-1 BLODAC-1V のフローチャート

(4.2-15) 式であらわれる流出流体の比エンタルピは (4.2-20) 式の x_i を用い, (4.2-30) 式と同様に次の形で与えることができる。

$$h_i = (1-x_i)h_l + x_i h_v \quad \dots\dots(4.2-33)$$

(5) BLODAC コード

BLODAC コードのフローチャートの概要は図 4-1 に示す通りである。すなわち, まずインพุットデータの読み込みとプリントを行い, 次に必要な物性値の読取りを行う。その後, 破断口の位置と水位の関係に応じて, 単相流又は二相流の流出流量 G の計算を行う。次にボイド計取付位置など必要とする位置でのボイド率の計算を行う。そして, $T=0$ 又は所定の時間

後 ($N=NN$) の計算結果をプリントする。所定の時間の計算を終了したなら ($T=TC$) 計算をストップするが、そうでない場合は、 dp/dt , dW_v/dt , dW_l/dt の計算を行う。それらより

$$PN = PN^{-1} + \frac{dp}{dt} \cdot DT \quad \dots\dots(4.2-34)$$

のような逐次近似計算によって、1ステップ後の各値を計算する。 (DT) は時間メッシュ)。同様に dW_{vb}/dt の計算から1ステップ後の W_{vb} を求める。そして、 $N=N+1$ と1ステップすすめて元に戻る。

本コードは逐次近似法のため、安定な解を得るには時間メッシュのとり方に注意を要する。また、Moodyの二相臨界流量の計算を1回ごとに行っているため、それに大部分の計算時間を要する。長時間の計算を行うようにするには、これを表の形で入れるよう今後変更する必要がある。

なお、将来は本解析コードを多ボリュームに拡張する予定であるが、さしあたり、1ボリュームのみを扱うものを作成した。そこでこれを BLODAC-1V と名づけることとする。

4.3 BLODAC と RELAP 3 及び 4 との比較

BLODAC の解析モデルでは、流量係数として蒸気単相流に対する C_{D1} ($=0.6$) と二相臨界流に対する C_{D2} とを分けて使用することにより、ある程度流量係数としての物理的意味を考慮に入れられるようになっている。一方、RELAP 3 又は 4 においては、これはただ1つの値としてインプットされるようになっている。例として、図4-2及び図4-3に BLODAC と RELAP との同条件での計算結果の比較を示す。図4-2は上部破断の場合の例で、流出流体はほぼ蒸気の単相流であるため、RELAP で $C_D=0.6$, BLODAC で $C_{D1}=0.6$, $C_{D2}=0.6$ としたものである。圧力特性は3つの計算結果がいずれも非常に近いことをあらわしている。図4-3は、下部破断の場合の計算例である。下部破断の場合、途中まで二相流流出であるが、水位が低下してくるとあるところで単相流流出にかわる。RELAP では、単一の流出係数しか用いられないのに対し、BLODAC では C_{D1} , C_{D2} という2つのパラメータを用いているため、二相流の流量係数と単相流の流量係数とを別々にえらび、図4-3のような結果を得ることができる。二相流流出領域では1.3という同じ流量係数であるため BLODAC と RELAP はほぼ同じ圧力時間特性を示すのに対し、単相流流出になると BLODAC は $C_{D1}=0.6$ という別の

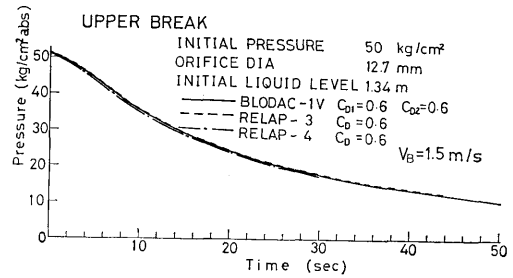


図4-2 BLODAC-1V と RELAP 3 及び 4 の計算結果の比較 (上部破断)

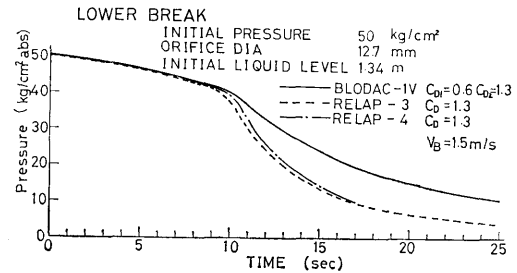


図4-3 BLODAC-1V と RELAP 3 及び 4 の計算結果の比較 (下部破断)

流量係数を与えられるので大きな違いがでてくる。そして、このように単相流流出を別に扱うことが実験結果を比較的うまくあらわすことがわかった。

4.4 BLODAC コードにおけるインプットパラメータ C_{D2} , V_B の整理

実験により得られた、圧力時間特性、ボイド率時間特性、及び中部下部破断の場合の水位降下速度、の3つの実験値をうまくあらわすような計算値を得るため、BLODAC コードにおいてパラメータ C_{D2} , V_B をいろいろに変えることにより、最適の C_{D2} と V_B を求めた。

この方法を、上部破断実験について、RELAP 3 により比較した図4-4から図4-6を用いて説明する。すなわち、RELAP 3 では、気泡離脱速度 V_{Bft}/s と、流量係数 C_D をインプットパラメータとして与えて計算を行わせるようになっている。 $(C_x=0.8$ とした。) 図4-4 は圧力特性の実験値と計算値の比較例であり、 $V_B=3ft/s$, $C_D=0.7$ とした①の計算値は実験値より小さくなっている。同様に②で示した $V_B=6ft/s$, $C_D=0.7$ の場合も小さすぎる。一方、 $C_D=0.5$ とした④⑤はいずれも実験値より大きい。実験値に最も近いのは $V_B=4ft/s$, $C_D=0.6$ の③の場合である。図4-5は、同様の方法でボイド率の比較を行

実験値とRELAP 3による計算値との比較 — 圧力

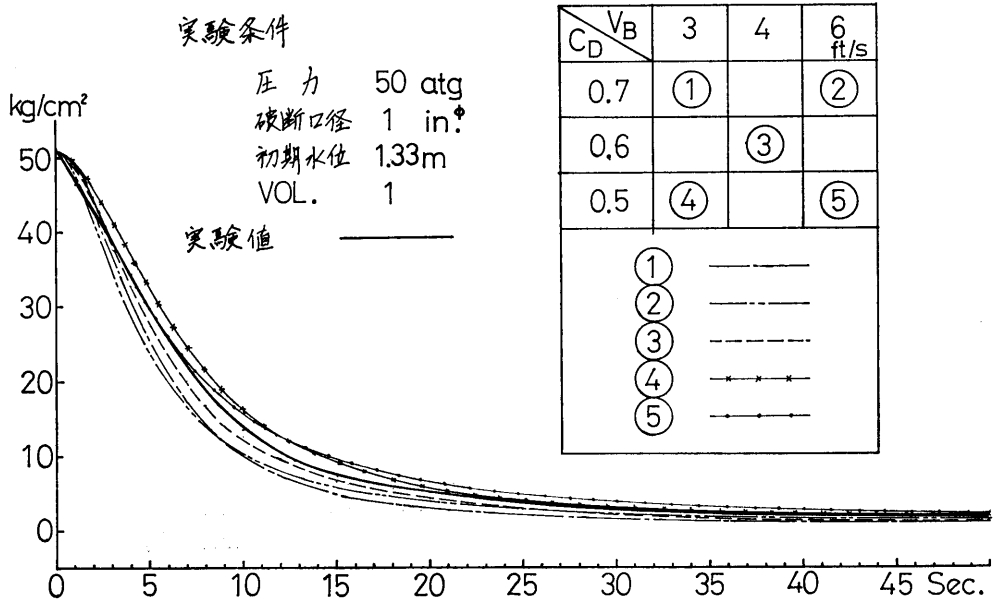


図 4-4 RELAP 3 によるインプットパラメータの各組合せと実験値との比較 (圧力特性)

実験値とRELAP 3による計算値との比較 — ボイド率

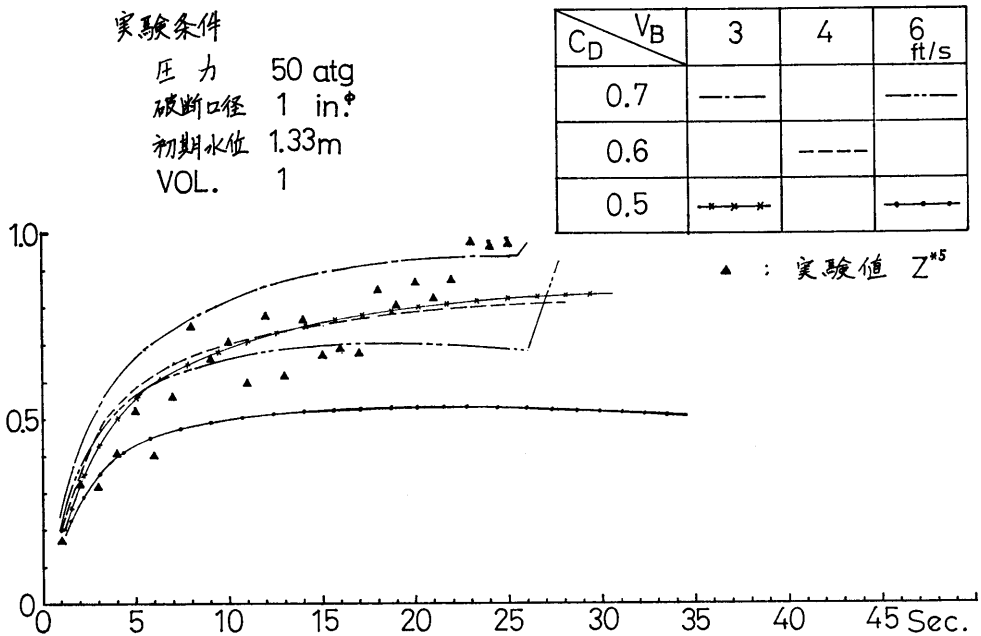


図 4-5 RELAP 3 によるインプットパラメータの各組合せと実験値との比較 (ボイド率特性)

圧力とボイド率からみた C_D と V_B の関係

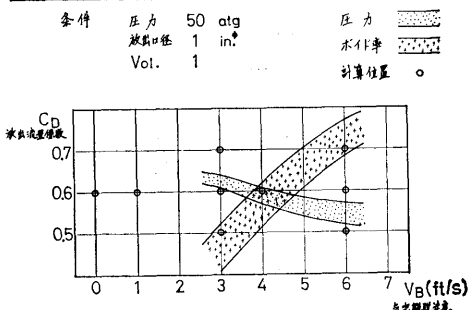


図 4-6 圧力とボイド率からみたインプットパラメータの関係

ったものである。▲印はボイド計V-5のボイド率であって、 $V_B=3\text{ft/s}$, $C_D=0.7$ とした計算値は実験値より大きく、 $V_B=6\text{ft/s}$, $C_D=0.5$ とした計算値は逆に小さく、 $V_B=6\text{ft/s}$, $C_D=0.7$, $V_B=4\text{ft/s}$, $C_D=0.6$, および $V_B=3\text{ft/s}$, $C_D=0.5$ の各組合せの時はいずれも実験値にはほぼ近いことがわかる。そこで、図

4-6に、縦軸として C_D 、横軸として V_B をとり、圧力特性とボイド率特性の実験値をよくあらわすようなパラメータの組合せの範囲を示した。この図より明らかのように圧力特性とよくあうパラメータ範囲とボイド率特性とよくあうパラメータ範囲とは交さしており、この交った範囲内のパラメータの組合せのみが、圧力とボイド率両方の実験値とうまくあうことになる。

同様の比較を、BLODAC-1 Vを用いて各実験値に対して行った。BLODAC-1 Vは蒸気単相流の流量係数 C_{D1} として0.6を用い、二相流の流量係数 C_{D2} をインプットパラメータとして与えた。図4-7及び図4-8は、このようにして求めた圧力、ボイド率、及び水位降下速度の3つの実験値をよくあらわすパラメータ C_{D2} 及び V_B の組合せである。図4-7は、初期圧力 $50\text{kg/cm}^2\text{g}$ 、初期水位 1.34m のものについて示したもので左端2つが上部破断の場合であり、それぞれオリフィス口径 25.4mm と 12.7mm につ

EXPERIMENTAL CONDITION
INITIAL PRESSURE $50\text{ kg/cm}^2\text{g}$
INITIAL LIQUID LEVEL 1.34 m

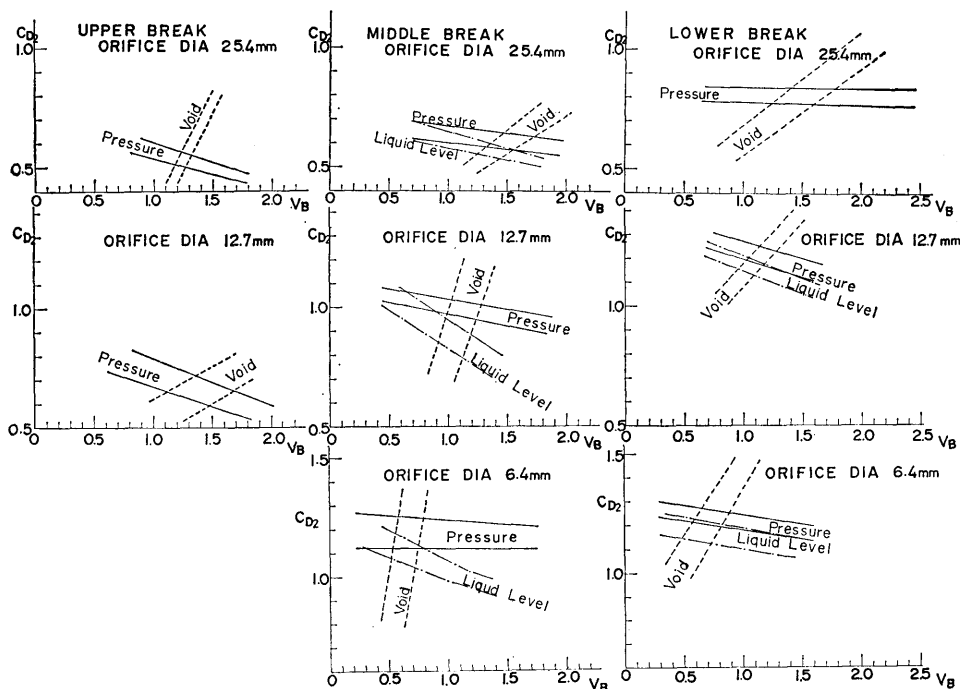


図 4-7 各実験値をうまくあらわすインプットパラメータの組合せ

EXPERIMENTAL CONDITION
 INITIAL PRESSURE 30 kg/cm²g
 INITIAL LIQUID LEVEL 1.29 m

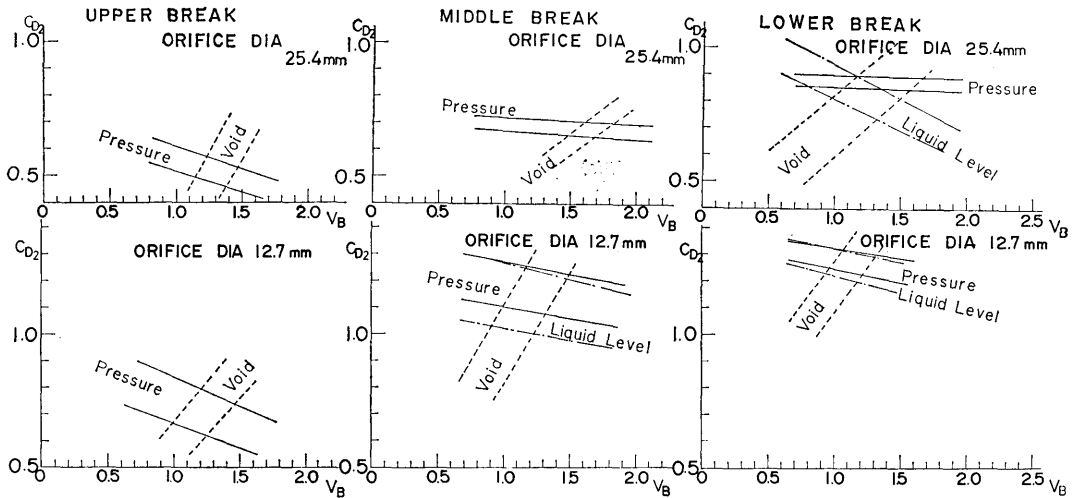


図 4-8 各実験値をうまくあらわすインプットパラメータの組合せ

いて示したものである。中央の3つは中部破断の場合で上からオリフィス口径 25.4mm, 12.7mm および 6.4mm に対するものである。右端の3つは下部破断に対するもので、上からオリフィス口径 25.4mm, 12.7mm および 6.4mm に対するものである。図4-8は、初期圧力 30kg/cm²g, 初期水位 1.29m に対するもので、左より、上部、中部、下部破断の場合につき、オリフィス口径 25.4mm と 12.7mm について示したものである。

これらの図よりわかるように、圧力をあわせるためのパラメータの組合せは左から右下りであるのに対し、ボイド率をあわせるためのものは右から左下りになっている。また、水位降下は圧力と同じに右下りになっている。そして、この交点の範囲に関し、以下の結論が得られる。

(i) オリフィス口径が同じ場合、上部、中部、下部と破断口位置が下へいくに従い、流量係数 C_{D2} は大きくなる。

(ii) 同じ破断口位置の場合、オリフィス口径の大きい程 C_{D2} の値は小さくなる。

(iii) V_B は、同じ破断口位置の場合、オリフィス口径の大きい程大きくなっている。

さて、 C_{D2} 及び V_B の物理的意味を考えつつ考察

を行ってみよう。

C_{D2} は、二相流流出時のブローダウン時間に影響するパラメータであり、圧力特性に特にきいてくるものである。一方、 V_B は水面からの蒸気離脱速度であって、これが大きいことは、水面下のボイド率が低下して水位降下速度が大きくなることを意味している。各破断位置の特性に対しそれぞれ以下のように説明することができる。

(a) 上部破断の場合；ボイド率をあわせるためには左下り、すなわち V_B が大きい時 C_{D2} を大きくしなければならない。これは、 V_B が大きくなると水面下のボイド率が下るため、 C_{D2} を大きくして激しいブローダウンが生じているとしないし実験値とあわないことを意味している。

また、圧力をあわせるためには、 V_B が大きくなると C_{D2} を若干小さくしなければならない。これは、 V_B が大きくなると水位降下が早くなるので、ブローダウンを長びかせる意味で C_{D2} を小さくするのである。しかし、上部破断の場合、大部分蒸気の単相流流出であるため、図4-7、図4-8に示すほど圧力をあわせるための範囲がごく限られたものとはならず、これより大きく離れても比較的实验値からのずれは小さい。

(b) 下部破断の場合；水位降下を合わせるためには V_B 大の時、 C_{D2} を小さくする必要がある。これは V_B が大きくなるとボイド率が下り水面が早く降下するからで、ブローダウン時間を長くするために C_{D2} を小さくする必要がある。同様に圧力をあわせるためにも、 V_B が大の時 C_{D2} を小さくする必要がある。

ボイド率については、上部破断の場合に説明したことと同様に、 V_B が大きくなるとボイド率が下るため C_{D2} を大きくとってブローダウンをはげしい方向にもっていかなければならない。しかし、一般に下部破断の場合、ボイド率が小さいので、正しく計算と比較するには大分困難な点がある。

(c) 中部破断の場合；上部破断と下部破断の中間的な性質であって、圧力とボイド率と水位降下の3つを同時に満足するパラメータの組合わせが必要となる。すなわち、水位が破断口に達する以前は、下部破断と同様に、主として圧力と水位降下速度が問題となり、水位が破断口に達して以後は上部破断と同様に圧力とボイド率を主としてあわせる必要がある。なお、この3つを同時に満足しない時は気泡勾配モデルが不適当となるわけである。実際図4-7の中央の図はその例であるが、実験値の精度等考えると、これでよい近似となっていると考えられる。

4.5 可変パラメータモデルの検討

これまで、流量係数 C_D 及び気泡離脱速度 V_B に関し、実験データの整理などからいくつかの考え方が提案されている。これらの考え方は、破断口径が小さく出口乾き度が小さい程大きな C_D (単相流流出にも2相流流出にも同じ係数を用いている。) を与えるということ及び V_B に関しては Wilson et al の式を用いていることなどが特徴である。

4.5.1 流量係数 C_D について

米国 Battelle Memorial Institute で行われた Containment System Experiment の実験結果より、流量係数 C_D として Alleman⁴⁾ は以下の実験式を与えた。

$$C_{DCSE} = 0.287 \left(\frac{\text{破断口面積}}{\text{容器断面積}} \right)^{-0.165}$$

これは、容器面積が同じ場合、破断口面積が大きいほど C_D が小さくなるということで、本報告による結果と一致している。この関係式による一体型炉ブローダウン実験装置の C_D と破断口径の関係を図4-9に示す。これによるとオリフィス口径 25.4mm の時 $C_D=0.635$ 、12.7mm の時 $C_D=0.8$ 、[6.4mm の時

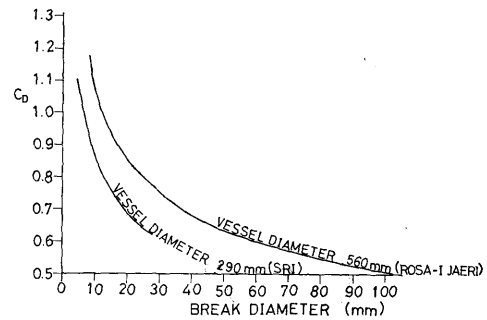


図4-9 CSE実験の実験式による破断口径と C_D の関係

$C_D=1.0$ となることがわかる。図4-9には参考として原研のROSA-1の容器直径560mmの場合についても示してある。

原研の傍島⁹⁾は、ROSA-1による実験データを RELAP 3 の計算値と比較検討することにより、流出流体が低乾き度の場合に相間不平衡のため C_D が大きくなるとし、平均の流出流体乾き度 x と C_D との間に次の関係を与えた。

$$C_D = 0.57 + 0.002/x$$

これも、流出流体乾き度が小さい時に、 C_D が大きくなるということで本報告の結果と定性的には一致している。

一方、1972年10月の AEC Regulatory Staff の Supplemental Testimony においては、いろいろな意見が記されており、ANCのSensitivity Studyの結果として、次のような値を C_D に考えている。(X_i を流出流体の乾き度とする。)

$$0 \leq X_i \leq 0.02 \quad C_D = 2.0$$

$$0.02 \leq X_i \leq 0.03 \quad C_D = 4.8 - 140X_i$$

$$0.03 \leq X_i \quad C_D = 0.6$$

これも、 X_i が小さいほど大きな C_D を与えるという点で本実験の結果と一致している。

4.5.2 気泡離脱速度 V_B について

気泡離脱速度については、Wilson et al⁶⁾ による蒸気泡の上昇に対する実験式が、唯一のものとして用いられることが多いが、これがブローダウン時に適用できるか、完全には実証されたものとはいいがたい。彼等の式は以下のようにボイド率と速度 V_B との関係が2領域に分けられるとするものである。

$$\left(\frac{v_l}{v_g - v_l} \right)^{0.32} \left(\frac{d_B}{d_V} \right)^{0.19} < 2.7 \text{ の時}$$

$$\alpha = 0.136 \left(\frac{v_l}{v_g - v_l} \right)^{0.32} \left(\frac{d_B}{d_V} \right)^{0.19} \left[\frac{V_B}{(gd_B)^{0.5}} \right]^{1.78}$$

$\frac{\alpha}{\left(\frac{v_l}{v_g - v_l} \right)^{0.32} \left(\frac{d_B}{d_V} \right)^{0.19}} \geq 2.7$ の時

$$\alpha = 0.75 \left(\frac{v_l}{v_g - v_l} \right)^{0.32} \left(\frac{d_B}{d_V} \right)^{0.19} \left[\frac{V_B}{(gd_B)^{0.5}} \right]^{0.78}$$

とするものである。いずれの範囲でも、ボイド率 α の大きい程、 V_B は大きくなっている。なお、

$$d_B = \left(\frac{\sigma}{1/v_l - 1/v_g} \right)^{0.5}$$

σ は表面張力 (kg/m) であり、 v_l, v_g は水と蒸気の比容積 (m³/kg)、 d_V は圧力容器の直径 (m)、 g は重力加速度 (9.8m/s²) である。

これを、本実験の 50kg/cm² の初期圧力の場合に適用してみると

$$\alpha < 0.38 \text{ の時 } \alpha = 0.44 V_B^{1.78}$$

$$\alpha \geq 0.38 \text{ の時 } \alpha = 0.42 V_B^{0.78}$$

となる。これを図として示したのが図 4-10 であって、平均ボイド率の大きい程 V_B が大きくなっている。このことは、定性的には、図 4-7 に示す V_B に

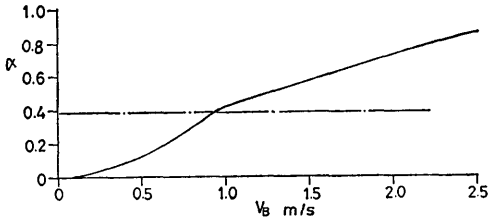


図 4-10 Wilson et al の実験式による α と V_B の関係 (50kg/cm² の場合)

対する関係と一致するものであって、中部破断及び下部破断では破断口径の小さいほど小さな V_B となっている。このことは、破断口径の小さい程、ブローダウンの過渡特性がおだやかでボイド率が小さく、従って V_B が小さいことを示している。上部破断の場合は、破断口径の大きい方が、液を同伴する割合が大きいこともあり、はっきりした特性はでていない。なお、図 4-7 では上部、中部、下部破断とも $V_B = 0.5 \sim 1.8$ m/s の範囲に入っているが、これはブローダウン全過程に対し単一の V_B をとっていることもあり、Wilson の式の妥当性をこれ以上ははっきりさせることはできない。

4.5.3 可変パラメータモデルによる比較

本実験結果と、可変パラメータモデルによる計算値の比較を行った。すなわち、BLODAC-1 V コード

(328)

に原研の傍島らの C_D に対する式を用いたものを、BLODAC-1 V J とし、ANC の C_D を用いたものを BLODAC-1 V U とした。BLODAC-1 V J は、leak junction quality を X_i として、

$$C_{D1} = 0.6$$

$$C_{D2} = 0.57 + 0.002/x_i$$

と、おいたもので、 x_i が小さく Moody の臨界流量にこの C_{D2} を掛けて求めた流量 G が、水の単相流出より大きい場合、水が単相流で流れるとしたものである。(その際、水に対する流量係数を 0.6 とした。) また、 V_B については、Wilson の式をそのまま用いた。

一方、BLODAC-1 V U は、 C_{D2} して 4.5.1 項に記したものを、 $C_{D1} = 0.6$ とした。また、 V_B としては Wilson による式を用いた。

以上のようにして、圧力及びボイド率について計算値と実験値の比較を行ったものが、図 4-11~図 4-24 である。図には、図 4-7 及び図 4-8 で与えた固定パラメータによる C_{D2} と V_B の適当な範囲の値をえらんで計算したものを、BLODAC-1 V として同時に示してある。広い範囲にわたり、BLODAC-1 V J も BLODAC-1 V U も比較的良好に実験値とあっ

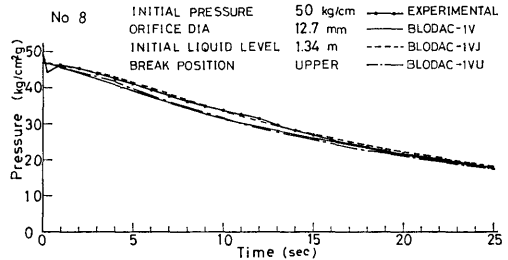


図 4-11(a) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

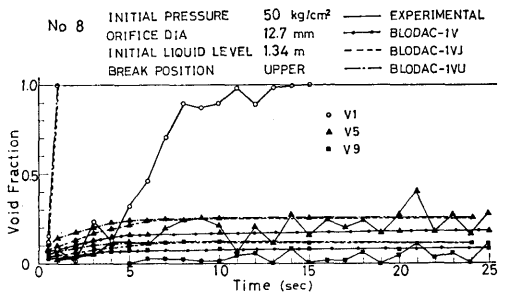


図 4-11(b) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

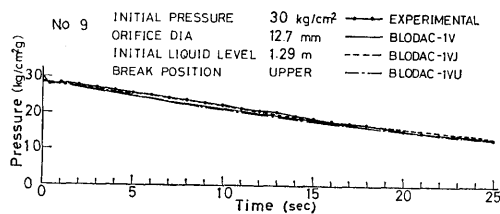


図 4-12(a) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

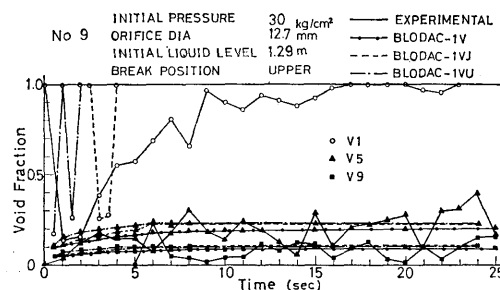


図 4-12(b) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

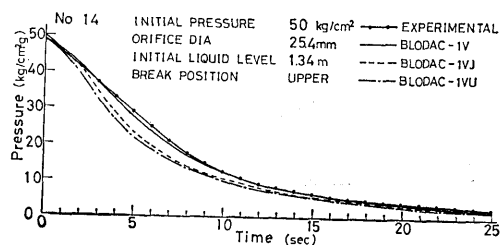


図 4-14(a) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

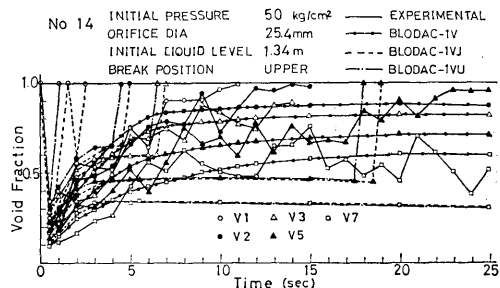


図 4-14(b) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

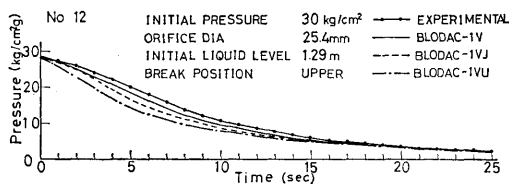


図 4-13(a) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

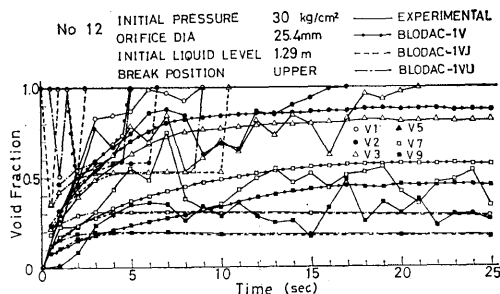


図 4-13(b) 上部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

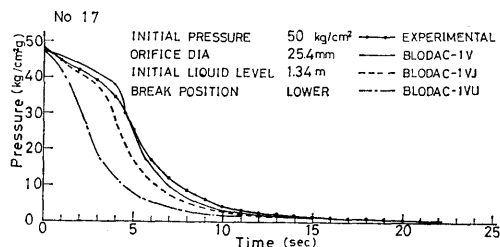


図 4-15(a) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

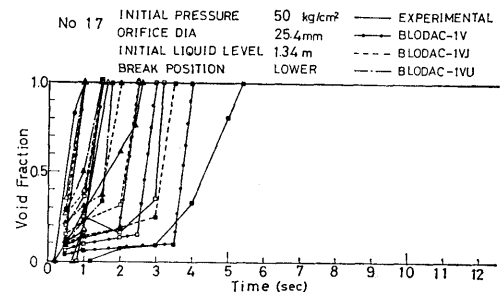


図 4-15(b) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

ているといふことができる。これは、いずれの場合も流出流体が低乾き度の時大きな CD_2 の値をとったことによると考えられる。

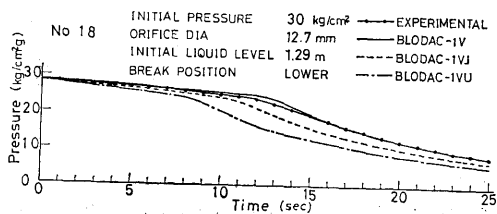


図 4-16(a) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

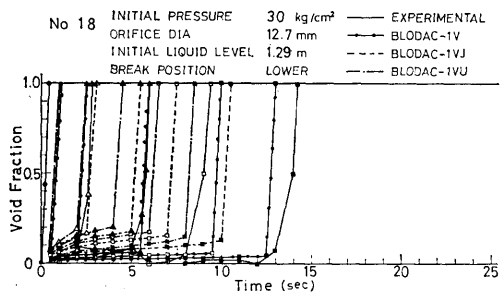


図 4-16(b) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

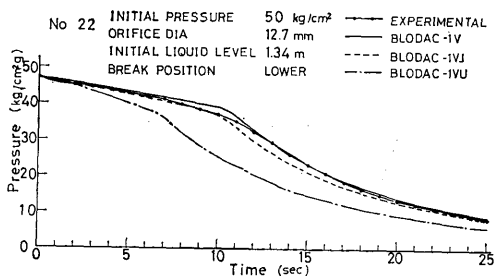


図 4-17(a) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

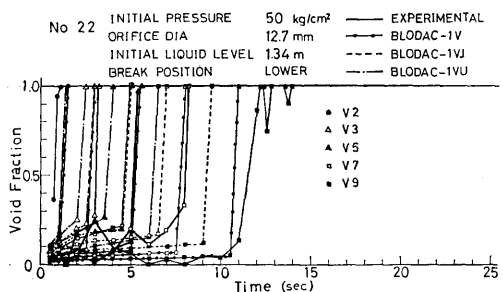


図 4-17(b) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

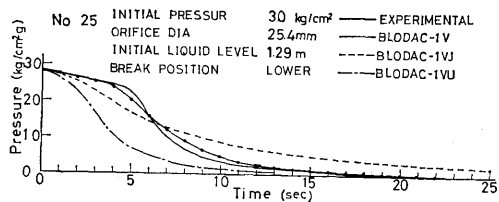


図 4-18(a) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

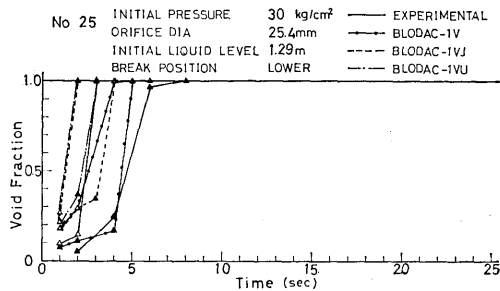


図 4-18(b) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

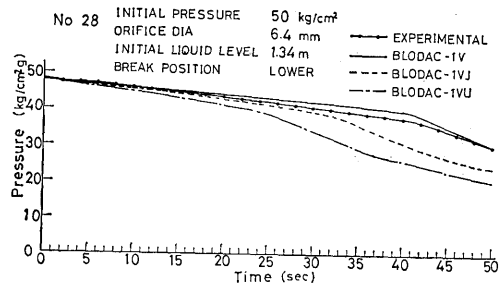


図 4-19(a) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

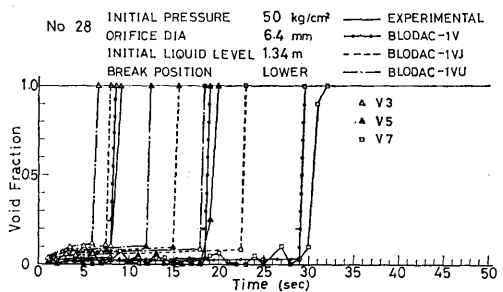


図 4-19(b) 下部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

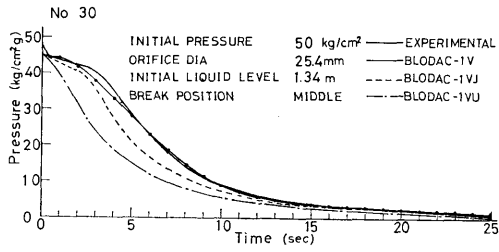


図 4-20(a) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

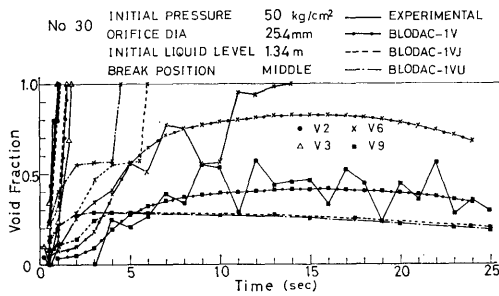


図 4-20(b) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

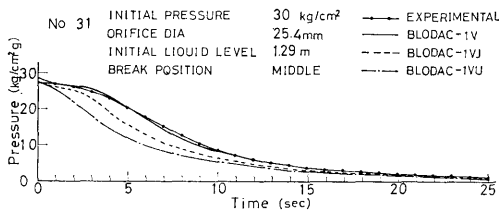


図 4-21(a) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

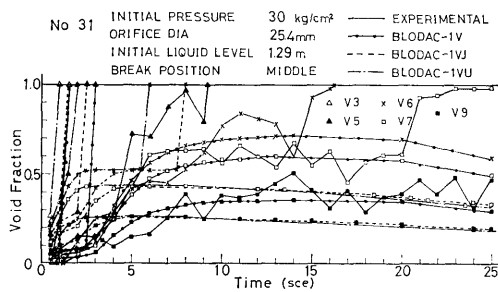


図 4-21(b) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

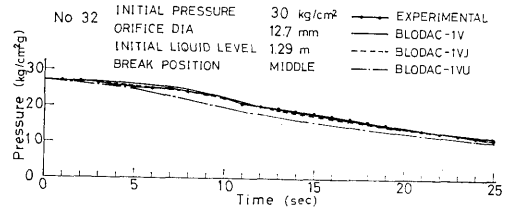


図 4-22(a) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

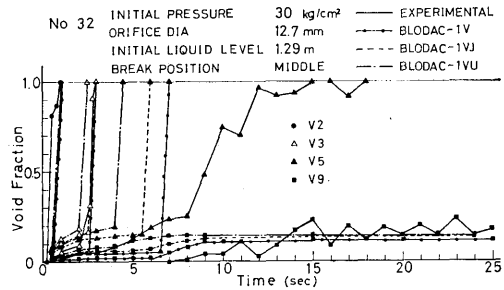


図 4-22(b) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

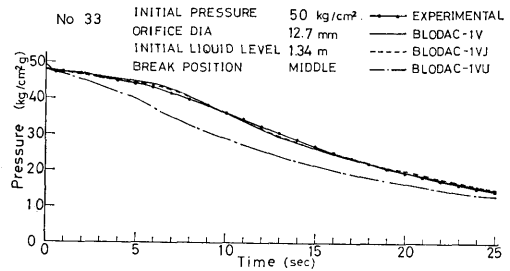


図 4-23(a) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

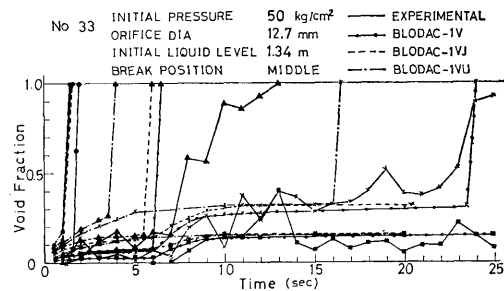


図 4-23(b) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

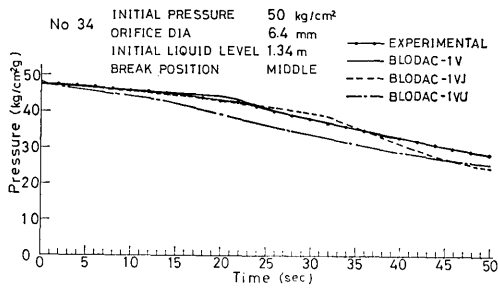


図 4-24(a) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (圧力)

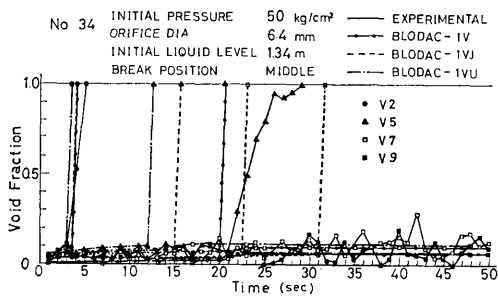


図 4-24(b) 中部破断実験値と各モデル計算の比較 (ボイド率)

5. まとめ

一体型炉ブローダウン実験装置により34回のブローダウン実験を行い、さらに解析との比較検討を行うことによってブローダウン時の圧力容器内流体の熱流力の特性に関するいくつかの知見を得ることができた。すなわち、

- (1) 1 ボリューム破断実験の結果、圧力特性は、上部破断実験の場合ブローダウン直後のアンダーシュートを伴う比較的急な降下を示すのに対し、下部破断の場合、気液2相流出の比較的ゆるやかな降下と破断口位置へ水面が降下して蒸気流出へ変って後の比較的早い降下の2段階に分れる。ボイド率特性は、上部破断の場合の大きなボイド率特性に対し、下部破断の場合、きわめて小さな値となった。また、ボイド率は圧力容器内の上部ほど大きな値を示した。
- (2) 初期流体条件が同一で破断口の大きさを変えた場合の比較を、破断口断面積と時間の積が同一になるように時間軸を変えて比較し、破断口径の大きい方が相対的にゆっくりしたブローダウン特性を示すことがわかり、圧力特性およびボイド率特性の両面か

(332)

ら考察を行った。

- (3) 水面下ボイド率の測定により、上部破断の場合、気泡分布パラメータ $C_x=0.8$ に近い分布となるが、下部破断の場合、気泡勾配モデルの分布の勾配より大きくなった。
- (4) 1 ボリュームブローダウン解析コード BLODAC-1Vを作成した。これに含まれるインプットパラメータとしての蒸気单相流量係数 C_{D1} 、気液2相の流量係数 C_{D2} 、気泡分布パラメータ C_x 、蒸気離脱速度 V_B について検討し、特に C_{D2} 、 V_B をいろいろ変えることによって圧力、ボイド率、水面降下速度の実験値を満足する値の範囲を求め、ボイド率の実験データにもとづき考察した。
- (5) C_{D2} と V_B の可変モデルによる本実験との比較を行ったが、流出流体の乾き度が小さい時 C_{D2} を1以上にとるモデルではかなりよく実験結果と一致することがわかった。

以上、いくつかの有益な知見が得られたが、本実験結果には、検討次第でさらに多くの情報が含まれていると考えられる。今後、それらの検討および、国内外の実験を本研究成果により解釈する作業などをすすめる予定である。

6. 引用文献

- 1) Retting, W. H. et al, "RELAP 3...A Computer Program for Reactor Blowdown Analysis", IN-1321, Idaho Nuclear Corporation, June 1970.
- 2) Moore, K. V. & W. H. Retting, "RELAP 4...A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis", ANCR-1127, Aerojet Nuclear Company, Dec. 1973.
- 3) Moody, F. J., "Maximum Flow Rate of a Single Component Two-Phase Mixture", J. Heat Transfer—Trans. ASME, Vol. 87, Feb. 1965, p. 134.
- 4) Allemann, R. T. et al, "Experimental High Enthalpy Water Blowdown from a Simple Vessel through a Bottom Outlet", BNWL-1411, June. 1970.
- 5) 島宗弘治他, "軽水炉冷却材喪失事故時の一次冷却系内の熱水力的挙動 (ROSA-1による模擬実験結果)", JAERI-M 6318, 1975年12月.
- 6) Wilson, J. F. et al, "The Velocity of Rising Steam in a Bubbling Two-Phase Mixture", Trans. Am. Nucl. Soc. Vol. 5, 1962, p. 151.

7. あ と が き

本報告は、昭和48年度の原子力試験研究費で製作した「一体型炉ブローダウン実験装置」による実験および検討結果である。ブローダウン中の圧力容器内の流体の挙動を測定するという困難な作業のため実験が軌道にのったのは49年度後半であり、その後1年半の実験および検討、さらにデータの整理と考察に予想以上の月日を費し、ついに昭和52年に入ってしまった。しかし、特に1ボリュームのブローダウン時の現象について、新しい貴重な多くの資料が得られたことは幸であり、この中からは、さらに今後も検討すべきデータも沢山ある。だが、あまり時間がかかりすぎることもあり、とりあえずここにデータ及び、これまでに行った検討結果をまとめておくことにした。

本研究は、高圧高温条件での実験、ぼう大なデータの読取りと整理、解析コードの開発、計算と実験との比較検討など多くの作業を必要とした。そこで、実験の実施面において、三井造船株式会社と共同研究という形をとって、多大の援助をしていただいた。

そのほか、本研究を行うにあたり、多くの人々の御助力をいただいた。計画当初には、予算面で船研横村武宣氏、実験装置製作面で、三井造船小関守史氏などであり、また研究を始めてからは、実験面で小林道幸氏、その他多くの面で三井造船河合保彦氏のお世話をいただいた。さらに、この研究期間を通して、膨大な実験データをビジュグラフの記録より読み取り、圧力特性やボイド率特性のグラフとして書いて下さった上坂（現青柳）季子、光畑敬子、篠原みどりの諸嬢に対しては、特に深く感謝する次第である。