

冷水注入時における圧力容器内流体の熱水力的挙動

(非常用冷却水混合効果実験装置による実験)

綾 威雄*・小林 道幸*・稲坂富士夫*・成合 英樹**

Thermo-Hydraulic Behavior of Saturated Steam-Water Mixture in Pressure Vessel during Injection of Cold Water

(Results and Discussions of the Experiments with the Facility for Mixing Effect of Emergency Core Cooling Water)

By

Izuo AYA, Michiyuki KOBAYASHI and Fujio INASAKA, Hideki NARIAI

Summary

The thermo-hydraulic behavior of saturated steam-water mixture in a pressure vessel during injection of cold water was experimentally investigated with the Facility for Mixing Effect of Emergency Core Cooling Water. The dimensions of the pressure vessel used in the experiments were 284mm ID and 1,971mm height. 11 experiments were conducted without blowdown in order to comprehend the basic process excluding the effect of blowdown at injection of cold water. The initial pressure and water level, the injection flow rate and the size of injection nozzle were chosen as experimental parameters.

Temperatures and void fractions at 6 elevations as well as pressure in the pressure vessel were measured, and new data especially on the pressure undershoot just after the initiation of water injection and the vertical distribution of temperature and void fraction were gotten.

The transients of pressure, average temperature and void fraction were calculated using single-volume analysis code BLODAC-1V which is based on thermal equilibrium and so-called bubble gradient model. Some input parameters included in the analysis code were evaluated through the comparison of analysis with experimental data. Moreover, the observed pressure undershoot which is evaluated to be induced by a time lag of vapourization in water due to thermal nonequilibrium, was also discussed with the aid of another simple analysis model.

目次

1. まえがき
2. 実験装置と方法
- 2.1 実験装置

* 原子力船部

** 筑波大学構造工学系

原稿受付：昭和58年7月4日

- 2.2 計装
- 2.3 実験条件
- 2.4 実験手順
- 2.5 実験データの整理
- (1) 圧力・温度特性の整理
- (2) 注水流量と注水総量
- (3) ボイド率の整理

3. 実験結果と考察

3.1 注入水の飛程

3.2 実験結果

3.3 現象の推移シーケンス

- (I) 飽和水注入による加圧過程
- (II) 蒸気凝縮による減圧過程
- (III) 減圧沸騰に伴う圧力の回復過程
- (IV) 熱平衡状態への遷移過程
- (V) 平衡飽和過程
- (VI-a) 蒸気部の過熱と水部のサブクール過程
- (VI-b) 水面上昇による加圧過程
- (VII) 注水停止後の熱平衡状態への遷移過程
- (VIII) 注水停止後の熱平衡加圧過程
- (IX) 自然冷却過程

3.4 蒸気部温度の過熱について

3.5 実験パラメータによる整理

3.5.1 過渡変化全般

3.5.2 圧力アンダーシュート

4. 解析

4.1 BLODAC-IV コードによる過渡変化解析

4.1.1 注入水と蒸気間の熱交換率 C_s について

4.1.2 圧力と温度応答の解析

4.1.3 ボイド率と水位応答の解析

4.2 圧力アンダーシュート時の圧力降下速度の解析

5. まとめ

5.1 本研究の成果

5.2 今後の課題

6. 参考文献

7. あとがき

要 旨

非常用冷却水混合効果実験装置により、高圧飽和水-蒸気系への冷水注入時の压力容器内の熱流力的応答について実験的研究を行った。压力容器の寸法は内径 284 mm で高さ 1971 mm である。実験は、非常用冷却水注入による基礎過程の把握を目的に、ブローダウンを伴わない条件で行い、実験パラメータとして初期圧力と水位、注水流量および注水ノズル形状を選び、その影響を調べた。

压力容器内圧力および垂直方向 6 カ所の温度とボイド率の変化を測定し、特に注水開始直後の圧力アンダーシュートと冷水注入中の温度分布・ボイド率分布について新しいデータを得た。

当所で開発した 1 ボリューム熱平衡解析コード BLODAC-IV (第14巻5号参照) を使って、圧力・温度およびボイド率の過渡変化を計算し、実験データとの比較から計算パラメータの評価を行った。また、熱的非平衡による蒸気泡の発生遅れにより生ずると考えられる注水開始直後の圧力アンダーシュートについても簡単な解析モデルに基づく考察を行った。

1. まえがき

一体型船用加圧水炉(一体型炉)は、船用原子炉の小型化を目指したものであって、大型の压力容器の中に蒸気発生器を内装し、ポンプを压力容器へ直接取り付けするなどして、1 次水循環用主配管のない構造にし、さらに、この压力容器を圧力抑制式格納容器へ組み込んだものである。将来の実用化時代における船用炉として最も有望と考えられているこの一体型炉は、世界各国で開発研究が進められており、わが国でも日本造船研究協会において概念設計⁽¹⁾が行われた。

一体型炉を安全性の観点からみた場合の特徴は、1 次冷却水循環用主配管がないことで、在来の加圧水型炉と比較し、想定する冷却水喪失事故 (Loss-of-Coolant Accident, LOCA) の規模が著しく軽減されると考えられることである。また、この LOCA に備える格納容器は、空間的制約からできるだけ小型にすることが望ましいため圧力抑制型を採用するとともに、発電用軽水炉と比較して設計圧力が高いものになっている。筆者らは、これまで、一体型炉の LOCA 現象を把握する目的で「一体型炉ブローダウン実験装置」と「一体型炉安全性模擬実験装置」による実験および解析の両面からの研究を行ってきた^{(2)~(7)}。

一方、LOCA による 1 次冷却水の減少に伴う炉心燃料被覆の過熱を防止するため、一体型炉にも、従来の加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) と同様、非常炉心冷却系 (Emergency Core Cooling System, ECCS) が設けられている。ECCS は炉心過熱を引き起こす可能性のある全ての場合に作動するよう設計されており、LOCA 時には、ブローダウン中は高圧注水系より、また終了後は低圧注水系より炉心冷却がなされる。ブローダウン中に注入された冷水は、条件によって、炉心を十分冷却することなしに破断口へ直行するいわゆるバイパス現象⁽⁸⁾が起きることがある。そこで、PWR の安全評価のための LOCA 解析においては、ブローダウン中に注入された ECC 水は炉心冷却に一切有効に働かないとする保

守的な方法⁹⁾が採られている。

その後、「ECC 水が実際にはどの程度有効であるか」という問題に大きな関心が集まり、多くの実験的研究から、ECC 水のバイパスは、装置の寸法・形状と蒸気凝縮を伴う 2 相流が複雑に絡み合った現象¹⁰⁾であり、その程度を予め解析的に予測することは極めて困難である¹¹⁾と考えられるに至った。そして、最近では、実炉を模擬した装置による実験データに基づく相関式¹²⁾を求める努力がなされている。

このように、これまではブローダウン中の ECC 水注入による压力容器内の現象解析に関しての研究が多かったのに対し、その複雑な現象の基礎過程と考えられるブローダウンを伴わない場合の ECC 水注入時の飽和蒸気 - 水系の応答については十分な研究がなされていない。本研究は、この基本的現象についてのデータを得る目的で、流体加熱用ヒーター以外の構造物を設けないなどして、できるだけ内部構造物の影響を除いた「非常用冷却水混合効果実験装置」を製作し、それ

による実験および若干の解析による考察を行ったものである。従って、日本原子力研究所で行われた実験¹³⁾などの従来からの研究は、実炉に近い条件における ECC 注入時の総合効果に焦点を合わせているという色彩が強いのに対し、本研究は ECC 注水のみによる効果を対象とした分離効果 (separate effect) 実験であると言うことができよう。本実験のデータは、直接的には、本装置のような単純な系に対する解析法の確立に利用されるが、その実験条件から、1979年3月の TMI 事故¹⁴⁾のような小リーク事故における ECC 水の挙動把握に有益である。さらに、ECC 水注入開始直後に現われる圧力のアンダーシュートに関するデータが不足している現状から見て、本報のデータは、安全評価用コードとは別に各国で開発が進められている best estimate 用解析コード¹⁵⁾の内、熱的非平衡現象を扱うモデルや相関式の検証にも活用されることが期待できる。

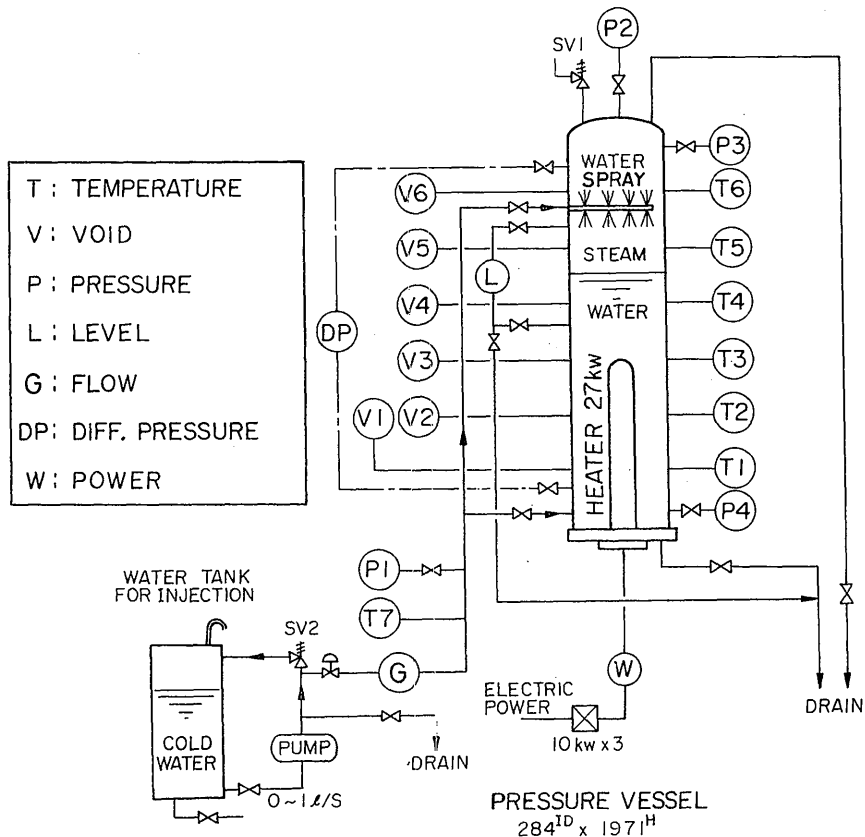


図2-1 実験装置 フローシート

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置

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、実験装置本体は圧力容器と注水タンク及びこれらをつなぐ注入系配管よりなるものであって、これに計装配管、給排水配管及び空気系配管が取り付けられており、全体が架台に組み込まれ固定されている。

圧力容器は内径284mmφ、高さ1971mm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 ECC 水を模擬した冷水注入のためのノズル用貫通孔が設けられている。上部貫通孔は蒸気部注入である Upper-Head Injection を模擬するため、また下部貫通孔は水部注入を模擬するためのもので、それぞれ圧力容器フランジ面より1550mmと200mmの高さにある(図2-2参照)。

本圧力容器の主要設計仕様は、先に報告した「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」⁽²⁾で用いたものとはほぼ同じであり、以下の通りである。

設計圧力	60kg/cm ² g.
設計温度	280°C
使用圧力	50kg/cm ² g. 以下

使用温度 265°C 以下

材質 STPT38 および SF50

ECC 水注入用ポンプとして使用したプランジャーポンプの仕様は次のようである。

吐出圧 70kg/cm²g.

流量 16~56kg/min.

回転数 400r.p.m.

プランジャー 3 連

電動機 11kW 4 極

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。

数 量 9 本 (3×3 の四角配列, ピッチ18.6mm)

電気出力 3kW/本

最大使用電圧 200VAC

設計耐外圧 60kg/cm²g.

最大熱流束 $1.26 \times 10^6 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

有効長 590mm

材質 SUS316

給水タンクは内径567mmφで高さ830mmの鋼製オープンドラムからできており、ボイラ用給水ラインから受水するようになっている。ECC 水注入ポンプか

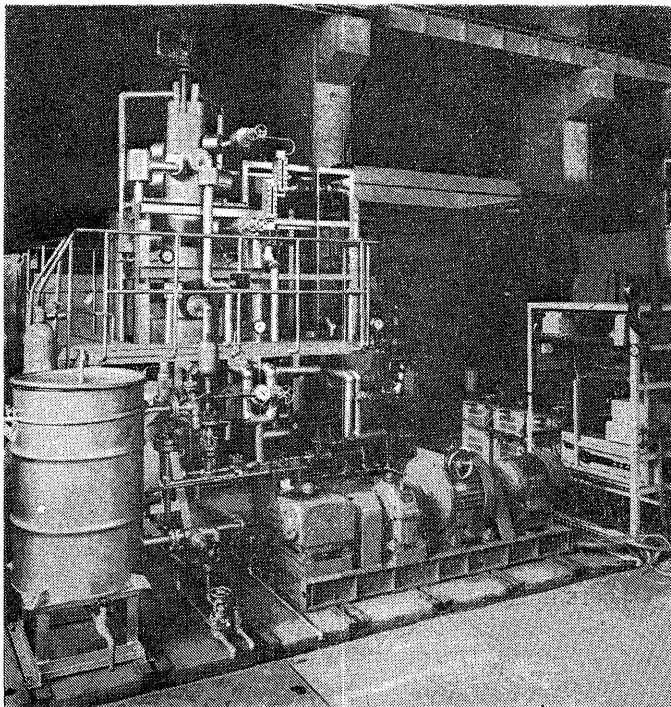


写真2-1 装置全体写真

ら余剰の冷水を戻すためのバイパスラインも設けられている。

写真 2-1 は装置全体を示しており、正面左から給水タンク、ECC 水注入ポンプと計器盤が、奥に压力容器を含む装置本体が見える。

2.2 計装

計装は図 2-1 に示すように、注水系圧力 (P1) と压力容器内圧力 (P2~P4) の 4 点の圧力測定、压力容器内差圧 (DP) の測定、压力容器内の温度分布 (T1

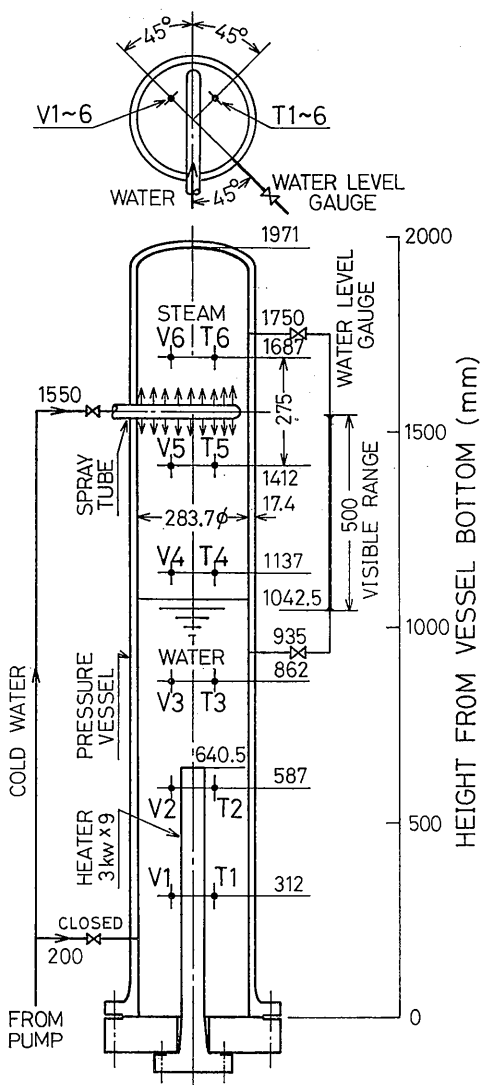


図2-2 压力容器 主要寸法と熱電対・ボイド計 取付位置

~T6) と注水温度 (T7) の測定、触針式ボイド計による压力容器内のボイド率分布 (V1~V6) の測定、タービンメータによる注水流量 (G) の測定およびヒーターへの電力 (W) の測定を行った。

これらの内、実験条件の設定のために P2, DP と T7 を利用した。実験データとして、P3(または P4), DP, T1~T6 および V1~V6 を、必要な場合は直流増巾器を通して、電磁オシログラフで記録するとともに、アナログ量として磁気テープへの記録を行った。なお、压力容器内の流体加熱期間中は、可視水位計(L)と電力計(W)の読み、および中心ヒーター棒の垂直方向 3 カ所の外壁温度を打点式記録計により監視した。

表2-1は測定器のリストを示し、図2-2には压力容器内温度とボイド率分布測定用の熱電対とボイド計の取付位置が示されている。また、計装記録の概念図を図2-3に示す。

2.3 実験条件

ブローダウンを伴わない場合における ECC 水注入時の压力容器内流体の熱水力的挙動に大きな影響を与えるであろうと考えられるものとして、以下の実験パラメータを選んだ。

- (1) 初期圧力は、压力容器内流体の持つ比エンタルピを定めるばかりでなく、注入水温度を室温程度 (10~27°C) としたので、注入水の蒸気凝縮能力を変える働きもある。(注入水温度を T_L 、压力容器圧力に対する飽和温度を T_s 、注入水の比熱を c_p 、凝縮の潜熱を L とすると、注入水 1 kg 当りの蒸気凝縮量は $(T_s - T_L)c_p/L$ で表わされる。)
- (2) 初期水位は、蒸気と飽和水の容積比や容器内流体の総エンタルピを定める。また、ECC 水が蒸気と接触する時間とも密接に係っている。
- (3) 注水速度は、压力容器内の熱平衡の程度に強く

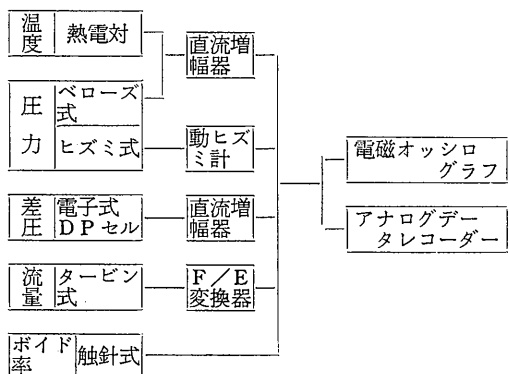


図2-3 計装記録概念図

影響するものと考えられる。

(4) 注水時間は、総注水量の影響を調べるために都合がよいが、注水時間を必要以上に長くすると、水位が注水ノズルの高さを越え、圧縮過程に入り圧力上昇を招くので注意が必要である。

(5) 注水ノズル径もまた(3)と同様、系の熱平衡への影響が目される。

以上の他に、ECC水温度も気になるところであるが、実炉でも特にコントロールしておらず、また本装置ではそれを変化させることができないので、室温の水を使用した。しかし、(1)項で述べたように初期圧力の違い、すなわち蒸気温度と水温との温度差を変える

ことにより間接的にこの影響が含まれるようにした。

なお、注水ノズルの高さは、実炉の注水条件に近い Upper-Head Injection となる上部蒸気部への注水のみとした。

上述の5種類のパラメータをそれぞれ1回変化させるだけでも、その全組み合わせは $2^5=32$ にも達する。そこで、基準条件(実験4)を定め、それを中心に重要なパラメータほど詳しく調べる方法を採用した。実際に行った11の実験における各実験パラメータの組み合わせを表2-2で示す。初期圧力・水位と注水時間がある一定値の回りに分布(例えば、初期圧力として、 $30\text{kg/cm}^2\text{g}$ 。付近の値が6個ある)しているのは、実験法上

表2-1 測定器リスト

記号	測定量	検出変換器	検出変換器仕様
T1~T6	压力容器内流体温度	シース型熱電対	クロメル・アルメル非接地型, シース外径1.6φ, 素線0.32mm
T7	ECC水温度		
P1	ECC水注入圧力	ベローズ式	レンジ 0~100kg/cm ² g.
P2	压力容器内圧力	変換器	出力 4~20mADC
P3~P4		ヒズミ式	レンジ 0~100kg/cm ² g.
DP	压力容器内差圧(水位)	電子式 DP セル	レンジ 0~1500mmHgO 出力 4~20mADC
V1~V6	压力容器内ボイド率		触針式(参考文献2参照)
G	ECC水注入流量	タービンメータ	レンジ 0~80kg/min.
W	ヒーター出力	電圧計・電力計	(読み取り)
L	压力容器内水位	可視水位計	

表2-2 実験条件一覧

実験番号	压力容器内初期条件			注水条件			注水ノズル	
	圧力 kg/cm ² g.	水位 m	蒸気容積 m ³	流量 kg/s	時間 s	温度 °C	径 mm	個数
1	9.5	1.30	(0.042)**	0.53	49.0	13	25	1
2	30.2	1.36	(0.039)	0.53	26.5	11	25	1
3	23.6*	0.94	(0.065)	0.53	22.5	11	25	1
4	30.8	1.07	(0.057)	0.53	22.6	12	4.1	36
5	10.7	1.34	(0.040)	0.53	29.2	11	4.1	36
6	29.3	1.08	(0.056)	0.92	11.8	10	4.1	36
7	29.2	1.34	(0.040)	0.92	9.3	11	4.1	36
8	30.1	1.04	(0.059)	0.53	25.8	13	2.0	160
9	29.5	1.34	(0.040)	0.92	9.8	10	2.0	160
10	48.7	1.43	(0.034)	0.92	12.7	27	2.0	160
11	47.8	0.73	(0.079)	0.53	36.0	26	2.0	160

* 約30kg/cm²g. からブローした後、冷水注入を行った。 ** 蒸気容積は参考のため記載した。

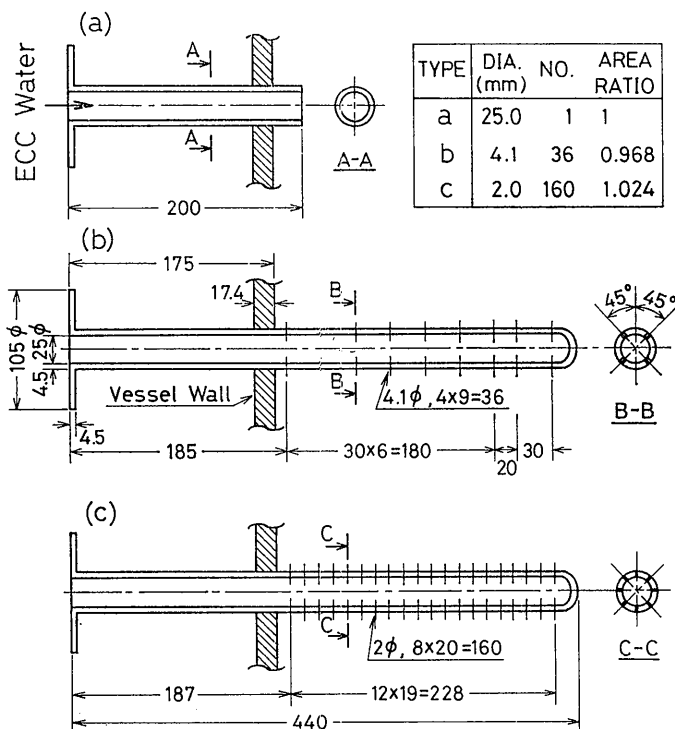


図2-4 注水ノズルの形状・寸法

止むを得なかった(2.4節参照)。

3種の注水ノズルの形状は図2-4に示す通りであるが、ノズル口径と個数の関係は、ノズル総断面積ができるだけ一致するようにし、ECC水注入速度がノズル寸法に余り依存しないよう配慮した。

2.4 実験手順

本実験は、圧力容器内で高温高圧の飽和水をつくり、蒸気部に設けたノズルより冷水を注入することによってブローダウンを伴わない場合のECC水注入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、温度とともに圧力容器内のボイド率の測定を行うことによって、ECC水注入による圧力容器内流体の熱流力的過渡現象を把握しようとするものである。

実験は以下のような手順で行う。まず、実験条件に従って注水ノズルを取り付け、ボイド計先端の絶縁不良のものがあれば取り替える。装置の準備が終了後、直流増幅器と電磁オシログラフおよびボイド測定器を調整して記録に備える。次にイオン交換樹脂で処理した水を圧力容器内の所定水位よりやや高めまで入れる。圧力容器の上部大気開放弁(図1の最も右側にあ

る弁)を開いて、上部空間を大気へ開放した状態でヒーターに通電して大気圧下で加熱し、電力計や打点式記録計により圧力容器内の温度を監視しつつ、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うとともに容器下端から排水して水位の最終調整を行った後、大気開放弁を閉じ加圧を開始する。加圧期間中に、注水タンクへ上述の処理水を入れ、空気作動弁用のコンプレッサーの運転を開始する。所定の圧力に達すると、ヒーター電力を10kW程度に落とし、容器内の温度分布をさらに均一化させる。注水用プランジャーポンプの運転を始めると、給水タンクの水は77kg/cm²g.に設定してある逃し弁SV2を通してタンク内へ戻る循環を行う。この状態で注水流量が所定の値となるようポンプ速度をバイエル無段変速機で調整する。そしてヒーター電源をシャ断する。

ここで、初期水位と圧力を確認し、注水温度を測定しておく。記録計を作動させてから、空気作動弁を開くとECC水を模擬した冷水の注入が始まる。所定の注水時間(10~50秒)がくると空気作動弁を閉じる。すると冷水は再びSV2を通りタンクへ戻る。タービンメ

ーターによる注水流量が零になっているのを確認し、注水ポンプを停止させる。データの記録は、压力容器内の水中にボイドが発生しなくなるまで続ける（1分程度）。注水終了後の水位を調べ、実験は終了する。

2.5 実験データの整理

(1) 圧力・温度特性の整理

記録紙上に压力容器内圧力P2～P4および注水圧力P1の時間的変化が得られた。これからの変化のゆるやかなところは1秒ごとに、変化の激しいところは0.1～0.2秒ごとに圧力値を読み取りグラフとして整理した。なお、ベローズ式のP2とヒズミ式のP3はほとんど同じ値を与え、またP4やP1はP2あるいはP3と比較してそれぞれ水位による差圧とECC水注入による流動抵抗程度の差が見られたが、おおむね一致している。従って本報告ではP3の結果のみを示した。

压力容器内壁面より67mm離れた熱電対T1～T6の変化から、容器内流体の垂直温度分布を求めることができる。注水流量が大きいとき(0.92kg/s)は、大きな温度差が見られるとともに時間的変化も激しい場合が多く、記録紙から値を詳しく読み取り全てを本報告に示した。しかし、注水流量が小さいとき(0.53kg/s)は、余り大きな温度差が見られないので、T1～T6の内代表的な温度記録のみを示した場合もある。

(2) 注水流量と注水総量

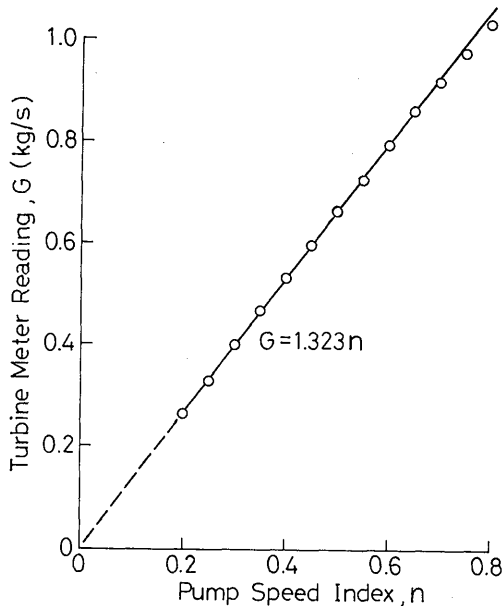


図2-5 ポンプ速度と流量の検定

図2-5に、精度±0.5%のタービンメータ指示値Gと注水プランジャーポンプの変速機バイエル目盛nとの間の検定値を示す。n≤0.7では非常に線形性が良く、 $G=1.323n$ の関係がある。そこで、実験データとしての注水流量は、タービンメータの指示値の代わりに予め設定しておいたnから上式によりGを求める方法を採用した。

図2-6は、注入開始と終了時点での記録紙上に現れ

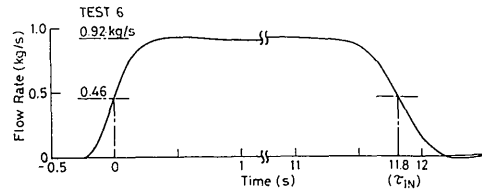


図2-6 タービンメータによる注水流量の記録例

たタービンメータによる指示値の例(実験6)を示している。注入開始と終了の過渡変化は、注水系の慣性によるもので、いずれも0.5秒前後を要している。注入開始直後と終了直前の流量に僅かの差が見られるのは、冷水注入とともに減少する压力容器内圧力がポンプ特性に若干影響を与えるためであるが、流量そのものは上述の関係式から求められる値に非常に近い。注水時間 τ_{IN} は、図に示すように流量が設定値の半分を示す間の時間とする。従って、注水総量はほぼ $1.323n\tau_{IN}$ から計算される。

(3) ボイド率の整理

本実験のボイド率測定に用いた触針式ボイド計は、ボイド計の先端に蒸気が来るか、水が来るかを電気抵抗の変化として記録しようとするものであって、3Vの直流電圧をセンサー先端の針とスリーブ間1mmに加えておいて抵抗の変化に伴って変動する電流を測定するものである。図2-7は、压力容器内壁面より65mmに設けられたV1～V6のボイド計の電磁オシログラフ上の記録例として実験6の冷水注入開始直後の電流値を示している。この例では初期水位がV3とV4の間にあるため、初めV1～V3は水を、V4～V6は蒸気を示している。冷水注入開始後0.7秒前後から压力容器内の水中上部V3より蒸気泡が発生し、順次下方のV2、V1からも蒸気泡が発生することが示されている。この蒸気泡の発生と注入水(1kg/sは15.8cm/sの上昇をもたらす)により水位は上昇し、V4、V5が順次水を検知するようになる。図2-7の場合、V6の高さまで水位が到達しなかったため、V6は常に蒸気を

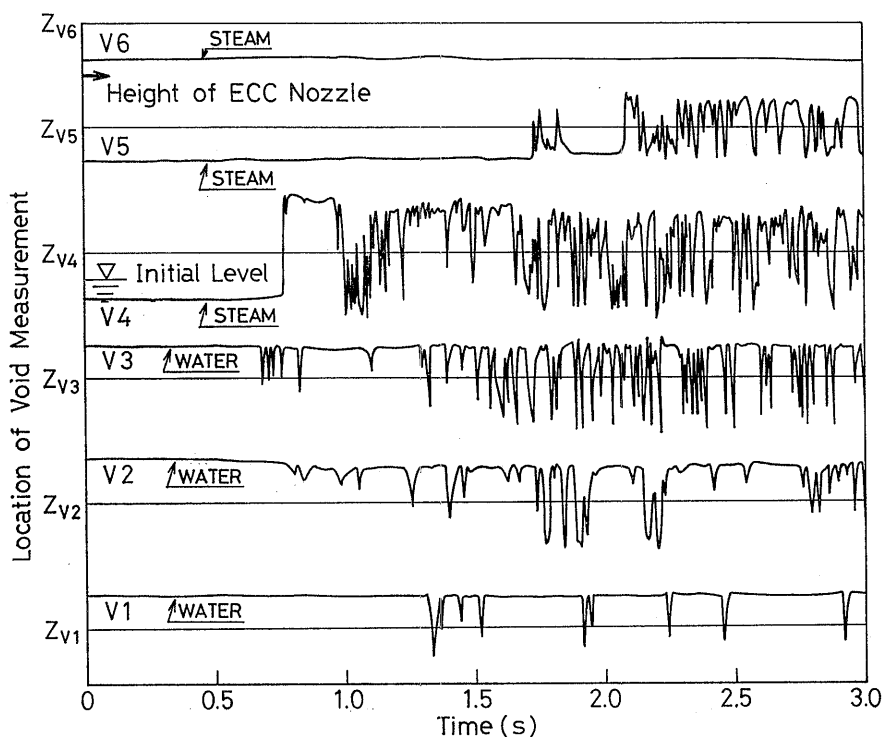


図2-7 冷水注入開始直後のボイド計記録例 (実験6)

示す値になっている。

触針式ボイド計の測定原理から、電流値の振巾は余り意味がなく、ボイド計先端が蒸気または水に接している時間が重要であって、記録紙上の水と蒸気を示す電流値の平均値 (図2-7ではボイド計センサー位置を示す高さ) によって気液相を区別し、一定の時間内に蒸気が占める時間割合をもってボイド率とした。その際、作業を容易にするため、データレコーダーからの再生を図2-7より時間軸を大幅に引き伸ばした記録を使用した。また、多くのデータをボイド率として整理するため、時間は全て1秒間隔 (例えば、時刻5秒のボイド率は4.5秒から5.5秒までのデータによる) で整理し、グラフとして示すこととした。

3. 実験結果と考察

3.1 注入水の飛程

実験結果の詳解に先だち、ノズルから注入される冷水の蒸気中経路について考察しておくことは有意義であると思われる。压力容器は透明ではないので、注入水を直接観察することはできない。また蒸気密度の大

きいことと凝縮により、注入水の飛行はある程度妨げられ、その経路は蒸気による抵抗のない飛程に比べて複雑となるであろう。しかし、そのような抵抗のない飛程から注入水の飛行経路を大まかに予測することができると考えられるので、以下に各ノズルについて注入水の飛程を調べることにする。

注水ノズル出口での速度を v とし、ノズル出口中心を原点にとり、水平方向を x 、垂直方向を z とすると、注入水の空中経路は次のように表わされる。

水平ノズル

$$z = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v}\right)^2 \quad (3-1)$$

45°方向ノズル

$$z = -g\left(\frac{x}{v}\right)^2 \pm x \quad (\text{正号は上向き}) \quad (3-2)$$

垂直ノズル

$$x=0 \quad (\text{ただし、上向き注水するとき } z_{max} = -\frac{v^2}{2g}) \quad (3-3)$$

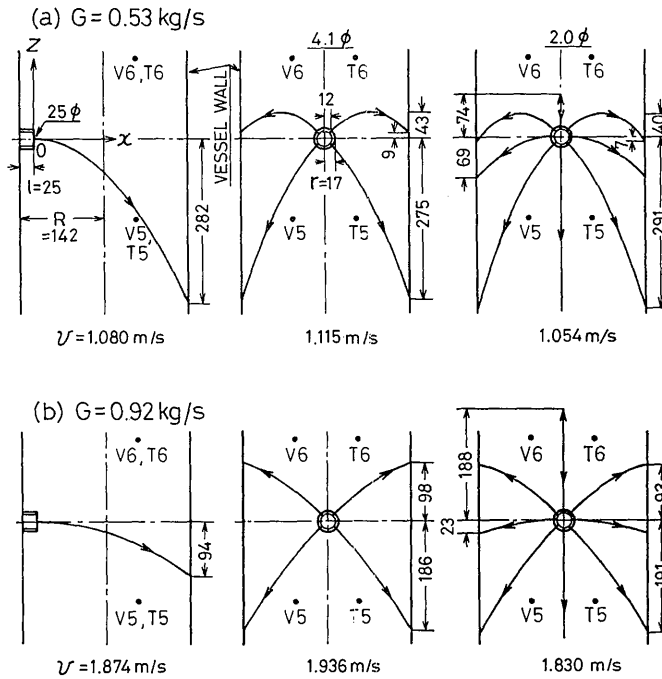


図3-1 注水の压力容器内の飛程（蒸気による抵抗無視）

図3-1は、以上の式を使い、図2-4で示した各ノズルについて、実際の注水流量 $G=0.53\text{kg/s}$ と 0.92kg/s の各々の場合の注水飛程を示している。単一ノズルで $G=0.53\text{kg/s}$ のとき、V5とT5のセンサーが注水の幅に入るように見えるが、V5、T5はともに紙面垂直方向に約54mm離れており（図2-2参照）、注水の直撃は免れる。他の場合はいずれも注水がボイド計や熱電対に触れないが判る。なお、 v の計算に当ってはノズル出口における縮流はないものとした。

ノズル径が4.1mmφと2.0mmφの場合、ノズルが注水管の軸方向に分布しており、図3-1で示される飛程は压力容器中心軸付近のノズルからのものであって、他のノズルからの注水は図で示されるよりも早く容器壁にぶつかる。しかし、飛程は図で示されたものと同様であり、ただ飛行時間が短くなるだけである。そこで、注水が直接蒸気と接触する時間であるこの飛行時間 τ_s を求めることにする。压力容器内半径を R 、注水管外半径を r 、単一ノズルの容器内長さを l 、容器内水面から注水管中心高さを H とし、さらに4.1mmφと2.0mmφのノズルが $2R$ に亙って平均に分布しているという近似を使えば、平均値としての τ_s は H の大小によって図3-1の飛程が途中で水面に

当たるかどうか注意して求めると以下ようになる。

単一ノズルの場合

$$\tau_s = \begin{cases} (2R-l)/v & (H \geq H_2) \\ \sqrt{2H/g} & (H_2 > H > 0) \end{cases} \quad (3-4)$$

ただし、

$$H_2 = \frac{1}{2}g \left(\frac{2R-l}{v} \right)^2$$

4.1mmφノズルの場合

$$\tau_s = \frac{R}{2\sqrt{2}} \left\{ \left(\pi - \frac{2\sqrt{2}r}{R} \right) - \left(\cos^{-1} \frac{x_1}{R} + \cos^{-1} \frac{x_{-1}}{R} \right) \right\} / v + \frac{1}{2\sqrt{2}R} \{ x_1 \sqrt{R^2 - x_1^2} + x_{-1} \sqrt{R^2 - x_{-1}^2} \} / v \quad (3-5)$$

ただし

$$x_1 = \begin{cases} R & (H \geq H_1) \\ \frac{v}{2g} \left\{ -v + \sqrt{v^2 + 4g \left(H - \frac{r}{\sqrt{2}} \right)} \right\} + \frac{r}{\sqrt{2}} & (H_1 > H > 0) \end{cases}$$

$$x_{-1} = \begin{cases} R & (H \geq H_{-1}) \\ \frac{v}{2g} \left\{ v + \sqrt{v^2 + 4g \left(H + \frac{r}{\sqrt{2}} \right)} \right\} + \frac{r}{\sqrt{2}} & (H_{-1} > H > 0) \end{cases}$$

$$H_1 = g \left(\frac{R - r/\sqrt{2}}{v} \right)^2 + R$$

$$H_{-1} = g \left(\frac{R - r/\sqrt{2}}{v} \right)^2 - R$$

2.0mmφノズルの場合

$$\begin{aligned} \tau_s = & \frac{1}{2} \tau_{s0} + \frac{1}{8g} \left\{ \sqrt{v^2 + 2g(H+r)} \right. \\ & \left. + \sqrt{v^2 + 2g(H-r)} \right\} \\ & + \frac{1}{4} \left[\frac{R}{4} \left\{ \left(\pi - 2 \cos^{-1} \frac{x_0}{R} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + 2 \frac{x_0}{R^2} \sqrt{R^2 - x_0^2} \right\} - r \right] / v \end{aligned} \quad (3-6)$$

ただし、 τ_{s0} は式(3-5)から求められる τ_s の値、

$$x_0 = \begin{cases} R & (H \geq H_0) \\ v \sqrt{2H/g} + r & (H_0 > H > 0) \end{cases}$$

$$H_0 = \frac{1}{2} g \left(\frac{R-r}{v} \right)^2$$

図3-2は、式(3-4)～(3-6)から、図3-1と同じ条件における τ_s を求めた結果を、水位が初めて注水ノズルに達するまでの場合について示したものである。注入水の飛行が水面に達するまでは、ノズル径 25mmφと 4.1 mmφの τ_s は一定であるが、2.0 mmφの τ_s は垂直方向の注水が含まれているため常に水位の影響を受ける。

ECC 水注入による 圧力容器内流体の 熱水力的 応答を 決定づける 要因の一つは 注入水と 蒸気との 間の 熱交換量である。この 熱交換量は、図3-2の 平均飛行時間 τ_s に 蒸気中の 注入水総表面積を 乗じたものには ほぼ 比例する であろうと 考えられるが、注入水の 界面形状が 不明であるため、その 総面積の 推定は 現段階では 困難である。さらに、容器内壁に 衝突した後の 水が 容器壁面を 伝って 流れ落ちる間にも、蒸気ばかりでなく 容器壁とも 熱交換が行われるなど 複雑な現象も 係っている。そこで、注入水と 蒸気間の 熱交換については、実験データと 解析結果を 比較する際に 考察することとし、ここでは、 τ_s の値が ノズル形状や 注水流量によって どの程度の影響を受けるかを あらかじめ 調べておく。

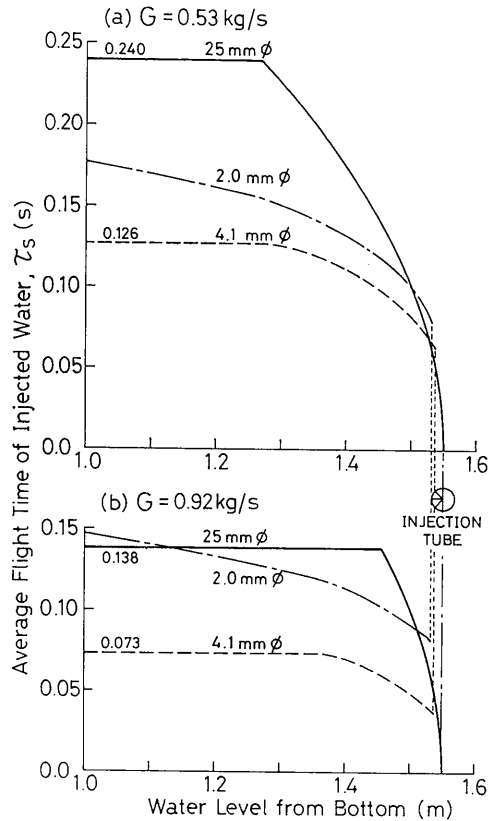


図3-2 注入水の蒸気中飛行時間

3.2 実験結果

図3-3から図3-13(d)に全実験について、実験番号順に冷水注入による圧力、温度およびボイド率の時間的変化をデータとして示す。実験1と2は圧力以外の測定は行われず、また、実験4のボイド率はV1とV3のみ測定可能であった。全実験のV6および実験3、11のV5は常に蒸気のみを示したため、図示していない。温度変化については、注水流量が大きく水温に顕著な温度勾配が現れる場合には2枚の図に分けて示し、逆に温度勾配が小さい時には一部を省略して1枚の図で

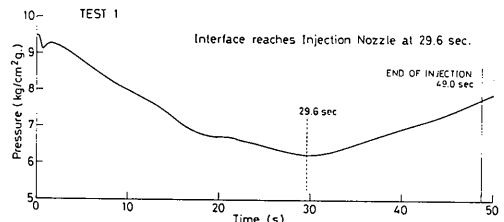


図3-3 実験1の圧力変化

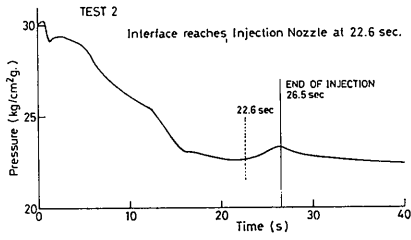


図3-4 実験2の圧力変化

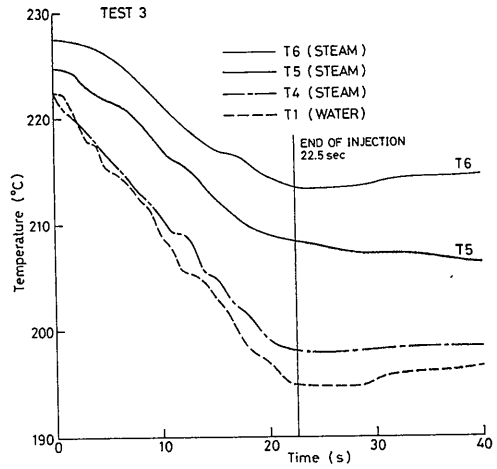


図3-5(d) 実験3の温度変化(その2)

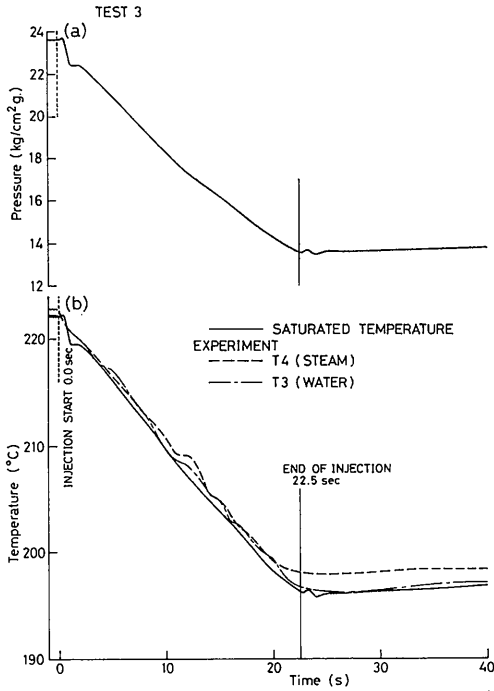


図3-5(a) 実験3の圧力変化

(b) 実験3の水温と飽和温度との比較

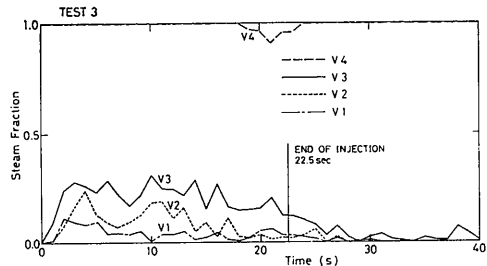


図3-5(e) 実験3のボイド率変化

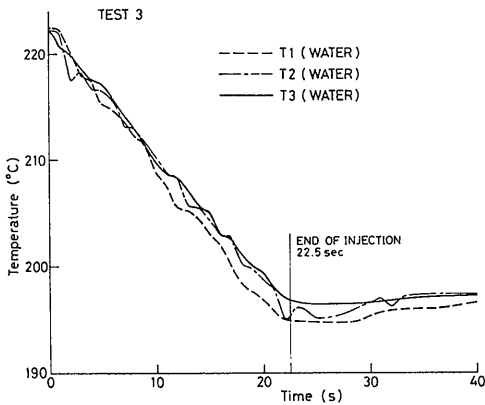


図3-5(c) 実験3の温度変化(その1)

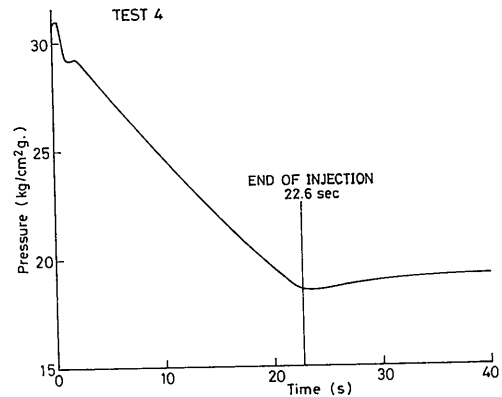


図3-6(a) 実験4の圧力変化

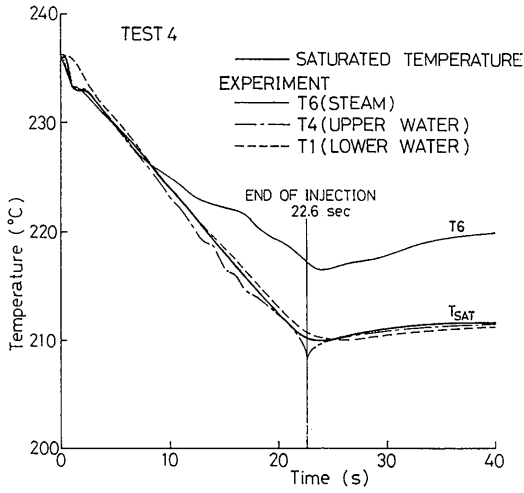


図3-6(b) 実験4の温度変化と飽和温度

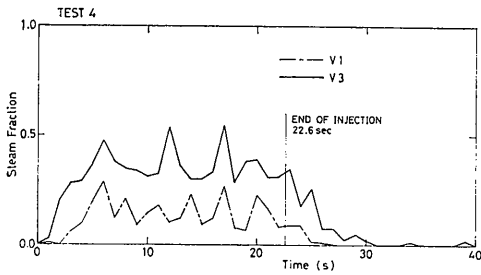


図3-6(c) 実験4のボイド率変化

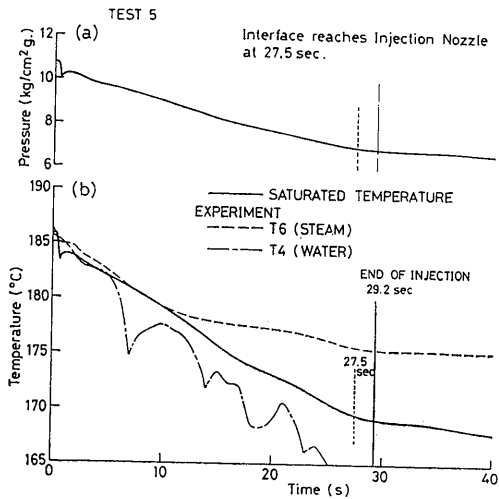


図3-7(a) 実験5の圧力変化

(b) 実験5の水・蒸気温度と飽和温度の比較

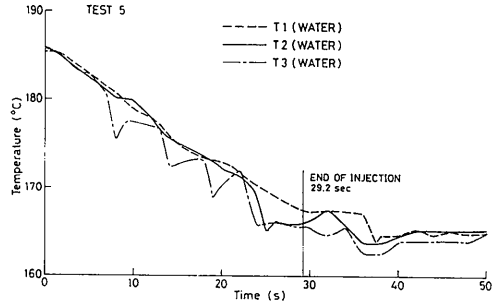


図3-7(c) 実験5の温度変化(その1)

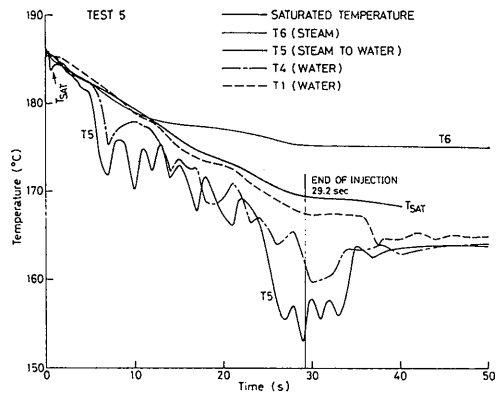


図3-7(d) 実験5の温度変化(その2)

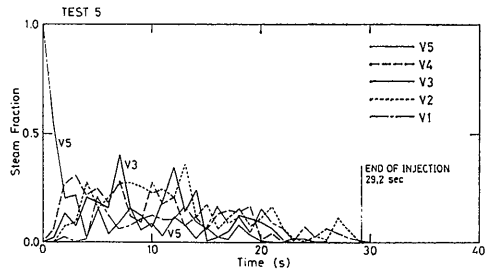


図3-7(e) 実験5のボイド率変化

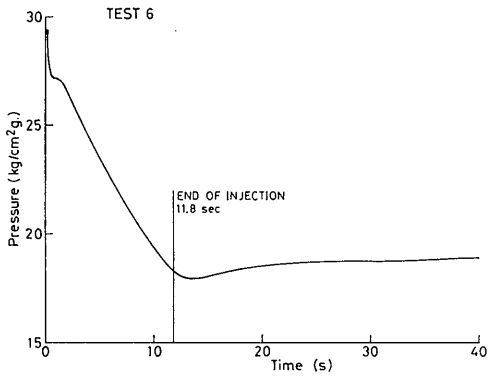


図3-8(a) 実験6の圧力変化

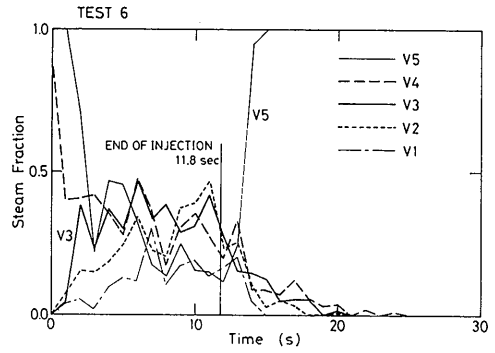


図3-8(d) 実験6のポイド率変化

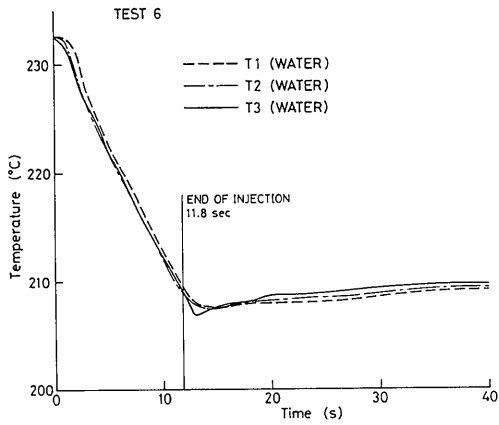


図3-8(b) 実験6の温度変化(その1)

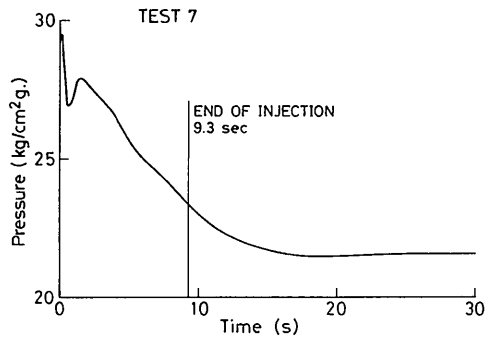


図3-9(a) 実験7の圧力変化

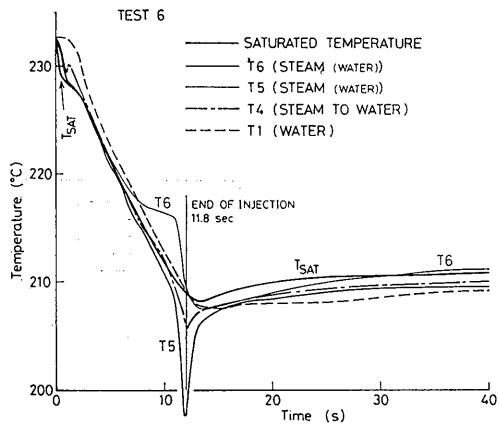


図3-8(c) 実験6の温度変化(その2)と飽和温度

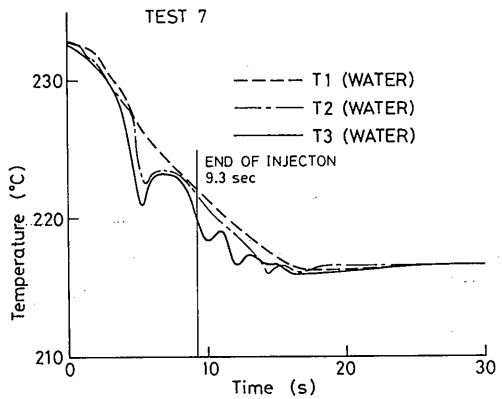


図3-9(b) 実験7の温度変化(その1)

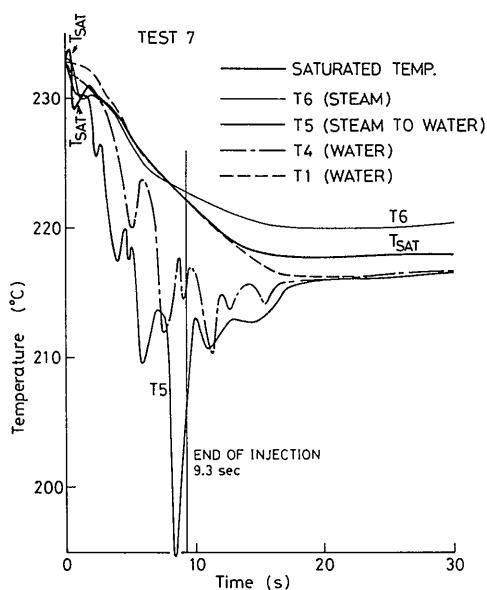


図3-9(c) 実験7の温度変化(その2)と飽和温度

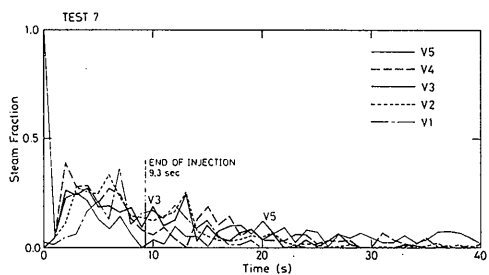


図3-9(d) 実験7のボイド率変化

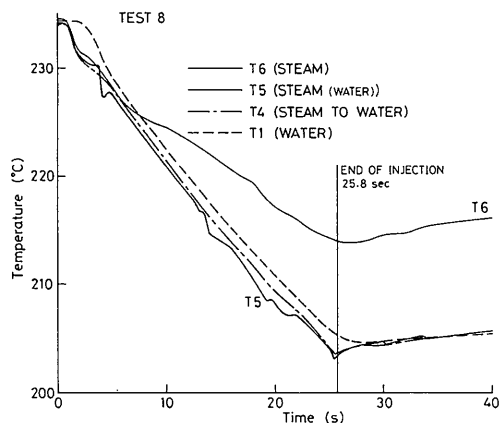


図3-10(b) 実験8の温度変化

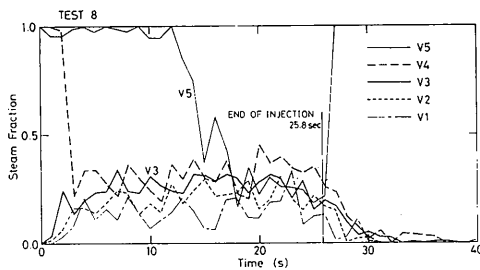


図3-10(c) 実験8のボイド率変化

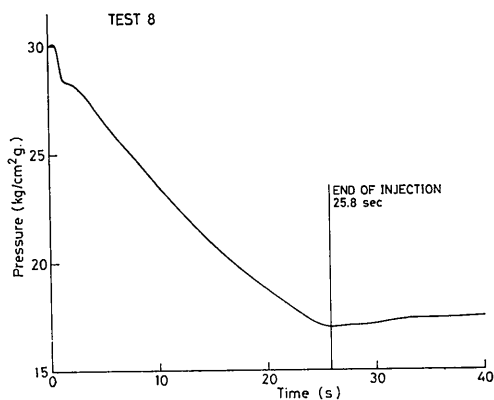


図3-10(a) 実験8の圧力変化

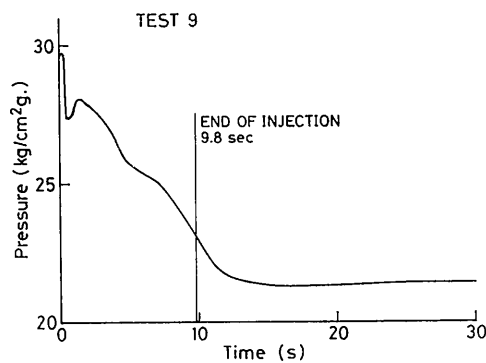


図3-11(a) 実験9の圧力変化

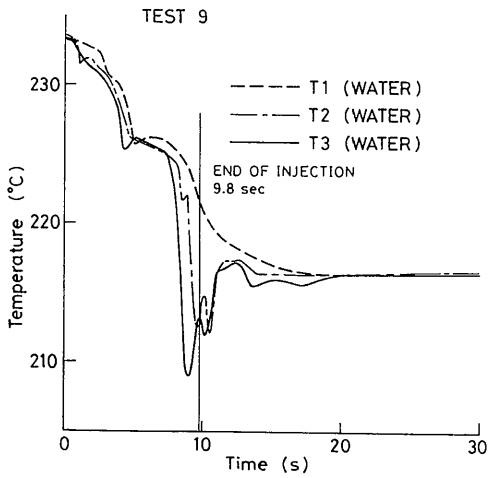


図3-11(b) 実験9の温度変化(その1)

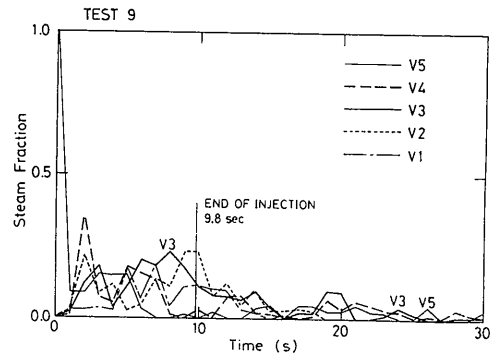


図3-11(d) 実験9のボイド率変化

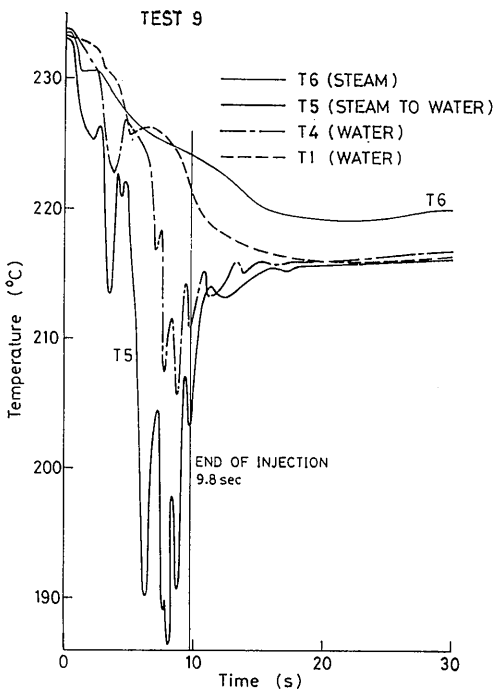


図3-11(c) 実験9の温度変化(その2)

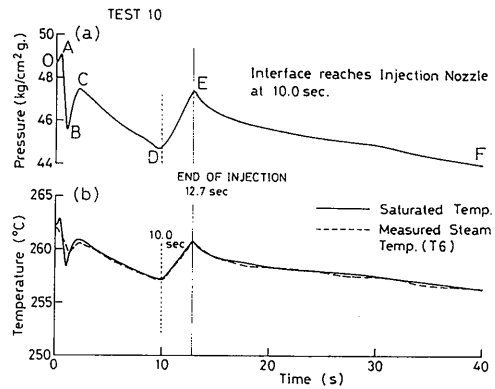


図3-12(a) 実験10の圧力変化

(b) 実験10の蒸気温度と飽和温度との比較

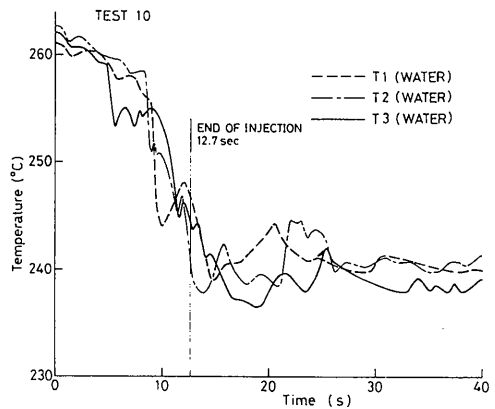


図3-12(c) 実験10の温度変化(その1)

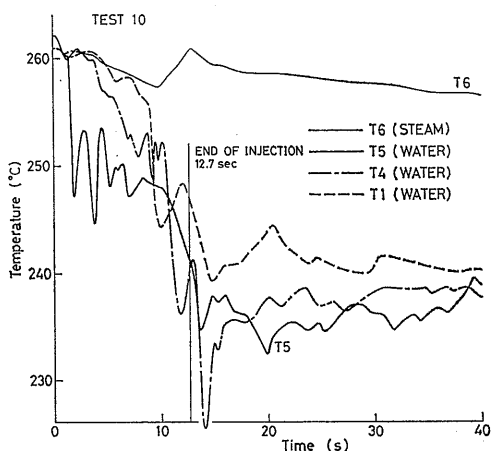


図3-12(d) 実験10の温度変化 (その2)

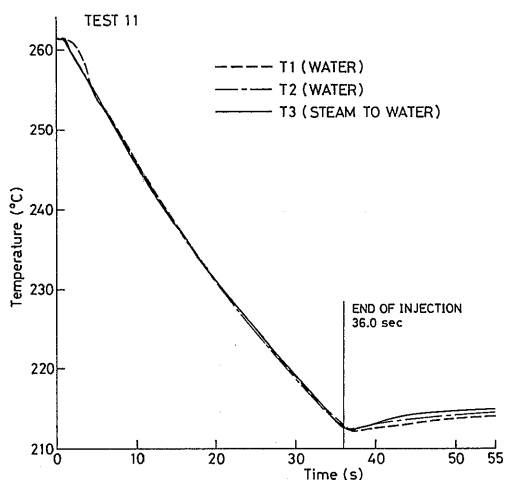


図3-13(b) 実験11の温度変化 (その1)

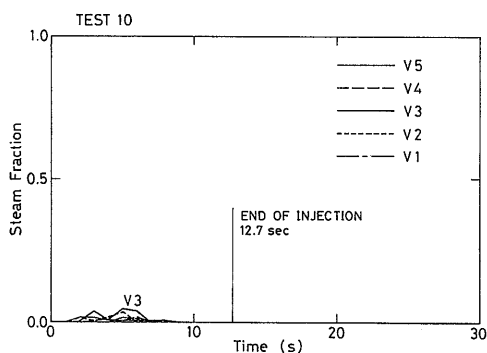


図3-12(e) 実験10のボイド率変化

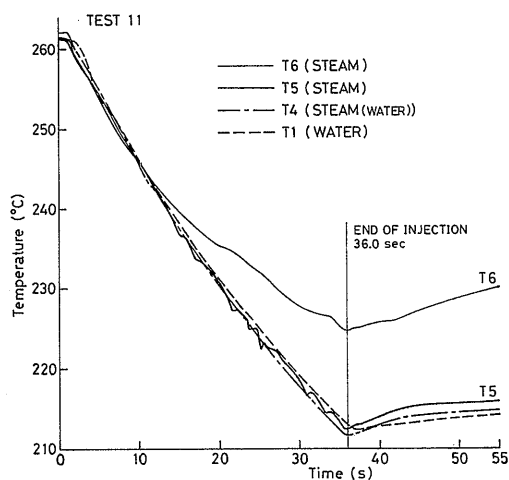


図3-13(c) 実験11の温度変化 (その2)

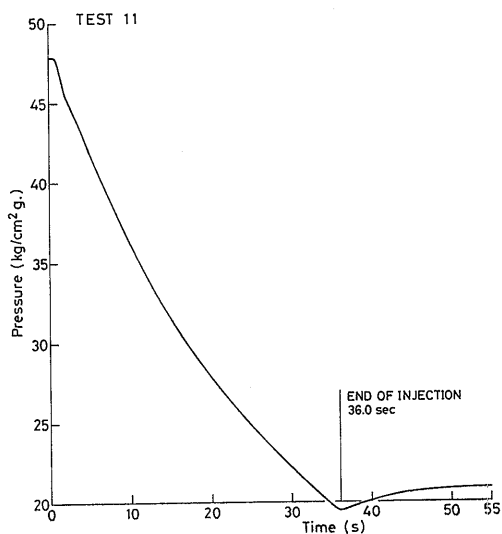


図3-13(a) 実験11の圧力変化

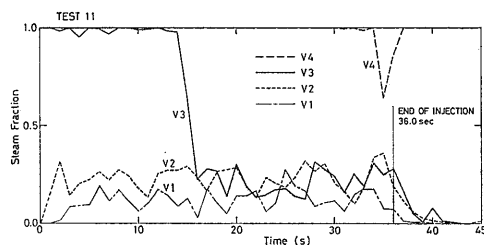


図3-13(d) 実験11のボイド率変化

示した。

注水終了前後の過渡変化の違いを見易くするため、各図にはその終了時刻が記されている。初期水位が高く、注水の途中で水位が注水ノズルに達する場合には注水総量から求めた到達時刻を示してある（実験1, 2, 5および10）。

ECC水を模擬した冷水注入とともに、压力容器内の水位は注入水自身と水中に発生する蒸気泡のため上昇する。初期状態で蒸気温度を示している熱電対でも途中から水温を示す場合がある。そこで、温度変化を示す各熱電対には、同じ高さにあるボイド率変化や温度変化の特徴から推定して、どの温度が測られているのかを示した。この内、図中にある STEAM TO WATER は注水終了後も水温を示すようになったことを、また STEAM (WATER) は途中で1時的に水温を示すことを表わしている。なお、温度変化が熱平衡状態とどの程度一致しているかを調べるため、各時刻の圧力値に対応する飽和温度を記入した図もある（実験3～7, 10）

温度T6の初期状態は、ほとんどの場合、水温と一致した飽和温度を示している。しかし、実験3では、注水に先立ち压力容器下方より排水したため、注水開始時点で上方の蒸気ほど過熱状態となっていた。そのためT6, T5とも飽和温度に近い水温に比べかなり過熱されたまま推移している。実験6では、注水終了直前にT6の高さまで水位が上昇したため、多少過熱気味の温度から急激に水温並みの温度に下がっている。実験10を除く他の実験では、T6はいずれも初めの飽和温度から過熱温度を示すようになっている。これは、蒸気部分の混合が不十分なため高温蒸気が上方に溜る傾向があるためであるが、压力容器構造材から蒸気への伝熱も影響しているであろう。

一方、水温は注水流量が0.53kg/sの時は比較的一様で飽和温度に近いが、流量が0.92kg/sになると、注水時間の経過とともに垂直方向の水温に勾配が現れる。このとき、飽和水中をサブクール水が下降する関係上、上方ほどサブクール度が大きくなるという特徴がある。最下端のT1は飽和温度に近い値を示していることが多い。

このように、蒸気は過熱状態に、水はサブクール状態となり得るのは、過冷蒸気や過熱水が安定して存在しにくいからである。

3.3 現象の推移シーケンス

圧力の過渡変化は、前節のデータを見れば、いずれ

の場合も全体としては注水とともに降下を続けるが、個々の実験によってかなり異なった様相を呈している。特に実験10の圧力は降下と上昇が幾度かあり、複雑な変化を示している。これは、初期水位が高く注水流量が大きいため、本実験で見られた全ての現象が実験10に含まれている結果である。これに比べて他の多くの実験では、もっと単純で似かよった圧力変化を示している。そこで、比較的緩やかな変化を基に、本装置で生じた基本的な現象を調べ、実験10で現れるより複雑な現象について考察を行うこととする。

図3-14は注水流量の少ない実験4のデータから压力容器内の温度分布の変化を、特に注水開始直後の速い変化を誇張して模式風に再現したものである。初期水位はT3とT4の間にあり、注水終了後の水位はT4とT5の間にくるが、注水後半では蒸気泡の発生（図3-6(c)参照）のためT5も1時的に水面下にあったと考えられる。過渡変化は幾つかの過程（phase）に分割でき、図中にI, II等の記号で示した。

蒸気温度T4～T6はphase IVまでは同一に変化するが、それ以降は水位がT5を起えるため、T6のみが蒸気温度を示し、前節で述べた理由により次第に過熱され水温より高温となる。Phase IVまでの蒸気温度は、図3-6(a)で見られる注水開始前後の小さい圧力上昇とそれに続く急激な圧力降下と圧力回復に対応した変化をする。水温T1～T3は、飽和状態の水が注水開始に伴う圧力降下により減圧沸騰を行うため下り始める。しかし、その降下時期は上方の水ほど早く、T1が最後に下がり始める。これは、急激な減圧沸騰に見られる熱的非平衡現象⁽¹⁶⁾の一つで、蒸気泡の発生が圧力降下よりも遅くなるためである。従って、短い期間ではあるが、過熱水状態の水が存在することになる。この温度降下時期のズレもphase Vまでには解消される。

Phase VIに入ると上方の水がサブクール化され、再び上方ほど低温という分布となる。これは、注入された水の蒸気層内での昇温が不十分で、サブクールが残されたまま水面に達するために生ずる。従って、注水流量の少ない実験4ではこの理由による上下の温度差T5-T1はごく僅かであるのに対し、注水流量の多い実験7などでは非常に大きな温度差が現れる。この現象は、容器内の水温が一様でないという意味において熱的に非平衡な現象の一つであるが、前述のphase II, IIIに見られる局所的にも安定でない過熱水の出現

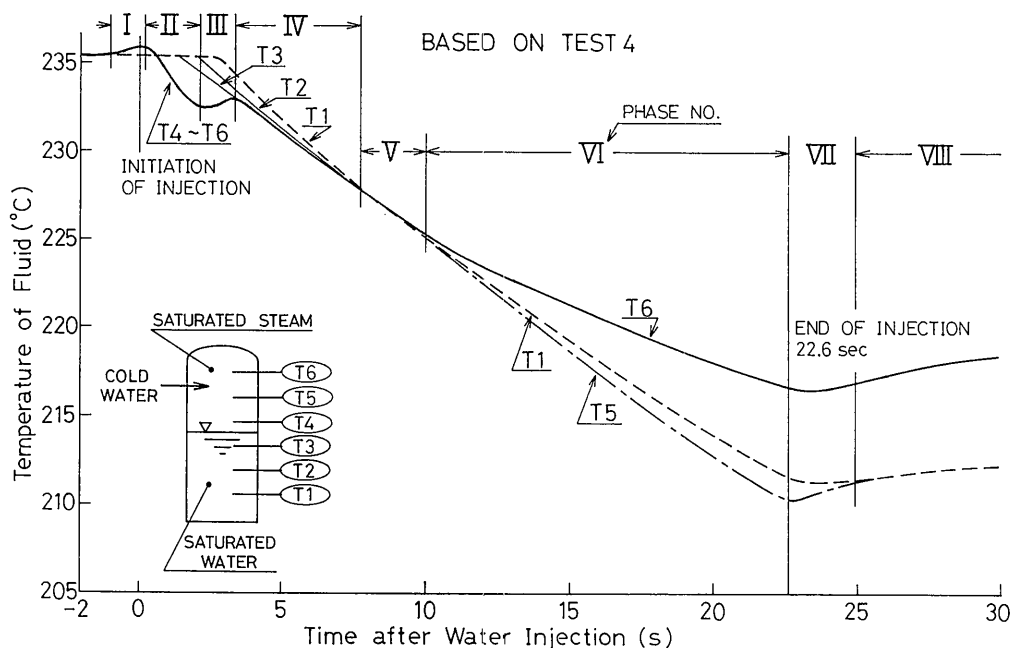


図3-14 現象に基づく過渡変化の分割

といった非平衡現象とは大いに異なる。

注水終了後は、蒸気温度、水温とも容器構造材からの伝熱により多少上昇する。注水流量の多い実験7などでは、phase VI で蓄積された不安定な水温分布が一様温度へ収束する期間 phase VII が長くなる。

図3-15は、図3-14の各 phase 中の現象を説明するために描いたものである。各 phase の持続時間や現象の程度は実験条件に依存する場合が多く、特に水温分布やボイド率分布は実験ごとにかなり異なったものとなる。しかし、本質的には大きな差異はなく、実験4を標準として考え、各 phase で起っている現象を整理する次のようになる。

(I) 飽和水注入による加圧過程

冷水注入開始前後の約0.5秒間は圧力容器内圧力が若干上昇する。これは、注入された冷水への蒸気凝縮効果が現れる前の段階で、高圧水を注入したことによる容器内圧の上昇効果を示すものである。冷水を注入しても凝縮効果が生じない理由として、

- (i) 注水管内およびその近傍の冷水注入系配管内の水が、実験前の流体加熱期間中に暖められ、飽和温度近くになっており、これを注入している間は蒸気の凝縮効果が小さいこと。
- (ii) 凝縮が有効に行れるのに時間遅れが存在する

こと。

などが考えられる。(ii)の時間遅れはmsのオーダーとごく短い時間であるので、この圧力上昇は主として(i)によるものであろう。

圧力上昇の程度は、初期水位と圧力が高い程、また注水流量が多い程大きくなっている(図3-18(a)~(d)参照)が、この現象が上述(i)の飽和水による圧縮効果に依るものと考えればこの傾向は容易に理解できる。

なお、時刻零以前から圧縮効果が現れているのは、注水流量が所定の半分に達する時刻を注水開始時刻としたためである(図2-6参照)。

(II) 蒸気凝縮による減圧過程

続いて冷水が蒸気空間部へ散水され(図3-1参照)、蒸気凝縮が盛んになるとともに急激な減圧が生ずる。その際、蒸気部の各温度は圧力に対応した飽和温度を示す。一方、水中の温度はしばらくの間元のままの値を保つが、上方の温度T3は、

- (i) 蒸気泡の発生と成長

- (ii) サブクール度の残った注入水が混入する。

の二つの効果または二つの内のいずれかの効果によって低下を始める。Phase II の持続時間は、本実験の場合、1秒前後であるが、下部の水はこの期間中過熱液の状態になっている。

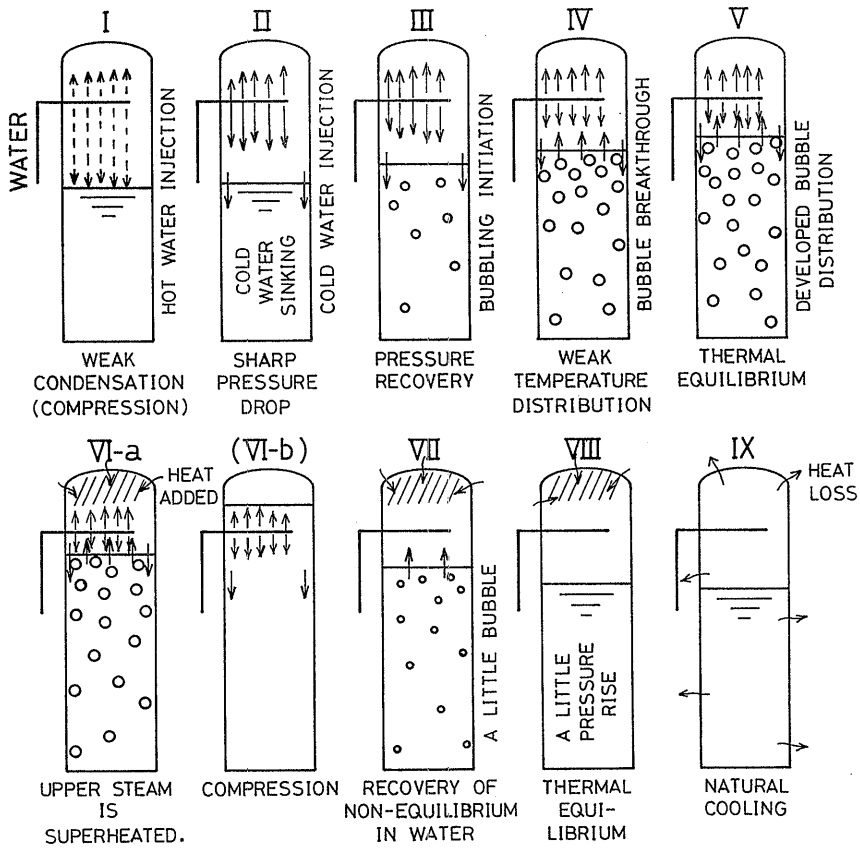


図3-15 各過程における現象の概念図

(Ⅲ) 減圧沸騰に伴う圧力の回復過程

前段階で生じた急激な減圧に伴い水中より蒸気泡が発生し、

(i) 水面を押し上げる。

(ii) 蒸気泡が水面を抜け、蒸気空間に達する。

の二つの作用により圧力はほぼ熱平衡値まで回復する。蒸気部空間の温度（飽和温度）も圧力に伴い回復する。

水中の温度は、蒸気泡の発生とともに T_2 、 T_1 と下方のものまで、急な降下を始めるが、この段階では、下部ほど高く、また飽和温度を少し越えている。

Phase II, III を通じ、圧力および蒸気温度はいわゆるアンダーシュートを示すことになる。このアンダーシュートへの実験条件の影響については3.5.2項で詳しく調べることにする。

(Ⅳ) 熱平衡状態への遷移過程

水中で発生した蒸気泡が水面を抜けることにより蒸

気も供給される一方で、注入水への蒸気凝縮により圧力は次第に降下する。これに伴い、蒸気部温度は飽和温度を保ちながら降下する。水中の温度は、下部ほど高温で過熱状態になっていたが、気泡の成長とともに次第に飽和温度に近づく。

(Ⅴ) 平衡飽和過程

Phase IV と同類の現象だが、容器内流体が全て均一の飽和状態となる。温度は全て均一で、次第に圧力・温度が降下する。

気泡発生の始る phase II から phase V までのボイド率の垂直分布は、上方ほど大きくなっており（各実験のデータ図参照）、分布を直線で近似する気泡勾配モデルに近い分布を示している。これは、ブローダウン過程におけるボイド率分布⁽⁴⁾とよく類似しているが、水温変化とその分布が本実験と同様であるためであろう。ただ、例えば実験7のように注水流量が大きい場合には、phase IV, V は現れないか、現れても

ごく短期間であって、phase III からいきなり phase VIへ移る。

(VI-a) 蒸気部の過熱と水部のサブクール過程

蒸気部では上方ほど過熱されるようになる(実験10のみ例外)。この理由として、

- (i) 注入水が直接届かず、熱い蒸気が上に溜る。
- (ii) 容器壁からの伝熱の影響。

が考えられる。

水中の温度分布は、実験4のように注水流量の少いときにはほぼ飽和状態で均一であり、注入水に残されたサブクールによる水温のサブクール化の程度は僅かである。従って、ボイド率分布はこれまでと同様に上方ほど高くなっている(図3-6(e)参照)が、上方には僅かながらサブクールが存在するため一部凝縮し、一般にはブローダウン時ほどその傾向は鮮明ではない。

一方、注水流量の多い場合には、この水温のサブクール度は次第に蓄積され(例えば、図3-9(e))、本実験では最大40°Cに達した(実験9, 10)。本装置より実炉に近い形状による実験⁽¹³⁾では、炉心内の構造物による冷水の混合阻害のため、水温サブクールが80°Cを越えた場合があると報告されている。本装置の値はこれよりも小さいが、压力容器内の構造物のほとんどない形状においても、注水流量によっては40°Cのサブクールが現れたことは、今後、压力容器内へ注入された冷水の混合過程を考える上で重要な数値になるものと思われる。

減圧沸騰により水中に生じた蒸気泡は、上方のサブクール水に触れると消滅するので、水温に大きな温度差の生じている期間のボイド率分布は、気泡発生初期とは逆に上方ほど少なくなってくる(例えば、図3-11(d)参照)。そして、初期水位が特に高い実験10に至っては、注入水と蒸気間の熱交換が最も不十分なためサブクールが最大となり、ボイド率の大きさが極端に小さくなってしまう。

Phase VI-aの期間は、水面が注水管に達するまで続くので、初期水位が低いほど、また注水流量が少いほど長く続く。

なお、ブローダウン過程では、減圧沸騰のみの現象で、冷水注入時に現れる上述のようなサブクール水は生じない。この点が本実験とブローダウン実験とで最も異なるところである。

(VI-b) 水面上昇による加圧過程

実験1, 2, 5, 10では、水面が注水管に達した後もしばらく注水を続けたため、注入水が直接蒸気と接

触できず凝縮が非常に少くなる加圧過程が現れる。実験5の加圧過程は、注水終了間際で起こり、はっきりした圧力上昇は認められないものの、ボイド率V3~V5は注水終了前に零となっている。実験10では、phase VI-aまでのボイド率が非常に少く、蒸気泡によるクッション性が小さいため、最も顕著な水面上昇による加圧効果を示している(図3-12(a)のDE間)。圧縮加圧過程では、水中のボイド率は完全に消えてしまっている(図3-12(a)と(e)を比較参照)。

(VII) 注水停止後の熱平衡状態への遷移過程

注水流量が少く、phase VI-aの途中で注水停止が行われた場合は、もともと熱平衡に近いので、水部が熱平衡に達する時間は短い。このとき、水中にはまだ気泡が少し残っている(例えば、図3-6(e))。

注水流量が多く、phase IV-aの途中で注水停止が行れると、それまでに蓄積された大きなサブクール度を解消させるのにかなりの時間が必要となる。そして、水温一様となる過程で蒸気凝縮が徐々に続いて圧力は降下する(例えば、図3-9(a))。図3-9(d)が示すように、ボイド率分布は、上方ほど低い状態から次第に逆転し、飽和水中の分布に近づきつつ消滅へと向う。蒸気部温度は、上述の弱い蒸気凝縮とともに降下するが過熱状態となっている(図3-9(e))。

Phase VI-bの加圧過程で注水停止が行れた場合は、図3-12(e), (d)が示すように、熱平衡への過程は非常に長びき、図3-12(a)のFの時点ではまだ平衡に達していない(ここで、図3-12(b)から蒸気部温度は常に飽和温度(熱平衡温度)になっていることに注意)。この期間中、圧力はゆっくりと降下を続ける。また、気泡は水中から姿を消したままである。

(VIII) 注水停止後の熱平衡加圧過程

水部が熱平衡に達し、一様の温度となった後、しばらくは容器構造材からの熱により、熱平衡を保ちつつ圧力・温度は僅かに上昇する(図3-6(a), (b))。このとき、蒸気泡がなお水中に残っている場合がある(図3-9(d))。

(IX) 自然冷却過程

図3-14やデータ図には示せなかったが、phase VIIIの後に自然冷却過程が存在する。ここでは、容器壁を通して熱が放出され、系全体の圧力・温度は徐々に下がる。本実験では、適当な時期に下部ドレン管を使って排水したが、放置しておいてもやがて室温レベルの温度になる。ただし、この場合、容器の内圧は室温の飽和圧力となるため、かなりの負圧状態に至る。

3.4 蒸気部温度の過熱について

以上、本実験で現れた現象を各 phase ごとにその特徴を説明してきたが、その中で、実験10では特異な熱的挙動が多く見られた。そこで、実験10について特に検討する。

図3-12(a)~(e)を他の実験値(図3-13(a)~(d)等)と比較すると次の様な大きな差異が見られる。

- (i) 圧力の履歴にはっきりとした幾つかの山と谷が現われる(図(a)のO, A~Fは各 phase の区切りを示す)。
- (ii) 蒸気部温度T6が常に飽和温度を示している。
- (iii) ボイド率は過渡変化全体を通して非常に少ない。特に、水面近くのボイド率V5はほとんど零となっている。

以上の特徴の内、(i)についてはこれまでも述べたように、初期水位の高いことと注水流量の多いことにより、前節の全過程が、しかも、水中気泡の少なさによる圧縮性の欠如により、際立って明瞭に現れたものである(ただし、phase VIIIとIXはデータ中に含まれていない)。

(ii)の特徴は、気泡がほとんど発生しないので、3.2節の実験6で説明したように、水中気泡による一時的な水面上昇として説明することはできない。また、注水による水位上昇18.4cm(最大水位1.614m)からも説明できない。従って、図3-12(d)のT6は常に蒸気温度を示していることになる。他の実験ではいずれも注水開始後7~8秒からT6は過熱温度を示すようになるのに対して、実験10の場合は常に飽和温度を示す。この理由として、著者らは次のように考えた。

実験10では、初期水位が特に高く、注水が蒸気部と十分熱交換ができないため、相対的に水部との熱交換が大きくなる。すなわち、蒸気部との熱交換ばかりでなく、水部との熱交換も圧力容器内の圧力降下に大きく寄与することになる。従って、水部での減圧沸騰による気泡の発生は低く抑えられ、水面を抜け出る蒸気がほとんどなくなるという(ii)の特徴が現れる。

これに対し、他の実験では、容器内の圧力降下が主として蒸気部の冷却に起因し、いずれもかなりの蒸気が水面から蒸気部に供給されている。水面を抜け出る瞬間の蒸気温度は飽和温度であるが、系内の圧力降下の続いている状態では、過去に水面を抜け出た蒸気は、減圧速度に比べて降温速度が小さいため、その後の時点では過熱蒸気となる。この過熱蒸気が注水のシャワー(図3-1参照)を潜り抜ける間に温度降下が

生じるが、一部の蒸気は過熱度を持ったまま上方に達するであろう。一方、phase VI-aの説明で述べた「容器壁からの伝熱」による蒸気の過熱化も進んでおり、下方からの高温蒸気と併せて次第に容器頂部から溜ってくる。そして、注水開始後7~8秒で過熱蒸気と飽和蒸気の境界がT6の高さにまで降りてくるのであろう。

ところが、実験10では水面からの蒸気供給がないだけ上部空間の過熱蒸気の溜り方が遅く、図3-12(b)が示すように圧縮加圧過程に入る10秒直前まで全く過熱温度を示していない。その後も圧力変化が続くが、高い圧力レベルで推移し、その圧力に応じた飽和温度を越える過熱蒸気は少くT6にまで達しなかったのであろう。

このように、実験10と比べると、他の実験で見られる蒸気部の過熱化には、水面からの蒸気供給も関与していることが判る。

3.5 実験パラメータによる整理

冷水を高圧飽和蒸気-水系に注入した際の現象は、phase 1からphase IXまで多くの過程に区分できるが、これを大きく、注水初期の熱的非平衡に基づく現象とその後の注入水の混合に起因した系全体の過渡変化の二つに分けて実験パラメータの影響について調べることにする。

3.5.1 過渡変化全般

図3-16(a)~(d)は、系全体の過渡変化全般に及ぼす実験パラメータの影響を調べるため、初期圧力ごとに圧力降下を比較したものである。実験3は30kg/cm²g.のグループに入れ、また、そのグループは数が多いため(a)、(b)の図に分けた。図3-16(a)~(d)で比較するのは主としてphase IV~VIにおける圧力降下の勾配であって、注水総量(流水流量×注水時間)に係わりの深い圧力降下の最大値の比較は行わない。

(1) 注水ノズル寸法の影響

初期圧力・水位と注水流量がほぼ等しく、注水ノズル寸法の異なる組み合わせとして、実験1と5、実験

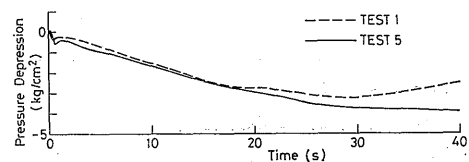


図3-16(a) 圧力降下(初期圧力10kg/cm²g.の場合)

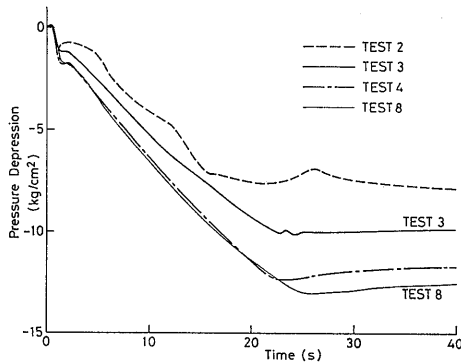


図3-16(b) 圧力降下(初期圧力30 kg/cm²g.の場合, その1)

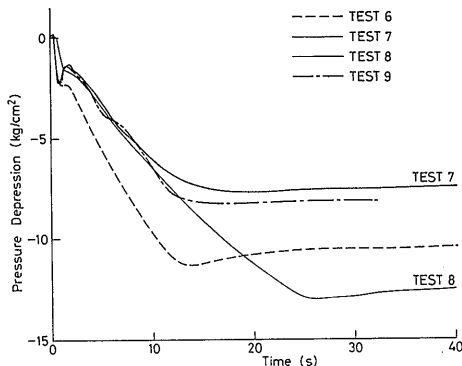


図3-16(c) 圧力降下(初期圧力30 kg/cm²g.の場合, その2)

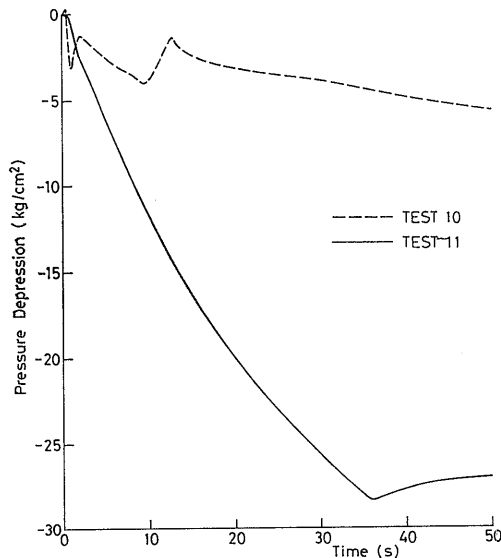


図3-16(d) 圧力降下(初期圧力50 kg/cm²g.の場合)

4と8および実験7と9を比較してみると, phase VI-aまでの圧力降下過程は良く一致している(ただし, 実験1, 5の20秒以降の差は, 実験1の注水時間が長く, 圧縮加圧過程 phase VI-bが現れたことによる)。これから, 過渡変化全般に対する注水ノズル寸法の影響はほとんど無いと言える。この結果は, ほぼ平衡状態を保ちつつ圧力降下する $G=0.53\text{kg/s}$ に対しては容易に理解できるが, 水温に大きな温度勾配の生じる $G=0.92\text{kg/s}$ についてもノズル寸法の影響が余りない(実験7と9)ことは興味深い。

(2) 注水流量の影響

注水流量の影響を見るのに適当な組み合わせは実験4と6のみである。これらを比較すると(図3-16(b)で実験4と8が極めて良く一致しているので, 図3-16(c)の実験8と6を比較すればよい), 過渡変化の形は似ているものの, $G=0.92\text{kg/s}$ の実験6の方がかなり速い圧力降下(1.48倍)となっている。しかし, その差は注水流量の差($0.92/0.53=1.74$ 倍)ほどでない。これは, 今まで述べてきたように $G=0.92\text{kg/s}$ のとき, 注入水の一部が水部の冷却に費されるためである。

(3) 初期水位の影響

実験6と7の比較から初期水位の影響が判る。実験7の方が降下速度が遅い(1/1.6倍)のは, phase VI-aでの水部サブクール程度に大差があることと, 圧力容器内の初期エンタルピー保有が大きいことによる。

これらの実験の初期水位差0.26mは実験6の水位の24%に当る。この水位差による圧力降下速度の違いの方が, 前項の注水流量差74%による違いよりも大きいことから, 圧力降下速度は注水流量よりも初期水位に対して敏感であると言える。これを念頭に置けば, 初期水位と注水流量の二つの要因の違いによる効果が含まれている図3-16(d)の実験10と11の大きな差異(実験11の方が約2.7倍速い)は, 主として0.7mの初期水位差に依ると言うことができる。

(4) 初期圧力の影響

初期圧力が圧力降下速度に及ぼす影響の大きいことは明らかであるが, 他の条件のほぼ揃った実験1, 2を比較すると, 実験2の方が約2.8倍速い圧力降下を示している。この値は, 初期絶対圧力の比 $10.5/31.2=2.94$ 倍に近い値となっている。この結果から, 本実験の圧力範囲では, 圧力降下速度はほぼ初期圧力に比例すると考えてよいであろう。

(5) 総圧力降下と注水総量

圧力降下の続いている phase VI-a では, 注水流量

の大小により熱平衡に近い場合と水部のサブクール化が顕著な場合とがある。しかし、後者の場合でも、注水終了後にはほぼ熱平衡に達し、その時圧力が最も低くなる。従って、この総圧力降下（圧力降下の最大値）は、途中の熱平衡値からの差、すなわち注水流量の影響は余りなく、注水総量に支配されるものと考えられる。図3-17は、初期圧力 30kg/cm²g. のグループ

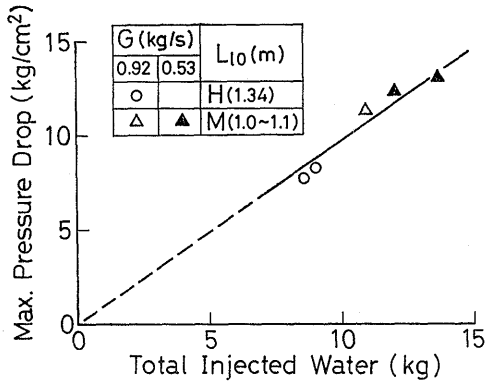


図3-17 注水総量と総圧力降下の関係(初期圧力30kg/cm²g.)

の注水総量と総圧力降下のデータを示したもので、両者がほぼ比例の関係にあることが判る。図3-17には初期水位 L_{10} の異なるデータも含まれており、 L_{10} の高いデータ（記号：H）の方が、初期保有エンタルピが多いことによりやや低い。

3.5.2 圧力アンダーシュート

本実験で測定された注水開始直後の圧力アンダーシュート時の圧力変化を拡大し、初期圧力ごとに比較を行ったのが図3-18(a)~(d)である。系全体の過渡変化と同様、この場合も、それぞれ実験1と5、実験4と8及び実験7と9の比較から、注水ノズル寸法による大きな差異は見られない。そこで、圧力アンダーシュート時の圧力降下と圧力回復を図3-19で示す方法で求め、これらが他の実験パラメータとどのように係わっているかを調べることにする。

(1) 圧力降下

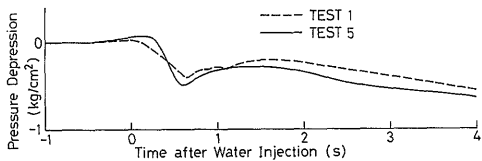


図3-18(a) 圧力アンダーシュート（初期圧力10kg/cm²g.の場合）

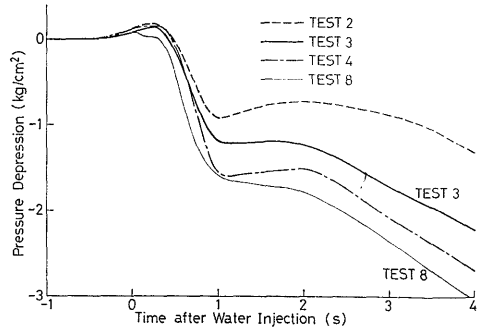


図3-18(b) 圧力アンダーシュート（初期圧力30kg/cm²g.の場合、その1）

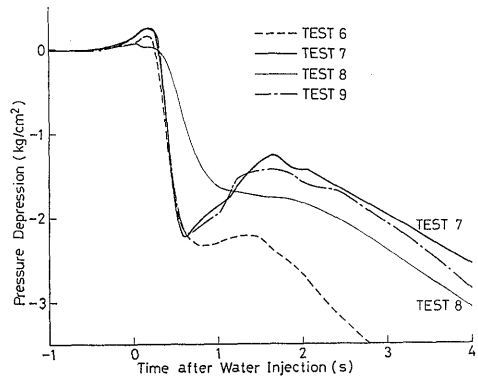


図3-18(c) 圧力アンダーシュート（初期圧力30kg/cm²g.の場合、その2）

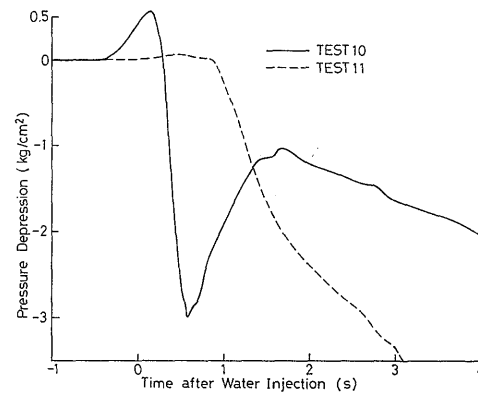


図3-18(d) 圧力アンダーシュート（初期圧力50kg/cm²g.の場合）

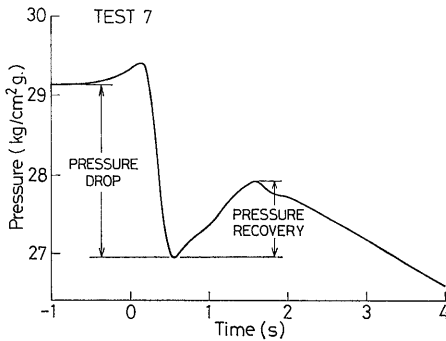


図3-19 圧力アンダーシュート時の圧力降下と圧力回復

注水開始直後の急激な圧力降下と初期圧力，注水流量および初期水位(蒸気容積)の関係を図3-20(a)~(c)に示す。図2-20(a)から，圧力降下量は初期圧力が高いほど大きくなっており，30kg/cm²g. までは両者はほぼ

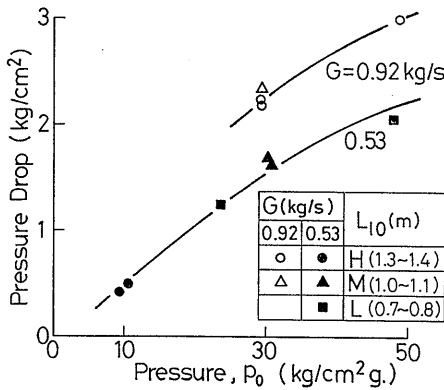


図3-20(a) 圧力降下と初期圧力の関係

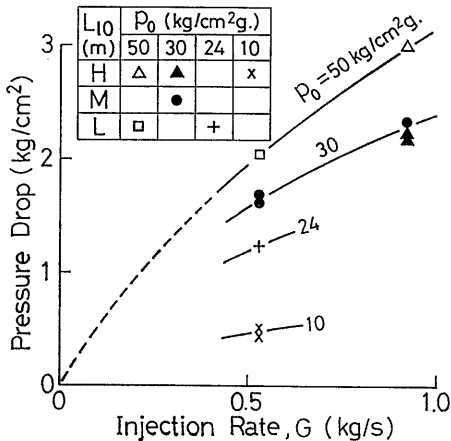


図3-20(b) 圧力降下と注水流量の関係

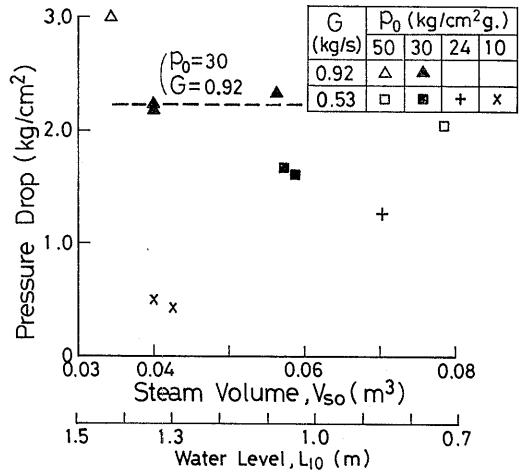


図3-20(c) 圧力降下と初期水位(蒸気容積)の関係

比例している。注水流量によっても異なるが，その違いは流量の差ほど大きくはない。これは，注水流量が増すと，注入水と蒸気間の熱交換割合が小さくなることを意味しており，この未熱交換率の増加がその後の水部のサブクール化として現れる。図3-20(b)は今述べた注水量の影響を判り易い形で示したものである。圧力降下量は，G=0.53と0.92kg/sの間では注水流量に比例していないが，図の点線で示すように，蒸気との熱交換が十分なされるほどの低流量では両者は比例するものと考えられる。

圧力降下量と初期水位(蒸気容積)を関連づけるデータは少ないが，図3-20(c)の▲印($p_0=30\text{kg/cm}^2\text{g.}$, $G=0.92\text{kg/s}$)は，圧力降下量が初期水位に余り依存しないことを示唆している(図中の他のデータは注水流量が異なるなどして比較できない)。

(2) 圧力回復

一時的に過熱状態にある水中からの気泡発生とともに，圧力は系の熱平衡値に近い値まで回復する。この圧力回復と初期圧力，初期水位および流水流量の関係を示したのが図3-21(a)~(c)である。図3-21(a)から，初期水位の高い時には，圧力回復が初期圧力に大きく依存(ほぼ比例)するが，水位の低い場合はほとんど圧力回復しないことを示している。そこで，初期水位の影響を見たのが次の図3-21(b)である。圧力回復は，初期圧力をパラメータとして示せば，図の実線のようになる。すると，圧力回復の現れる最低水位は，初期圧力の増加とともに低くなる。図3-18(c)の実験8のように圧力回復のない場合でも，一旦急激に下った圧力が

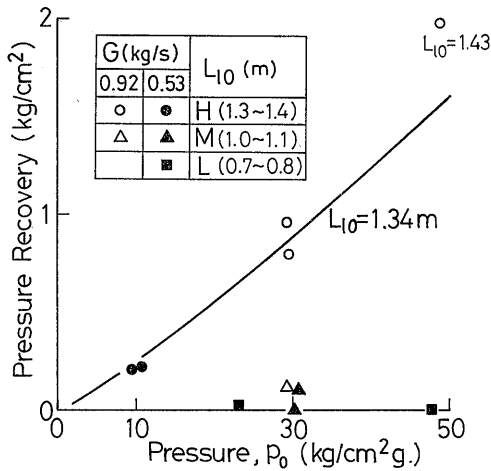


図3-21(a) 圧力回復と初期圧力の関係

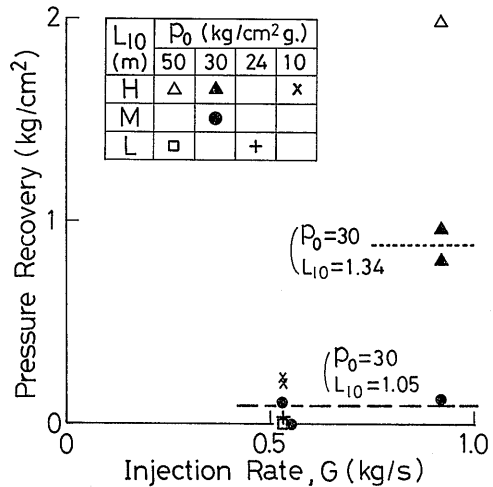


図3-21(c) 圧力回復と注水流量の関係

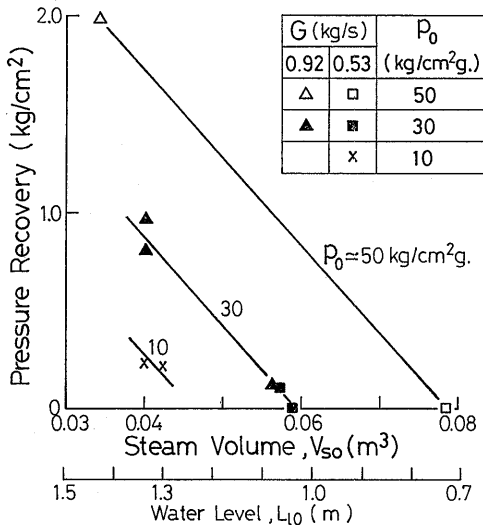


図3-21(b) 圧力回復と初期水位（蒸気容積）の関係

それ以上の降下を休止することにより熱平衡へ移行する。この過程は、図3-19の定義による圧力回復は起らないものの、実質的には圧力回復が生じているのと同様である。このような圧力の持続現象も、水位が非常に低い実験11ではほとんど見られなくなる（図3-18(d)）。

図3-21(c)は、圧力回復が注水流量に依存しないことを示している。これは、圧力回復が下方の水中に生じる蒸気泡によって定まるものであって、蒸気泡の発生が水中の過熱度などの物理量にのみ支配されるためである。この点が、初期水位の影響を余り受けない圧力降下現象と非常に異なる点である。

(3) 圧力アンダーシュート現象のシステム非依存性

圧力アンダーシュート現象について見逃せない事柄として、この現象が水部のサブクール化が生じる前の出来事であることが取り上げられる。水部のサブクール化による水温分布は、「現象の推移シーケンス」の節で述べたように、上方からのサブクール水と下方の飽和水との混合効果として現れるものであるので、装置の寸法・形状の影響を強く受ける。従って、ECC水の有効性に係った注入水の炉心部における混合現象の実験には、在来からできるだけ実炉に近い寸法・形状で行われてきたのである。これに対し、注入水と蒸気との熱交換および過熱水中の蒸気泡の発生に依る圧力アンダーシュート現象は装置の寸法・形状の影響をほとんど受けず、局所的な熱力現象の積分値として現れるものと考えられる。この現象が一般性のある現象である一つの証拠として、図3-18(a)~(d)が示すように、圧力降下と圧力回復が行われるに要する時間が、かなり広い実験条件の違いにもかかわらず、それぞれ約0.6秒と約1秒と一定しているという実験事実がある。

このような観点に立てば、図3-18(a)~(d)或いは図3-20(a)~図3-21(c)で示される圧力アンダーシュートに関するデータは、一般性の高いデータとして非常に有用であると言える。また、蒸気泡の発生遅れという熱的非平衡性に起因する圧力アンダーシュートの従来からのデータは、ブローダウンあるいは蒸気部からの抽気による方法で得られたものに対して、本報のデータは ECC 水に相当する冷水の高圧飽和蒸気水系へ

の注入時に現れるものとしては初めて測定されたものであり、さらに、圧力容器内の構造物がほとんど無いという単純な系におけるデータであるため、ECC水注入時の圧力アンダーシュートを解析するモデルの開発に利用することができる。

4. 解析

これまで調べてきたように、本実験の現象は、過渡変化を全体として捉えた場合の容器内流体の圧力・温度応答と注水開始直後の圧力アンダーシュート現象に分けることができる。そこで、解析においても、これらを別々に解析することにし、解析モデル中に用いられたパラメータの評価を通して現象の理解をさらに深めることにしよう。

4.1 BLODAC-1V⁽²⁾コードによる過渡変化解析

前章の実験データから、圧力アンダーシュート後の過渡変化は、注水流量の少ない場合はほぼ系全体が熱平衡を保ちつつ推移するが、注水流量の多い場合は水部に大きなサブクール化の出現、すなわち熱的に非平衡な状態が現れることが判明した。この水部のサブクール度は垂直方向に広く分布しているばかりでなく、時間的にも大きく変化し、それが圧力の変動に呼応している（例えば、図3-11(a)~(c)の5秒付近の圧力の波打ち現象と温度分布変化の対応）という複雑な様相を呈している。このような熱的非平衡現象を解析的に取り扱うことは相当に困難であると予想される。そこで、熱的非平衡な現象として解析することは今後の課題として残すことにし、ここでは、注水流量の少ない場合の過渡変化解析に有望と考えられる熱平衡モデルによる解析を行うことにより、熱的に非平衡な現象を熱平衡モデルでどの程度まで近似できるかを調べることとする。本装置による過渡変化に適した熱平衡解析コードは幾つかあるが、ブローダウン解析用として当所で開発したBLODAC-1Vを採用した。

4.1.1 注入水と蒸気間の熱交換率 C_s について

熱平衡モデルであるため、系内の温度は常に一様と見なされるが、BLODAC-1VはECC水注入時の解析を考慮していないので、注入水が熱交換を行う対象（蒸気部か水部か）を指定することができない。そこで、新たな解析パラメータとして、注入水と蒸気間の熱交換率 C_s を導入した。 $C_s=1$ は、注入水の全凝縮能力（注水流量×水の比熱×注入水のサブクール度）に匹敵する蒸気凝縮が起こることを意味し、逆に $C_s=0$ は、注入水は直接蒸気との熱交換を行わないことを

意味する。この C_s の値が変わっても、系の温度と圧力には差が表れないが、水中で発生する蒸気泡の量は C_s によって大きく依存するため、水位にかなりの差が出てくる。本実験ではブローダウンを伴った冷水注入は行わなかったものの、実際の現象ではブローダウンを伴い、かつ水位が破断口の高さより低いか高いかでブローダウン流量が大いに変わるという観点から見れば、水位を定める C_s の評価は非常に重要なこととなる。

なお、BLODAC-1Vの内容については文献(2)に詳しく述べられている。

4.1.2 圧力と温度応答の解析

まず、パラメータ C_s の影響を受けない圧力と温度の応答を見ることにしよう。図4-1(a), (b)は、それぞ

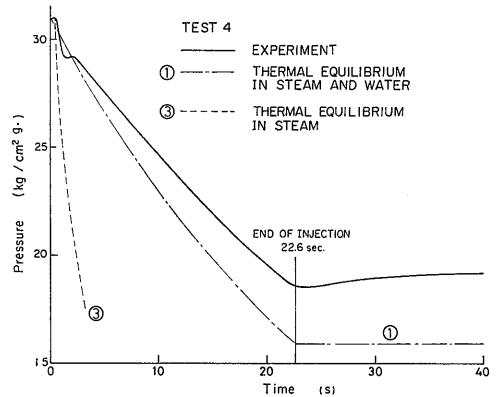


図4-1(a) 圧力過渡変化の解析値と実験データとの比較（ほぼ熱平衡状態で推移する実験4）

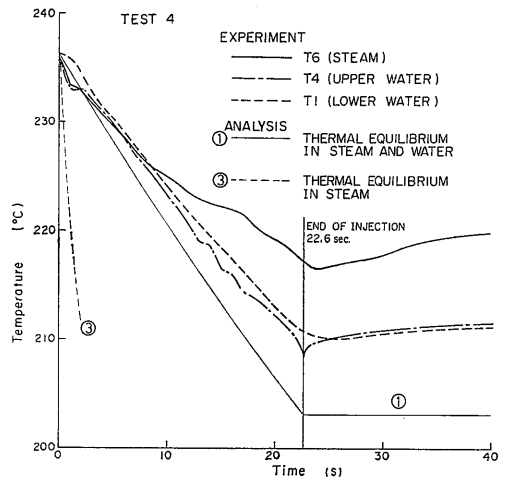


図4-1(b) 温度過渡変化の解析値と実験データとの比較（実験4）

れ実験4の圧力および温度応答について実験値とBLODAC-IVによる解析結果を示したものである。解析値として、容器内流体全体が熱平衡状態にある場合および注水と蒸気部のみで熱平衡になる場合が示されている。前者のモデルによる解析値は圧力および水部温度の実験データと同様の傾向を見せているが、解析値の方がかなり低くなることと、注水終了後は熱平衡の仮定のため一定値を保つという違いがある。この違いが生ずる原因として、過渡変化中に流体が圧力容器壁から受け取る熱の影響が考えられる。そこで、流体と構造材の注水開始時点における保有熱量比を概算してみると、実験4の場合、1対0.45であり、構造材の保有熱量がかなり大きいことが判る。過渡変化中、流体温度と構造材の温度差に相当する熱量が全て流体側に伝わるものではないが、その伝熱量が流体の圧力・温度に与える影響は少なくないと予想される。

冷水を圧力容器内へ注入した際の容器壁から流体への熱伝達率に関する実験データは見当らず、また、この伝熱現象は壁面での蒸気凝縮や水部内の対流などが影響する複雑な現象であるため、従来からの伝熱理論や相関式からの推定は困難である。そこで、この熱伝達率も一つの解析パラメータとして扱うことにし、壁面からの伝熱量は壁の厚み方向の1次元非定常熱伝導方程式⁽⁶⁾をexplicitな差分法⁽¹⁷⁾で解いた。

図4-2(a), (b)は、注水流量が多いため多少水部にサブクール化の現れる実験6について、壁面からの伝熱のない場合とある場合の解析値を実験データと比較したものである。壁面の熱伝達率は、実際には場所によってかなり違っていると考えられるが、解析では系全体を平均的に扱った。その結果、その熱伝達率として

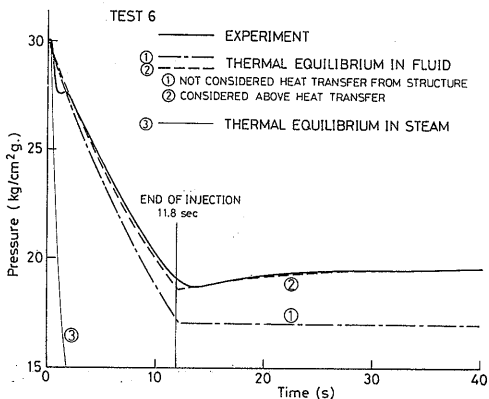


図4-2(a) 圧力過渡変化の解析値と実験データとの比較(少し水部サブクール化の現れる実験6)

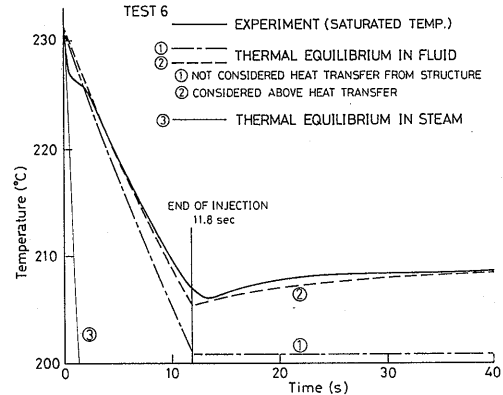


図4-2(b) 温度過渡変化の解析値と実験データ(飽和温度)との比較(実験6)

$10^4 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ というかなり高い値のとき、図4-2(a), (b)に示すように解析値とデータが最もよく一致した。壁面からの伝熱を考慮すると、注水終了後の圧力や温度の変化もよく再現できることが判る。しかし、流体は熱平衡を仮定しているため、圧力と温度の極小値は注水終了時と同時に現れるが、実際は先に述べた水部のサブクール化により注水終了時点より後となる。この違いは水部のサブクール化が進むほど大きくなり、実験7や9の場合(図3-9(a)~(c), 図3-11(a)~(c)), 実際の圧力と温度の極小値は注水終了時よりかなり後に現れるので、壁面からの伝熱を考えるだけでは、熱平衡モデルによる解析値とデータは一致しなくなる。すなわち、そのような大きなサブクール化の現れる現象に対しては、どうしても水部の温度分布を扱うことのできる解析法が必要となってくる。しかしながら、実験6程度のサブクール化までならば、壁面の熱伝達率として適当な値が与えられれば、熱平衡モデルに基づいた解析プログラム BLODAC-IV で十分予想できることが明らかとなった。

4.1.3 ボイド率と水位応答の解析

次に、パラメータ C_s の影響を強く受けるボイド率分布と水位応答を調べることにする。

(1) 平均ボイド率の変化

前章のボイド率のデータが示すように、ボイド率は空間的に分布しており、それが時間経過とともに激しく変動しているため、解析値と直接の比較は繁雑となり判りにくくなる。そこで、まず、ボイド率の平均値が解析結果とどのような関係にあるかを示したのが図4-3である。図中の平均値のデータは、図3-7(e)のV5

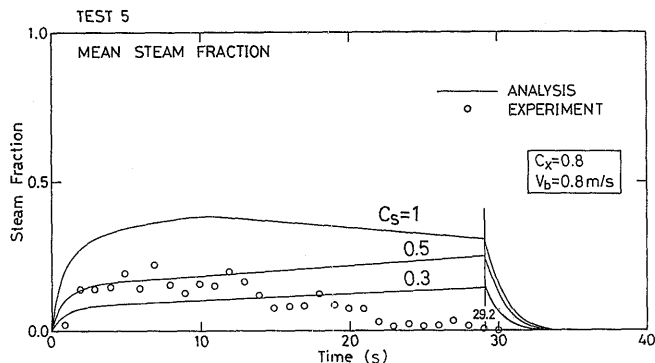


図4-3 平均ボイド率の解析値と実験データとの比較（注水途中から水部にサブクール化の現れる実験5）

～V1に対し単に代数平均を採ったものである。ただし、V5が蒸気部に存在するごく初期の値は除外してある。過渡変化の途中で水位が変わるので、厳密にはV5の値に水位変化に応じた（V5が代表する水柱高さ）重みを乗じる必要があるが、図4-3が示すようにそれ程の厳密な比較は無意味であるので、上述の方法に依った。

解析値は C_S が1に近づくほど、すなわち注入水が蒸気部との熱交換が完全であるほど、高いボイド率を与えている。これは、圧力降下の内、注入水と蒸気部間の熱交換により生ぜしめられる割合が多くなるほど、水部からより多くの蒸気泡発生によって熱平衡を保つ必要があるためである。逆に、 $C_S=0$ のときは、系の圧力降下は注入水と水部間の熱交換のみに依るため、水部は減圧沸騰を起さなくとも熱平衡状態となり、水中からの蒸気泡の発生はほとんど生じなくなる。

図4-3の平均ボイド率は、10数秒までは $C_S=0.5$ の解析値にほぼ沿って変化しているが、それ以降は、水位の増加とともに注入水が直接蒸気と接触する時間が短くなる（図3-2(a)参照）ため、 C_S の小さな値に対応したボイド率を示すようになる。そして、水位が注水管に達する27.5秒（図3-7(a)参照）には、ボイド率は $C_S=0$ に対応した零に近づく。なお、図中の解析パラメータ C_x と V_b はそれぞれ気泡分布の勾配を定める定数⁽¹⁵⁾及び蒸気泡の水面からの離脱速度である。そして、それらの値は、本装置とほとんど同寸法の压力容器からのブローダウン現象をよく模擬した解析⁽²⁾に用いた値を選んだ。

(2) ボイド率分布と水位変化

BLODAC-1VではRELAP-4などのLOCA解析用コードで使用されている気泡勾配モデルを使ってボイド率の垂直分布を計算するので、等間隔に設けられたV1～V6の水中ボイド率も等間隔となる。図4-4は、実験6の場合についてのボイド率分布の解析値を示している。図中の点線は平均値を、1点鎖線は水面直下のボイド率を表わしている。実際のボイド率は、図3-8(d)に示すように、注水初期では気泡勾配モデルに近い分布となっているが、後半では逆転した分布となり解析結果と大きく異なっている。このボイド率の逆転現象は、水部の上方ほどサブクール度が大きくなる水温分布に依るものであって、実験6の場合も多少サブクール傾向が現れ（図3-8(c)）、下方で発生した蒸気泡の一部が上方のサブクール水に触れて消滅するために生ずる。従って、熱平衡と気泡勾配モデルからは、ボイド率の逆転現象は模擬することができない。しかし、 C_S として0.8を採れば、平均ボイド率のデータ（●印）はほぼ解析値に沿って変化していることが判る。実験6の水部サブクール化が実験5より小さく（図3-8(c)と図3-7(d)の比較）、熱平衡に近いので C_S の値が図4-3より大きくなったのであろう。

実験6の初期水位はV4の高さより低いが、水位が注水開始後、注入水と蒸気泡により上昇し、V4、V5、V6の高さに達するのは、図4-4の解析ではそれぞれ0.3、2.6と9.1秒である。そして、注水終了後、水中に残された蒸気泡の水面からの離脱とともに水位は下降し、V6、V5を通過するのはそれぞれ12.2と13.2秒となっている。これを図3-8(d)のV4とV5の動きと比較するとほぼ一致していることが判る。また、図3-8

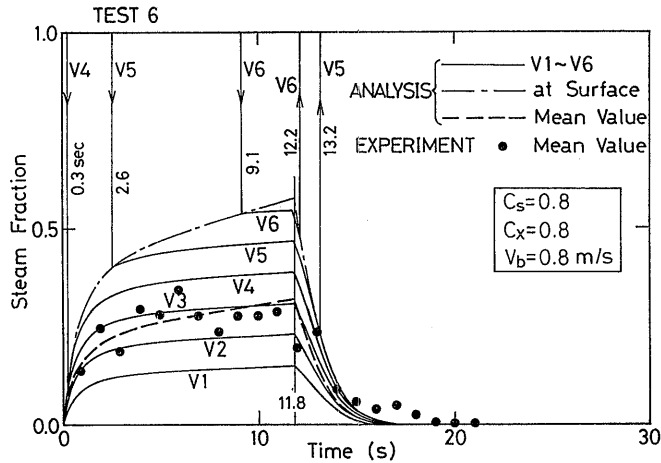


図4-4 ボイド率分布と水位変化の解析結果（実験6）

(c)のT6の変化から約11秒で水位がV6と同じ高さのT6に達することが判るが、図4-4と比べて約2秒ほど遅い。これは、前述の注水後半の水温分布の影響で、水位がこの時刻付近では熱平衡モデルによる解析値ほど上昇しないためである。

以上のように、水部にサブクール化の現れる場合のボイド率分布は熱平衡に基づいた解析モデルから求めることはできない。しかし、そのサブクール化の弱い過渡変化中の平均ボイド率と水位は、 C_s に適当な値を選べば、BLODAC-IVによる解析値とほぼ一致させることができる。

4.2 圧力アンダーシュート時の圧力降下速度の解析

これまで述べてきたように、注水開始直後の圧力アンダーシュート現象は、過熱水からの蒸気泡の発生と成長という熱的な非平衡性に起因しているため、熱平衡モデルからは全く再現させることができない。一方、この現象が装置の寸法・形状に余り依存しない一般性の高い現象であるところから、従来より実験および解析の両面からの研究が進められてきている⁽¹⁶⁾。しかし、この現象の基本的メカニズムとしては、過熱水中からの蒸気泡の生成をできるだけ純粋に熱力学にもとづいて解こうとする立場⁽¹⁸⁾と、蒸気泡の発生により水の過熱度が次第に解放されるという一種のリラゼーションモデル⁽¹⁹⁾から解析しようとする二つの立場がある。前者は理論的に優れているがパラメータ値の設定と解析上の取り扱いが複雑である。これに対し、後者は理論上の弱点はあっても取り扱いが容易であるという特徴がある。

ここでは、上述のような非平衡モデルによる解析は今後の課題とすることとし、注入水と蒸気部間のみで熱平衡が成り立つ場合の圧力変化から、圧力アンダーシュート時の圧力降下速度の極限值について考察することにする。

注入水が直接蒸気と接触する時間は図3-2で示したようになりに限られていることと、前節で評価を試みた C_s の値から、注水開始直後の急激な圧力降下時における注入水と蒸気間の熱交換割合 C_s も1以下であると予想される。従って、 $C_s=1$ とし、下方水中からの蒸気泡発生が全くないと仮定した場合、すなわち、注入水と蒸気部間のみで熱平衡が達成されるとした場合の圧力降下速度は理論上の極限值となり、現実の圧力降下速度はこれより小さいことになる。

図4-5は、圧力降下速度が限界となる注入水-蒸気間の熱平衡モデルにおいて、蒸気容積や注水流量が圧力変化に及ぼす影響を示したものである。図4-5から、蒸気容積が小さいほど、また注水流量が大きいほど圧力降下速度が大きいことが判る。特に注水開始直後では、圧力降下速度が流量に比例し、容積に反比例している。

図4-6は、圧力アンダーシュートが比較的大きく出る実験7の場合について、上述の蒸気空間のみで熱平衡に達するモデルによる解析値③と実験データとを比較したものである。図から、実験7の圧力降下速度は解析値の約 $\frac{1}{2}$ であることが判るが、これは圧力降下過程の C_s が約0.5であることに相当する。同図には、参考のため前節の方法により容器壁からの伝熱を考慮

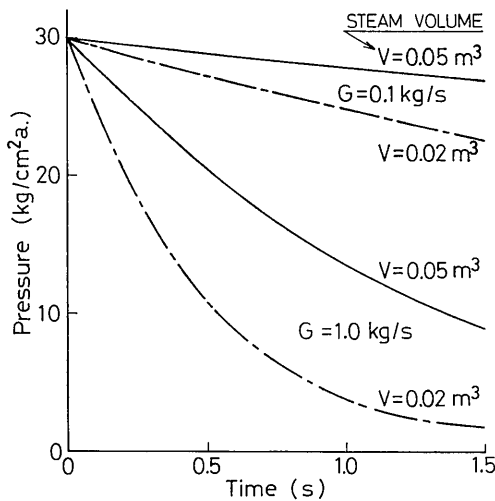


図4-5 注入水と蒸気部のみで熱平衡になる場合の圧力降下

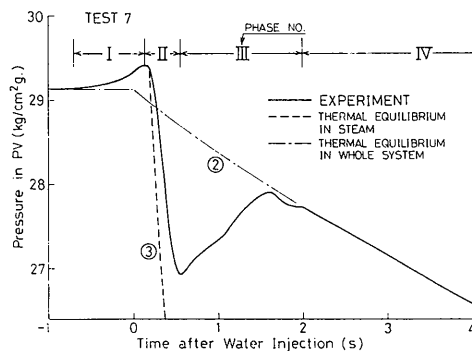


図4-6 圧力アンダーシュート時の圧力応答の解析値と実験データとの比較(実験7)

した場合の解析値②, および図3-14に対応した phase No. が示されている。なお, 図4-1(a)~図4-2(b)にも, 圧力および温度降下の極限值③が示されているが, いずれも実際の圧力や温度の変化より急激となっている。

5. まとめ

5.1 本研究の成果

一体型船用炉における非常用炉心冷却水 (ECC 水) 注入時の圧力容器内流体の基礎的な熱水力挙動を把握するため, 当所で製作した「非常用冷却水混合効果実験装置」を使って, ブローダウンを伴わない場合における蒸気部からの冷水注入時の圧力容器内蒸気-水系

の熱水力的応答について実験的研究を行った。実験データの整理と解析から以下の成果を得た。

(1) 冷水注入に伴う過渡現象は, 大きく注水初期の圧力アンダーシュートとその後の注入水と飽和水との混合に支配される過渡変化(注入水混合過程)の二つに分けることができる。これらは更に分割でき, 前者は三つの過程から, そして後者は六つの過程から成っており, それぞれの過程における現象の特徴とその理由について定性的な説明を行った。

(2) 圧力アンダーシュートは, 水中からの蒸気発生が注入水と蒸気間の熱交換による急激な圧力降下について行けず, 一時的に過熱状態になるために生ずるものであって, 装置の形状・寸法に余り依存しない重要な現象である。この圧力アンダーシュート時の圧力降下量と圧力回復量について, 実験パラメータである初期圧力, 初期水位および注水流量の影響を調べた結果, 前者は初期水位の, 後者は注水流量の影響をほとんど受けないことが判明した。

(3) 注入水混合過程は, 注入水流量と初期水位によって現象の様相が非常に異なってくる。すなわち, 流量が少なく初期水位が低い(蒸気容積が大きい)ほど, 系全体はほぼ飽和状態(熱平衡)を保ちつつ変化するのに対し, 流量が多く初期水位が高いほど, 水部のサブクール化が促進される。後者のサブクール化の原因は, 注入水と蒸気間の熱交換が不十分となるために生ずる。水中のボイド率とその分布は水部のサブクール化の程度に大いに支配される。サブクール化が起らないか少ない場合は, ボイド率の値自体も大きく上方ほど高くなるという分布になるが, 大きなサブクール化の現れる場合は, ボイド率の値が小さく, 逆転した分布となる。

(4) 蒸気部の温度は, 注入水混合過程の途中まで(本実験の場合, 特別な例外を除けば全て7~8秒)は飽和温度を示しているが, その後は過熱温度を示すようになる。これには, 容器壁からの伝熱の他に, 水中から供給される蒸気の影響も考えられる。

(5) 実験パラメータの内, 注水ノズル寸法(ただし総断面積はほとんど一定)の明瞭な効果は見られなかった。初期圧力は, 過渡変化の各過程で生ずる現象の規模に影響を与える(例えば, 圧力アンダーシュート時の圧力降下量は初期圧力が高いほど大きくなる)が, 現象の本質にはほとんど影響を及ぼさない。注水流量と初期水位は(2)と(3)で述べた効果をもたらす。注水総量(注水流量×注水時間)は, 水位が注水管に達

するまでは混合過程の内の圧力降下期間を延ばし、水部に蓄積されるサブクール化を大きくするだけであるが、注水時間を長くとり一旦水位が注水管に達すると今まで見られなかった圧縮加圧過程をもたらす。この時の水部サブクール度は大きく、最大40°Cを記録した。また、水部からは蒸気泡は完全に消滅している。

(6) 圧力アンダーシュート時の急激な圧力降下速度の極限值は、注入水と蒸気部のみで熱平衡になると仮定した場合に相当し、実際の降下速度はこれより小さい。

(7) 系全体の圧力変化は、圧力容器からの伝熱を考慮すれば、水部のサブクール化が小さい間は熱平衡モデルによる解析値とほぼ一致する。このとき、容器壁における熱伝達率としては10 kcal/(m²・h・°C)というかなり大きな値を採る必要がある。

(8) ボイド率の平均値は、圧力と同様、水部のサブクール化の小さい場合には解析値とほぼ一致する。しかし、この場合のボイド率分布については、注水初期のサブクール化のほとんど進んでいない時期においてのみ気泡勾配モデルによる解析値と一致するが、それ以降では実際の分布は解析値と逆になる。これは、圧力変化に比較して、ボイド率分布は水温分布に非常に敏感であることによる。

(9) ボイド率の絶対値は、注入水と蒸気部間の熱交換の割合 C_s に強く依存し、熱平衡に近い場合(注水流量が少く初期水位が低いとき) C_s は1に近づき、圧縮加圧過程では零となる。また、 C_s が1に近いほど、水中からの蒸気泡の発生は多くなる。従って、注水量が多く次第に水部のサブクール化が進行する場合は、 C_s は時間の経過とともに次第に小さくなり、最終的には零となる。

5.2 今後の課題

本実験のデータから、冷水を高圧蒸気-水系へ注入した場合の現象の基本的性質はかなり把握できたと考えられる。また、熱平衡モデルを使った解析から、現象のかなりの部分について定量的に説明が可能であることを明らかにした。しかし、熱的非平衡性に起因した現象については定性的な説明に止まっており、今後の課題として次のような事柄が残されている。

(1) 急激な減圧下にある過熱水からの蒸気泡の発生と成長を既存の解析モデル⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾のいずれかを使って解析し、本実験で得られた圧力アンダーシュートのデータと比較検討すること。

(2) 注水過程で現れる水部のサブクール化に伴う温

度分布とボイド率分布を、3次元の熱的非平衡問題を取り扱うことのできる可能な既存の解析プログラム、例えばTRAC-PIA⁽²⁰⁾を使って解析し、本実験のデータと比較検討すること。

ところで、模擬実験における注水流量と実炉のECC水流量との相似性については、水部のサブクール化が装置の寸法・形状の影響を受けると考えられるところから、1個の数値で表現することは困難である。しかし、一つの目安として蒸気部ドーム断面積に対する注入速度で比較すると、本実験の0.53kg/sは日本造船研究協会で概念設計がなされたNSR-7炉のECC水注入流量3.5×10⁴kg/h⁽²¹⁾の約3倍に相当する。

6. 参考文献

- 1) 入江正彦, “船舶用一体形加圧水炉の概念設計”, 日本船用機関学会誌 第7巻第12号, 昭和47年12月, p.877.
- 2) 成合英樹他, “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)”, 船研報告第14巻第5号, 昭和52年9月, p.1.
- 3) Nariai, H., “Thermo-Hydraulic Behaviour of Fluid in Pressure Vessel during Blowdown,” Conference on Heat and Fluid Flow in Water Reactor Safety, C208/77, the Inst. of Mech. Engrs., Manchester, Sep. 1977.
- 4) Nariai, H., et al., “Thermo-Hydraulic Behaviour in a Model Pressure Suppression Containment during Blowdown”, Topics in Two-Phase Heat Transfer and Flow, ASME-WAM, San Francisco, Dec. 1978, p.89.
- 5) 成合英樹他, “ブローダウン時における圧力抑制型格納容器の熱流力的応答特性(その1 実験結果と考察)”, 船研報告第16巻第1号, 昭和54年1月, p.1.
- 6) 綾威雄他, “同上(その2 解析モデルとその評価)”, 船研報告第17巻第2号, 昭和55年3月, p.1.
- 7) Nariai, H., et al., “Heat Transfer Coefficients of Steam Condensation on Containment Vessel Wall during Blowdown”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 18 No. 11, 1981, p.845.
- 8) Idaho Nuclear Corporation, Hai-125-71, “Sem-

- iscale Tests 845-851”, June 29, 1971.
- 9) U. S. Atomic Energy Commissioners, “Opinion of the Commission—In the Matter of Rule-making Hearing—Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light-Water-Cooled Nuclear Power Reactors”, RAI-73-12, 1974.
 - 10) Block, J. A. and Schrock, V. E., “Emergency Cooling Water Delivery to the Core Inlet of PWR’s during LOCA”, Symp. on the Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety, Vol.1 Light Water Reactor, ASME-WAM, 1977, p.109.
 - 11) Lewis, H. W., et al. (APS study group on light-water reactor safety), “Report to the American Physical Society by the Study Group on Light-Water Reactor Safety”, Reviews of Modern Physics, Vol. 47 Suppl. No. 1, Summer 1975.
 - 12) Beckner, W. D., et al., “Analysis of ECC Bypass Data”, NUREG-0573, USNRC, 1979.
 - 13) Tasaka, K., et al., “Performance Test of the Upper Head Injection at the ROSA-II Test Facility”, Nuclear Technology, Vol. 45, Sep. 1979, p.121.
 - 14) Nuclear Regulatory Commission Special Inquiry Group, “Three Mile Island: A Report to the Commissioners and to the Public”, NUREG/CR-1250, Jan. 1980.
 - 15) 例えば, Idaho National Engineering Laboratory, “RELAP4/MOD5: A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems”, ANCR-NUREG-1335, 1976.
 - 16) Owen, C. J. Jr. and Saha, P., “Non-Equilibrium Aspects of Water Reactor Safety”, Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety, Vol.1 Light Water Reactor, ASME-WAM, 1977, p.249.
 - 17) 甲藤好郎, “伝熱概論”, 養賢堂, 昭和39年12月, p. 405.
 - 18) 例えば, Wolfert, K., “The Simulation of Blow-down Processes with Consideration of Thermodynamic Non-Equilibrium Phenomena”, OECD/NEA Specialist’s Meeting on Transient Two-Phase Flow, Toronto, Canada, Aug. 1976.
 - 19) 例えば, Kroeger, P. G., “Application of a Non-Equilibrium Drift Flux Model to Two-Phase Blowdown Experiments”, *ibid.*
 - 20) U. S. Nuclear Regulatory Commission, “TRAC-PIA: An Advanced Best-Estimate Computer Program for PWR LOCA Analysis”, NUREG/CR-0665, Mar. 1979.
 - 21) 原子力船第7研究部会報告書, “船舶用一体型加圧水炉の概念設計に関する試験研究”, 日本造船研究協会, 昭和48年4月.

7. あとがき

本報告は, 昭和52年度の原子力試験研究費で製作した「非常用冷却水混合効果実験装置」による実験および検討結果である。本装置の記録計等が一応揃ったのは昭和54年3月となったことや, 実験準備に手間どったため, 実験が軌道に乗ったのは同年11月からとなった。さらに翌年4月からは「一体型船用炉模擬装置」による1次水の熱流動実験に入ったため, 本装置による高圧飽和蒸気-水系への冷水注入実験は合計11回に止まった。ブローダウン中のECC水挙動という極めて複雑な現象を対象とした従来からの実験に対し, 分離効果としてのECC水注入に伴う基本的な現象を明らかにするという本研究の目的から見れば, 一通りの実験は行うことができた。しかし, 従来からの研究との橋渡しのため, ブローダウンを伴った冷水注入の実験, および実炉の燃料アンセンブリー回りのバイパス通路に沿って部心下部に溜るECC水の挙動把握に有益と考えられる圧力容器下部からの注水実験も可能なように本装置を製作したが, 上記の理由によりこれらの実験が行えなかったことは誠に残念である。

本報告の解析の部分には, 「まとめ」で述べたように未だ不十分なところもあるが, あまり時間が掛かりすぎることあり, とりあえずここにデータおよびこれまでに行った検討結果をまとめておくことにする。

最後に, この研究期間を通じて, 膨大な実験データをビジュグラフの記録を読み取ることにより, 圧力・温度特性やボイド率特性のグラフを書くなどして御協力を頂いた光畑敬子嬢には, 特に深い感謝の意を表わしたい。