

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)

成合 英樹*・綾 威雄*
小林 道幸*・阿曾 滋男**

Thermo-Hydraulic Consequence of Pressure Suppression Containment Vessel during Blowdown

(Part 1, Experimental Results and Discussions)

By

Hideki NARIAI, Izuo AYA, Michiyuki KOBAYASHI and Shigeo ASO

Summary

Experimental research works were conducted for the thermo-hydraulic consequence of pressure suppression containment vessel during blowdown with the Model Experimental Facility for the Safety of Integral Type Marine Reactors. The facility is a model equipment of about 1/200 volume of the NSR-7 marine reactor conceptually designed at the Japan Shipbuilding Research Association in Japan. The experiment was conducted with the various combinations of parameters of blowdown orifice diameters, vent tube orifice diameters and water levels of wetwell. Blowdown characteristics from pressure vessel, pressure and temperature transients in both drywell and wetwell were investigated. Pressure oscillations at the vent tube exit and pool swell phenomenon in the suppression chambers during blowdown were also investigated. Several phenomena occurring during the natural cooling of the facility were observed for a long time after the termination of blowdown.

要 旨

一体型炉安全性模擬実験装置により、ブローダウン時の圧力抑制型格納容器の熱流力的応答特性について実験的研究を行った。同実験装置は日本造船研究協会のNSR-7委員会の概念設計炉の約1/200の容積の模擬装置であり、ブローダウンオリフィス口径、ベント管のオリフィス口径、ウェットウェルの水位をパラメータとした実験を行った。圧力容器からのブローダウン特性、およびドライウェル内の圧力と温度、圧力抑制

室内の圧力と温度などの熱流力的応答特性について調べた。さらにブローダウン終了後、長時間にわたり実験装置を放置して、自然冷却時に発生する現象を観察した。また、ベント管出口部に生ずる圧力振動および圧力抑制室におけるプールスウェルについても調べた。

目 次

1. まえがき
2. 本研究の目的
3. 実験装置
3. 1 概要

* 原子力船部 ** 三井造船株式会社
原稿受付：昭和53年10月6日

3. 2 実験装置本体
3. 3 計装と記録
4. 実験方法
 4. 1 実験概要と手順
 4. 2 実験条件
 4. 3 実験データの整理
5. 実験結果
 5. 1 圧力・温度特性
 - (1) ベント管オリフィスに絞りのない場合
 - (2) ベント管オリフィス口径25mmの場合
 - (3) ベント管オリフィス口径50mmの場合
 5. 2 自然冷却時の変化
 5. 3 ベント管出口の圧力振動
 5. 4 ウェットウェルにおけるプールスウェル
6. 考察
 6. 1 圧力容器からのブローダウン特性
 6. 2 ドライウェル内の圧力と温度
 - (1) ウェットウェル水位の影響
 - (2) ブローダウンオリフィス口径の影響
 - (3) ベント管絞りの影響
 6. 3 圧力抑制室内の圧力と温度
 - (1) 圧力抑制室内の温度分布
 - (2) 圧力に対するベント管絞りの影響
 - (3) 圧力抑制室水位の影響
 6. 4 自然冷却過程
 - (1) 自然冷却過程で生ずる現象
 - (2) 自然冷却過程中的ドライウェル内の空気分圧の変化
 6. 5 ベント管出口での圧力振動
 6. 6 実炉との対応
7. まとめ
8. 引用文献

1. ま え が き

蒸気発生器を圧力容器内に内装し、(内装貫流型蒸気発生器の採用)、一次冷却水循環用ポンプを圧力容器へ直接取付けて、圧力容器内で一次冷却水が循環するようにし、(一次冷却水循環用主配管の省略)、場合によっては、別置の加圧器を持たず圧力容器内の上部に加圧用空間を有する方式、(自己加圧方式の採用)をとった有機的機能を有する圧力容器を採用し、さらに、この圧力容器を圧力抑制型格納容器へ組込んでコンパクト化したいわゆる一体型船用加圧水炉(一体型炉)は、実用化時代をみざす将来の船用炉として最も

有望と考えられており、世界各国で開発研究がすすめられている。我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。

この一体型炉を安全性の観点からみた場合の特徴は、一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。また一方、この冷却水喪失事故時にそなえる格納容器は、空間的制約からできるだけ小型にすることが望ましい。しかし圧力抑制型を採用しても、従来の発電用軽水炉に比較して設計圧力が高いものになると考えられる。著者らは、これまで、一体型炉の冷却水喪失事故現象を把握する目的で「一体型炉ブローダウン実験装置」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⁾⁽³⁾。一方、冷却水喪失事故時の圧力抑制型格納容器の熱流力応答特性を研究しようとするのが本研究であって、「一体型炉安全性模擬実験装置」を製作して実験に供した。この装置は、日本造船研究協会の概念設計炉の圧力容器、ドライウェルおよび圧力抑制室の各内容積を約1/200に模擬したものであって、本装置による実験と、解析法(シミュレーションモデル)の検討により、圧力抑制型格納容器の熱流力的解析モデルの把握を行おうとするものである。本装置による実験は13回行われた。本報では、まずその実験結果と考察について記し、次報に解析モデルによる検討結果について記すことにする。

2. 本研究の目的

冷却材喪失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)時に流出する高温高圧の蒸気を水中で凝縮させ、格納容器の内圧上昇を抑える構造の圧力抑制型格納容器は、発電用沸騰水型原子炉(BWR)において広く用いられている。すなわち、この形式の格納容器は米国のGE社とPacific Gas and Electric社で開発され、Humboldt Bay原子力発電所に最初に採用された。両社は、この格納施設の開発のため、1958年から60年にかけて1/48の規模の実験装置をつくり、蒸気の凝縮の様相や格納容器の圧力応答などを調べた⁽⁴⁾。その後、Bodega Bay原子力発電所の試設計において、現在のBWRのMark I型の格納容器が考えられ、同時に、1/112の模擬実験が1962年に実施された。これらの実験に基づき、格納容器の圧力応答に対する解析モデルが開発された。我が国においても、昭和39年に石川島播磨重工においてHumboldt Bayの

約1/700の実験装置により、圧力抑制室の過渡的圧力変化が調べられた⁽⁴⁵⁾。また、日本原子力事業 (NAIG) では、昭和39~40年にわたり、Bodega Bay 原子力発電所の約 1/1500、Bodega Bay の Test Facility の約 1/13.5 の実験装置による実験が行われた⁽⁴⁶⁾。

これら発電用原子炉の圧力抑制装置に対し、船用原子炉の圧力抑制型格納施設もいくつか実験が行われた。船用として、まず実験的研究が行われたのはB&W社による水づけ格納方式である。この炉は圧力容器を水づけにした構造で、LOCA時に高温・高圧の蒸気が水中へ放出される時の衝撃荷重や衝突荷重を問題とし、模擬実験を行ったものである⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾。しかし、その後水づけ方式は実用化の方向へはすすんでいない。我が国では、日本造船研究協会のNSR-6委員会において昭和44~45年にかけて「船用炉用圧力抑制格納方式に関する試験研究」が実施された。これは、圧力抑制型の格納容器を船用へ適用する際の基本的な問題点として、

- (1) 空気を混在する水蒸気の凝縮過程
- (2) 圧力抑制室の水利用効率
- (3) 加圧水および高乾き度2相流の水中および空気中への流出

をとりあげ、実験的に研究したものである。本研究により、蒸気の水中での凝縮速度や噴流の放出時の衝撃圧などいくつかの新しいデータが得られた⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾。一方、西独のGKSSでは、NCS-80の圧力抑制型格納容器のLOCA時の特性をPSS (Pressure Suppression System) 試験装置により調べている。NCS-80は西独がオットーハーンに続く原子力第2船として開発している8万軸馬力コンテナ船であって、その原子炉は220 MWt の一体型加圧水炉であり、1976年9月に規制当局の許認可をうけた。この原子炉の圧力抑制型格納施設の特徴は、ウェットウエルの上部の空気が、事故時に加圧されると膨脹室へ流出し、これによって格納容器全体の圧力の上昇を抑える方式をとっていることである。PSS試験装置は実炉の1/4の大きさを模擬したものであって、圧力容器、ドライウエル、ウェットウエルおよび膨脹室よりなっている。本実験により、格納容器内の圧力と温度の応答やベント管での圧力振動についての結果を得つつある⁽⁵¹⁾。

一方、発電炉の大型試験として、1972年から73年にかけて北欧4国、西独、米国によりスウェーデンのマルビケン炉を用いた実物大の圧力抑制型格納容器試験が行われた。これは建設の中断された自然循環沸騰水型重

水炉を転用して、格納容器内一次系配管破断事故を模擬した16回の実験を行い、格納容器内の圧力、温度応答などを調べたものでMX-1実験と呼ばれる。この実験により、格納容器内各部の圧力、温度等が測定されたが、特に圧力抑制系を中心とする格納容器各部に圧力振動が発生していることが注目された。この圧力振動をさらに研究するため、MX-2実験が我が国も参加して行われ、1976年に9回の試験が行われた。そして、これらを契機にベント管に生ずる圧力振動の発生機構に対する関心が世界的に高まった。

さて、原子力発電所の大型化に伴い、GE社では、圧力抑制型格納容器をMark I からII、IIIへと発展させた⁽⁵²⁾。Mark I、IIは垂直方向に蒸気のベント管を有するのに対し、Mark IIIは、水平方向にベント管を有する新しい型のものであり、模擬実験として、PSTF (Pressure Suppression Test Facility) 試験が行われた。この試験により、ブローダウン時に圧力抑制室内の構造物に生ずる過渡的荷重の評価が重要であることが米国内で認識されるようになった。

一方、解析モデルについては、格納容器内の過渡的圧力、温度の応答を評価するため、米国において、CONTEMPT-PS⁽⁵³⁾コードがつくられ、そのほかこれに相当するコードが各国でつくられた。しかし、これらは主に安全評価用であって、現象モデルでないものが多い。そのほか、上記の構造物にかかる荷重の評価などで、現在モデル化がすすめられている。

以上、圧力抑制型格納容器についてまとめると、開発当初、模擬実験と対応させてLOCA時の圧力、温度応答を解析する解析モデルがつくられ、設計に用いられてきた。その後、CONTEMPT-PSのようなコードがつくられたが、これらは安全評価を目的とすることが多く、壁面への熱伝達率などに安全側の値をとっているものが多い。また最近、大型の実験が行われるようになって、LOCA時の過渡的荷重やベント管の圧力振動などにも関心が払われるようになり、それとともに、これらに関して基礎研究が国内外で行われ、また大型の実験が日本原子力研究所でも行われようとしている。

以上の現状を背景に、本研究は、実炉の約1/200の模擬実験を行うことにより、圧力抑制型格納容器の圧力・温度応答特性を得て、現実的な解析モデルを作成し、さらに圧力振動等の現象を実験的に把握し、一体型船用炉の圧力抑制型格納容器の開発のための資料を得ることを目的としたものである。

3. 実験装置

3.1 概要

本実験は、冷却水喪失事故（ブローダウン）時の格納容器内の熱流力的応答特性の把握を目的とするため、できるだけ実際の船用炉体系に近い形の実験装置を作成することが望ましい。

だが、一体型船用炉は、ドライウエルと圧力抑制室からなる格納容器の中に圧力容器があるため、この形状をそのまま模擬することは実験を行う上から考えて大変難しい。しかし、格納容器の冷却水喪失事故時の熱流力的応答特性という観点からすると、複雑な内部

構造を考える必要はなく、別置された圧力容器から高温・高圧水をブローダウンさせる方法で模擬しても十分特性を把握できると考えられる。そこで、圧力容器と格納容器を別につくり、それらを放出系配管でつなぐ方法をとった。

次に、実験装置の大きさの問題がある。これも、できるだけ実際に近い状態が望ましいが、設置される場所の諸施設の能力等を考えて決定された。そして、最終的には、日本造船研究協会のご概念設計炉の大きさを参考にし、圧力容器、格納容器の内容積が、約1/200になるようにした。

また、本実験装置は、実際の格納容器の熱流力的応

表 3.1 概念設計炉と本実験装置の比較

項目	NSR-7 ⁽¹⁴⁾ 炉	模擬実験装置	比
圧力容器内 圧力	137kg/cm ² a	137kg/cm ² a	1
圧力容器 開孔部	86.3m ³ 100mm(38カ所) 上部鏡 100mm(4カ所) 中間鏡 40mm(1カ所) 上部鏡	0.484m ³ 24mm } 12mm } (1カ所) 6mm } 上部胴	1/178 面積比 $\frac{1}{17}$ $\frac{1}{69}$ $\frac{1}{278}$
ドライウエル	430m ³	2.1m ³	$\frac{1}{205}$
ウェット ウエル	325m ³	1.695m ³ (独立3室)	$\frac{1}{192}$
ベント管	総断面積 2m ² (放出孔総断面積) 3m ² 16本	0.0133m ² ~0.00147m ² 3本	$\frac{1}{151}$ $\sim \frac{1}{1358}$
格納系 設計圧力	8.0kg/cm ² g	15kg/cm ² g	

答の解析モデルの作成のための模擬実験データを得るという目的のため、圧力抑制室をいくつかの室に区分けし、ドライウェルと圧力抑制室をつなぐベント管中に絞りを入れるなど、いくつかの模擬を行った。

日本造船研究協会の NSR-7 委員会の概念設計炉の主要仕様⁽¹⁴⁾と本実験装置の仕様との比較を表3-1に示す。また、図3-1に日本造船研究協会の概念設計炉の全体図⁽¹⁴⁾を示す。

表3-1にみるように圧力容器の容積比は約1/178、ドライウェルが約1/205、ウェットウェルが約1/192であって全体としてほぼ1/200になっている。また、

ブローダウン時の想定破断面積と模擬オリフィスの断面積比は1/17~1/280に変えられるようになっており、又、ドライウェルとウェットウェルをつなぐベント管の断面積は1/150~1/1360となっている。

これにより、本実験では、想定される破断面積がそれより大きな破断面積のブローダウン特性を模擬することになり、またベント管の断面積は実際のもと同程度かそれより小さいことになっている。一方、圧力容器内の流体の条件はほぼ同じなので、より厳しい条件の実験を行う関係上、容器の設計圧は実際のものより高めにとってある。

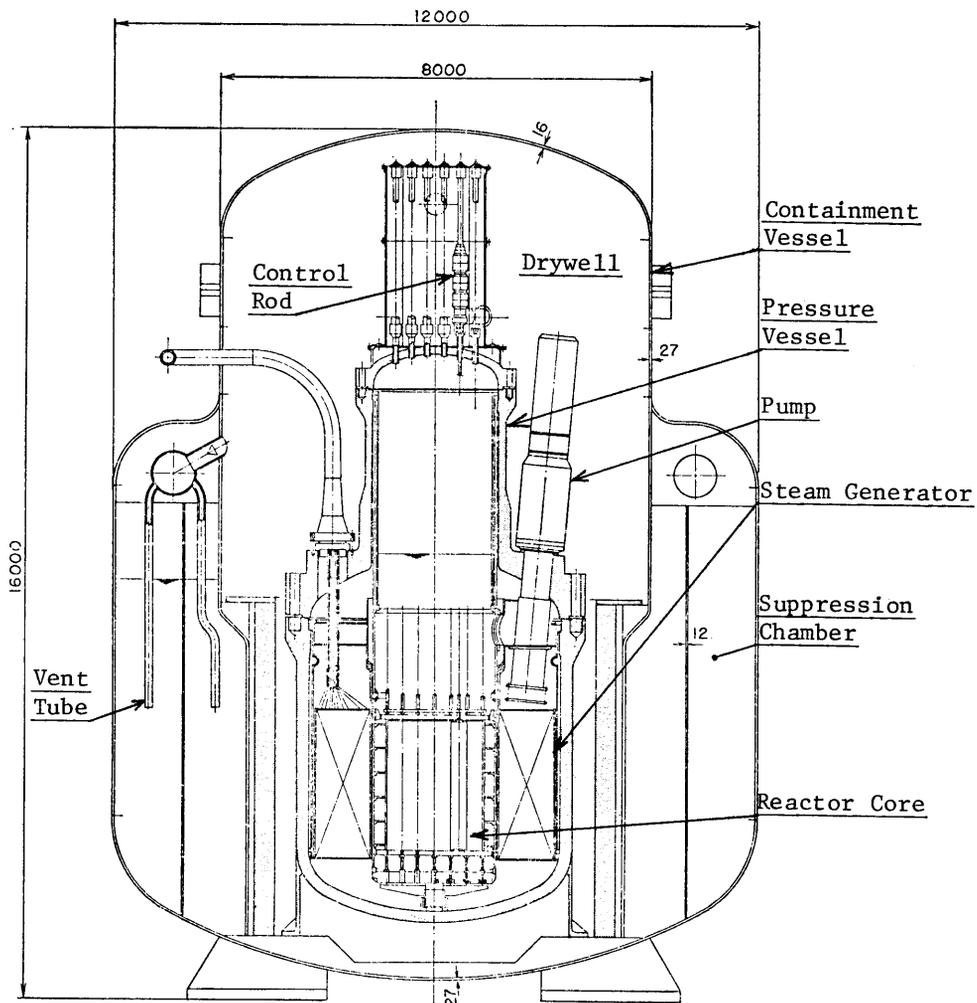


図 3-1 概念設計炉の格納容器構造図⁽¹⁴⁾

3.2 実験装置本体

図3-2に本実験装置のフローシートを示し、図3-3に実験装置の全体配置図を示す。両図に示すように、本実験装置は圧力容器 (Pressure Vessel) と格納容器 (Containment Vessel) および両容器を結ぶ放出系 (Discharge Line) を本体とするものであって、1.5m の深さのピットを掘り、1.7m の高さの架台上に装置全体を据え付けたものである。そのほか、圧力容器と格納容器への給水および排水ライン、ラプチャディスク破断用の窒素ガス (N₂ Gas) ライン、圧力容器内の水を所定の温度と圧力まで加熱するヒーター系、圧力容器と格納容器の安全弁 (格納容器にはラプチャディスクが代用されている) 作動時の蒸気を屋外へ排出するライン、および各種計装機器よりなるものである。

圧力容器は、高温・高圧の飽和水をつくり、格納容器へ飽和水と蒸気の混合物を供給するもので、その主要寸法を図3-4に示す。すなわち、圧力容器は、高さ約2650mm、内径550mmであって、ヒーター取付フランジが最下部にあり、ヒーターを下からさし込む構造になっている。また、格納容器へ蒸気を放出する放出系取付ノズル (Blowdown Nozzle) は容器の上部に取付けられており、本装置によるブローダウ

ンは蒸気の流出量が多い上部破断を模擬するものである。

圧力容器の主要仕様は以下の通りである。

形式	縦置円筒形中間フランジ付
寸法	内径 550mm 高さ 2650mm 内容量 0.484m ³
圧力	設計 150kg/cm ² g 常用 137kg/cm ² g
温度	設計 341°C 常用 334°C
材質	S F 45
安全装置	安全弁 { 吹出圧 150kg/cm ² g 吹止圧 139kg/cm ² g

圧力容器から流出してきた高温高圧の蒸気・水混合物により格納容器内の各部の温度や圧力がどのようになるかを調べるのが本実験の目的である。格納容器は図3-2、図3-3に示すように上半分のドライウェルおよび下半分の圧力抑制室 (Wetwell 又は Suppression chamber) からなるものであって、ドライウェルと圧力抑制室はベント管 (Vent tube) で結ばれている。図3-5に格納容器の主要寸法を示すが、格納容器は内径1200mm、高さ約3700mmである。圧力抑制室から流出してきた飽和水-蒸気はまずドラ

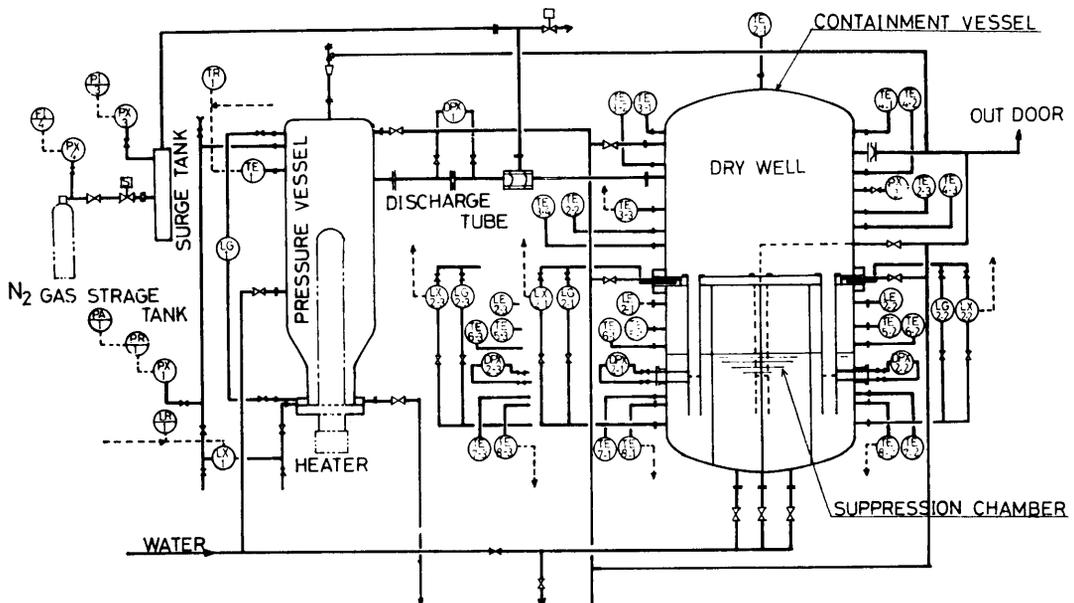


図 3-2 Flowsheet of Experimental Equipment

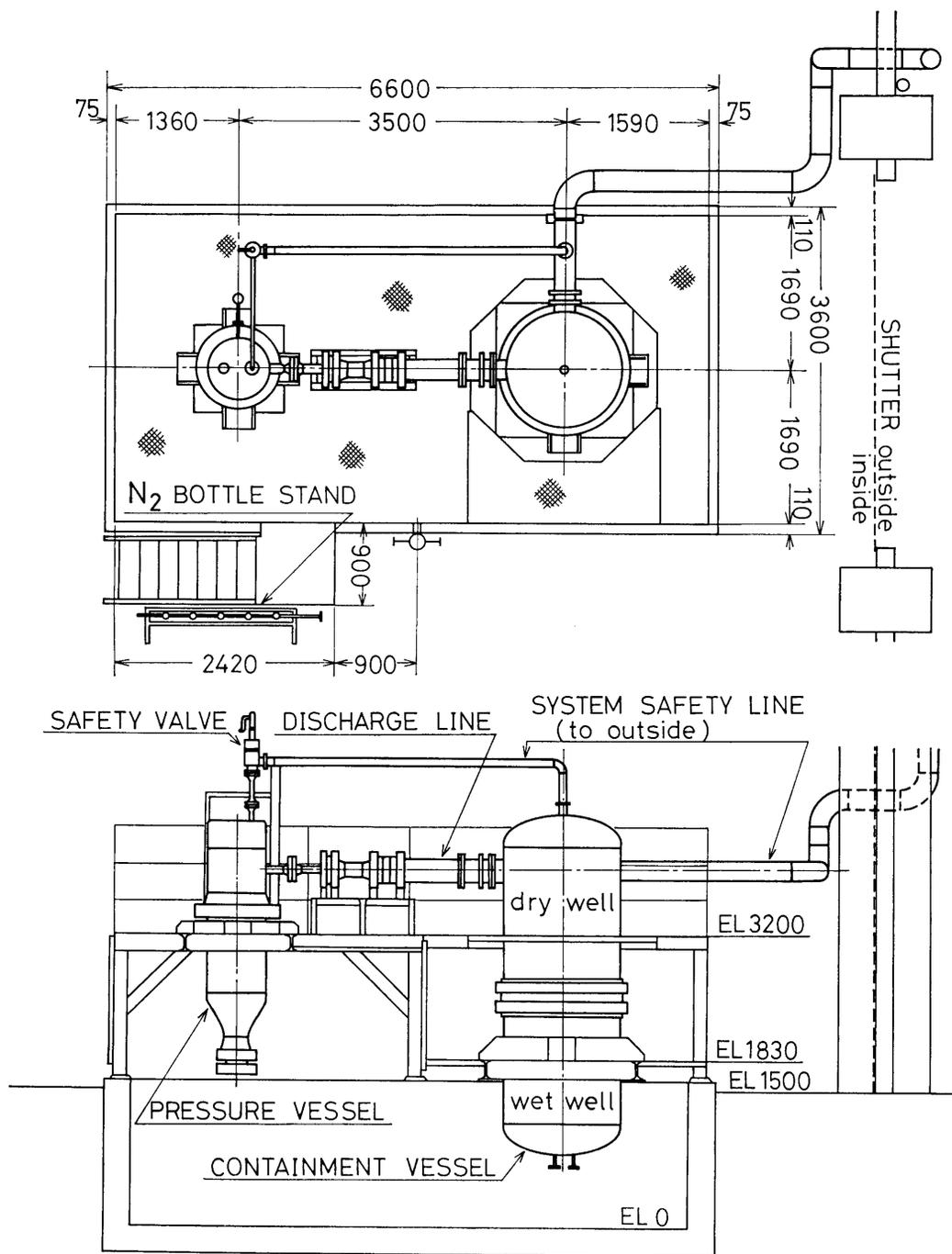


图 3-3 Experimental System Outline

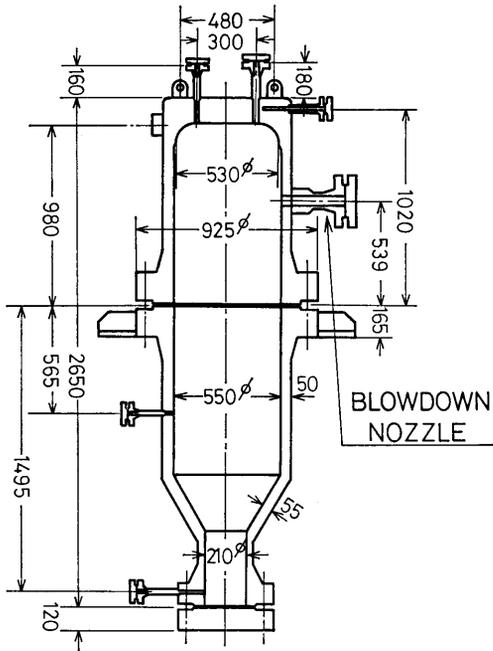


図 3-4 Pressure Vessel Details

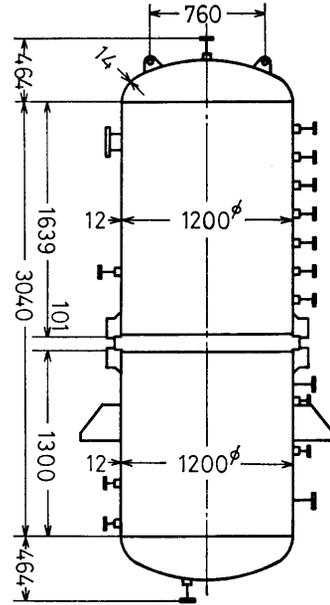


図 3-5 Containment Details

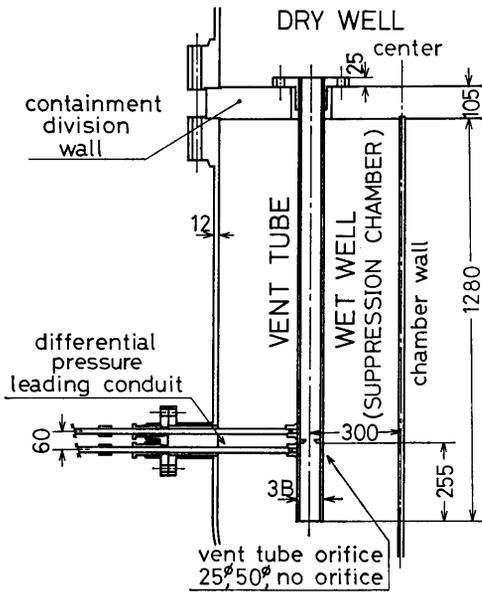


図 3-6 Vent Tube Details

イウェルに入り、ドライウェルからベント管を通して
 圧力抑制室へ入る。圧力抑制室は3室に等分割されて
 いるのでベント管は3本取付けられている。

格納容器の主要寸法は以下の通りである。

形式 堅置円筒形、中間フランジにドライウェル
 一圧力抑制室仕切板をはさむ。圧力抑制室は
 3室

寸法 内径1200mm、高さ3700mm、内容量、ド
 ライウェル2.1m³、圧力抑制室1.695m³

設計圧力 15kg/cm²g

設計温度 200℃

材 質 S B 42

安全装置 ラブチャディスク破裂圧力13kg/cm²g
 (20℃)

図 3-6 にベントチューブの詳細図を示す。ベント
 チューブは内径75mm (3B) 長さ約1400mmであっ
 て、図に示すように、ベント管出口から 255mm のと
 ころに口径25mm、および50mmのオリフィスを取付
 けたものもある。なお、ドライウェルと圧力抑制室間
 の最大差圧を 15kg/cm² として仕切板を設計し、また
 3室に分れた各圧力抑制室間は最大 1kg/cm² を設計
 差圧としている。

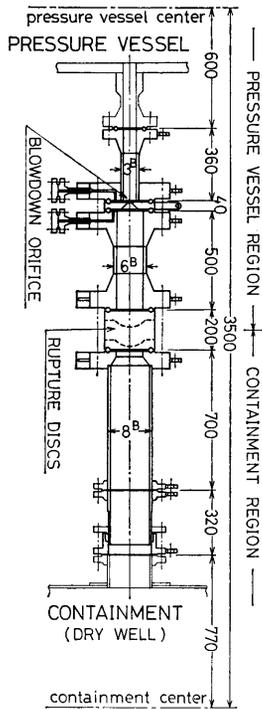


図 3-7 Discharge Line Details

放出系 (Discharge Line) は、圧力容器と格納容器のドライウェルを結びつけるもので、圧力容器からのブローダウン (飽和水・蒸気の流出) を模擬するものである。すなわち、図 3-7 に詳細を示すように、放出系は圧力容器と格納容器の放出系取付ノズル間に設けられており、圧力容器側からオリフィスとラプチャディスク、およびそれらを結ぶ配管からなる。放出系オリフィスの口径は破断口の大きさを模擬するもので 6 mm, 12mm, 24mm の 3 種類である。

ラプチャディスク (Rupture Disc) は、破断を模擬するもので、所定の条件の時にブローダウンを開始できる構造になっている。すなわち、本装置に使用したラプチャディスクは 2 連式であって 2 枚のラプチャディスク間に窒素ガス (N_2 ガス) で圧力容器内圧力の約半分の圧力に加圧しておき、ブローダウン開始時にこのガスを抜くことにより、順次破断させるものである。すなわち、実験開始時の圧力容器内の圧力を P_1 (kg/cm^2) とし、1 枚のラプチャディスク破断差圧を P_R (kg/cm^2) とする。 $P_1 > P_R > \frac{P_1}{2}$ となるようにラプチャディスクをえらんでおけば、2 枚のラプチャ

ディスク間に N_2 ガスで $\frac{P_1}{2}$ の圧力をかけた場合、格納容器圧力が大気圧なので、それぞれのラプチャディスク差圧はいずれも $\frac{P_1}{2}$ である。この時は、 $P_R > \frac{P_1}{2}$ なので、ラプチャディスクは破裂しない。2 枚のラプチャディスク間の N_2 ガスを抜くと、まず圧力容器側のラプチャディスク差圧が P_R を越えて破裂し、飽和水、蒸気が流れ込み、それに伴って格納容器側ラプチャディスク差圧が P_R を越えて破裂が生じる。この P_R としては、実験圧力約 $140 \text{ kg}/\text{cm}^2$ にあわせ 340°C で $95 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($+6\%$ / -3%) のものをえらんだ。

なお、放出系配管は熱膨脹にそなえ、伸縮量 60mm の伸縮継手が備えられている。

写真 3.1 は、正面からみた実験装置全体図で、左側が圧力容器、右側が格納容器であり、放出系が両容器をつないでいる。写真 3.2 は、実験装置の架台上の部分を裏側からみたもので、右側が圧力容器、左側が格納容器である。

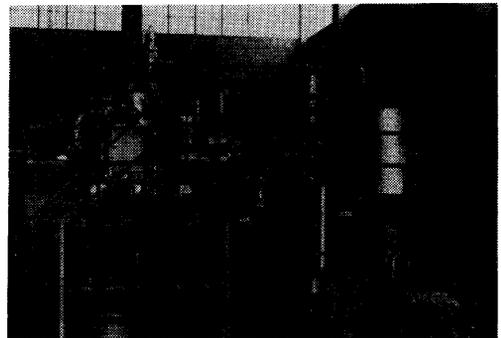


写真 3.1 装置正面写真

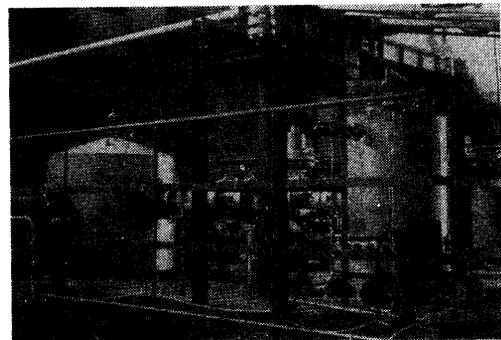


写真 3.2 装置裏側写真

3.3 計装と記録

本実験では圧力容器および格納容器内の圧力・温度

表 3-2 検出端および検出器一覧

記号	名称	検出変換器	検出変換器仕様
TE-1	圧力容器内温度	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
TE2-1 TE2-2, 3	ドライウエル上鏡内壁温度 ドライウエル側面内壁温度	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
TE3-1~4 TE4-1~3	ドライウエル内部温度	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
TE5-2 TE6-2 TE7-1 TE8-1	第1抑制室内温度	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
TE5-3 TE6-3 TE7-2 TE8-2	第2抑制室内温度	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
TE5-1 TE6-1 TE7-3 TE8-3	第3抑制室内温度	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
PX1	圧力容器内圧力	ヘリカルブルドン管	レンジ:0~250kg/cm ² , 出力:4~20mADC
PX2 PX5-1 PX5-2 PX5-3	ドライウエル内圧力 第1圧力抑制室内圧力 第2圧力抑制室内圧力 第3圧力抑制室内圧力	ヘリカルブルドン管	レンジ:0~25kg/cm ² 出力:4~20mADC
DPX1	放出系オリフィス差圧	電子式DPセル	レンジ:0~140kg/cm ² , 出力:4~20mADC
DPX2-1 DPX2-2 DPX2-3	第1ベントチューブ差圧 第2ベントチューブ差圧 第3ベントチューブ差圧	電子式DPセル	レンジ:0~15kg/cm ² , 出力:4~20mADC
LX1	圧力容器内水位	電子式DPセル	レンジ:0~2.5mH ₂ O, 出力:4~20mADC
LX2-1 LX2-2 LX2-3	第1抑制室内水位 第2抑制室内水位 第3抑制室内水位	電子式DPセル	レンジ:0~1.5mH ₂ O, 出力:4~20mADC
LE2-1 LE2-2 LE2-3	第1抑制室内水位 第2抑制室内水位 第3抑制室内水位	電極式	レンジ:0~0.76mH ₂ O,
	圧力容器内圧力		レンジ:0~200kg/cm ²
	ドライウエル内圧力 第2抑制室内圧力 第2ベントオリフィス上流圧力 第2ベントオリフィス下流圧力 第2ベントオリフィス下流圧力	ヒズミ計式 (エンジン指圧計)	レンジ:0~30kg/cm ²

および差圧（水位測定を含む）の測定を行った。実験装置上の各計測点の位置を図3-2の実験装置フローシートに示す。また、各検出端および検出器の一覧を表3-2に示す。同表には、後に詳細を示すエンジン指圧計による圧力計測についても示されている。

図3-8, 3-9はドライウエルおよびウェットウエルにおける各温度測定点の位置の詳細である。これらの検出器からの出力信号は、エンジン指圧計によるものは動歪計を、また残りの信号は直流増巾器を通して記録計への入力信号とした。記録計は、短時間の過

渡変化記録にはビジュグラフを使用し、また、長時間の自然冷却過程の記録には、打点式記録計とデジタルポルトメータを並用した。これらの概念図を図3-10に示す。

4. 実験方法

4.1 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、これを破断口を模擬するオリフィスを通して格納容器内へ流入させることによってブローダウン現象を

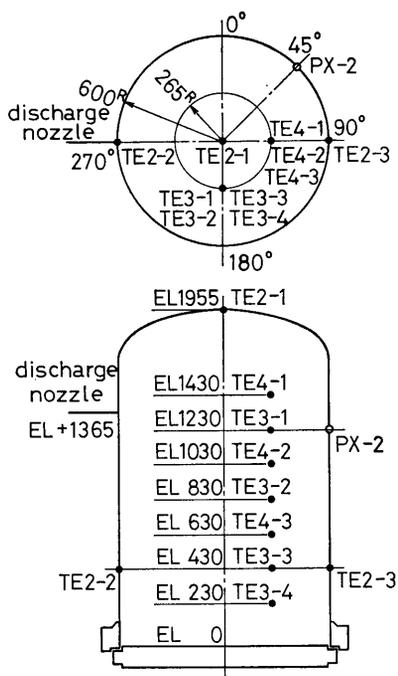


図 3-8 Location of Thermocouples and Pressure Pickups in Drywell

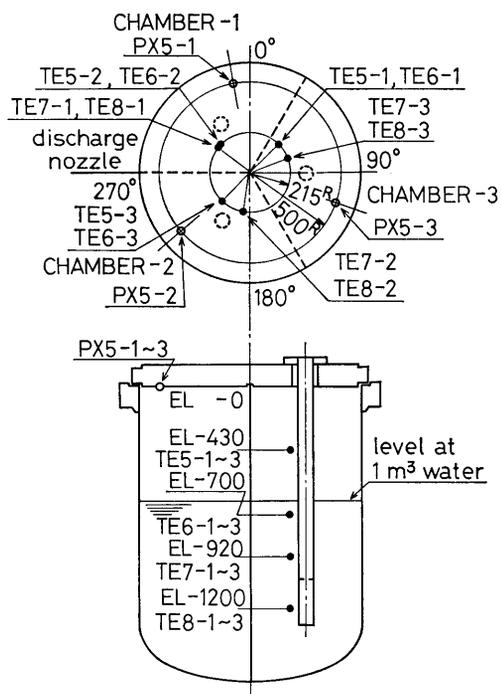


図 3-9 Location of Thermocouples and Pressure Pickups in Wetwell

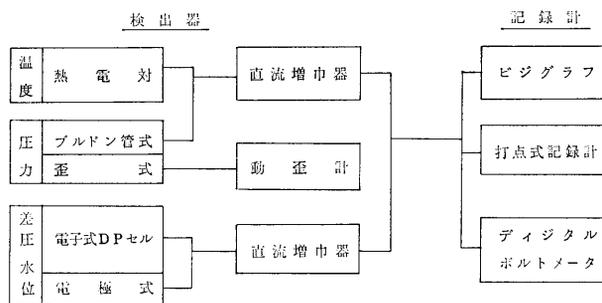


図 3-10 計装記録概念図

模擬するものであって、この時のドライウェルとウェットウェルよりなる格納容器内の圧力、温度等の過渡的变化を記録することにより、ブローダウン時の格納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。

実験は以下の手順で行う。まず、実験条件に従って、格納容器内のベント管および放出系オリフィスを取付け、さらにラプチャディスクを取付ける。次いで、圧力容器内、およびウェットウェル内の水量を所定の値にする。一方、計測系の準備を行い、必要なも

のは検定値をとる。準備が整ったところで、圧力容器のヒーターをONにして、加熱を開始する。水温が100°Cを越えたところで、脱気のためのブローを行い、その後、弁を閉じて加圧を開始する。圧力容器内圧力が80kg/cm²gを越えるあたりから2枚のラプチャディスク間をN₂ガスによって加圧し、圧力容器内圧力の約1/2の値を保つよう調整しつつ圧力容器内圧力を上昇させる。所定の圧力条件となったところで記録計をスタートさせる。そして、空気作動弁の操作によりラプチャディスク間のN₂ガスを抜くことにより、順次

2枚のラプチャディスクを破裂させてブローダウンを生じさせる。数十秒から数十分にわたる過渡状態後、ある定常値に落ち着いたところで、実験終了となるが、5回の実験ではその後数時間から10数時間にわたる自然冷却時の現象についても打点式記録計等による記録を行った。

本実験により生ずる現象をまとめると以下のようになる。すなわち、ラプチャディスクの破裂に関しては、オリフィス口径が大きい場合2枚のラプチャディスクはほとんど同時に破裂するが、オリフィス口径が小さい場合、1枚のラプチャディスクの破裂が生じたあと、蒸気の供給が小さいため次のラプチャディスクが破裂するまで1呼吸の時間のおくれがあった。

発生する音に関してはブローダウン時にドンという音がして、その後シャーバババという音が続いたが、全般的に圧力容器と格納容器内という閉じた空間内での現象であるため周囲への騒音はそれほど大きなものではなかった。そのほか、ブローダウン直後にウェットウエル内の水位に数秒以内の飛び上りが生じたこと、ベント管内に絞りがある時、ベント管の出口部に大きな圧力振動がみられること、自然冷却時にウェットウエル水のドライウエル内への逆流と、空気の同伴

に伴って装置全体をゆるがす振動が生じたことなど、いくつかの特徴的な現象が観察された。

なお、圧力測定にペローズ式工業計器を使用したのが、特に、ブローダウン直後に衝撃に伴う計器の固有振動が記録されるため、後にヒズミ計式圧力計による記録との対応から修正を行った。

4.2 実験条件

実験は総計13回行った。その実験条件を表4-1に示す。すなわち、ドライウエルとウェットウエル間のベント管(内径75mm)に絞りオリフィスがない場合を6ケース、口径25mmのオリフィスを取付けたベント管によるもの4ケース、および口径50mmのオリフィスを取付けたベント管によるもの3ケースである。ブローダウンオリフィスは口径6mm、12mm、24mmの3種をパラメータとした。ブローダウン開始時における圧力容器内流体の初期飽和水条件は、圧力が137~140kg/cm²g(2ケースについて100kg/cm²g)であって、水量は全ての実験において約0.37m³とした。

ウェットウエル中における水位は、ベント管の下端から上方へ約0.5mのいわゆる低水位(Low Level)と、約0.8mの高水位(High Level)について行ったが、No.1とNo.10実験ではその中間の水位で実験し

表4-1 実験条件一覧

実験番号	ベント管オリフィス口径	ブローダウンオリフィス口径	圧力容器内初期圧力	圧力抑制室内水位*				自然冷却実験	圧力振動測定
				水位	第1	第2	第3		
1	無 (75) ^{mm}	24mm	137kg/cm ² g	中	-m	-m	-m	-	-
2	無 (75)	6	137	高	0.72	0.73	0.75	-	-
3	無 (75)	6	100	高	0.78	0.81	0.79	-	-
4	無 (75)	12	137	高	0.79	0.81	0.79	-	-
5	無 (75)	12	137	低	0.45	0.46	0.45	-	-
6	無 (75)	12	100	低	0.45	0.47	0.45	実施	-
7	25	12	137	低	0.47	0.48	0.47	実施	-
8	25	12	140	高	0.78	0.80	0.78	実施	実施
9	25	6	140	高	0.79	0.81	0.79	-	実施
10	25	24	140	中	0.62	0.62	0.62	-	測定できず**
11	50	24	140	低	0.56	0.57	0.55	実施	実施
12	50	12	140	低	0.52	0.52	0.52	-	実施
13	50	6	140	低	0.55	0.57	0.55	実施	実施

* ベント管先端から測った高さ

** ドライウエルの安全弁としてのラプチャディスクが5秒で破裂したため測定できず

た。(No. 1 実験は正確な水位の測定を行わなかった。) 3室の水位が一致するよう弁の開閉で調整したが、表でみるように数 cm の不一致はさけることができなかった。

ブローダウン終了後、数時間から10数時間にわたってそのまま放置し、自然冷却過程の現象を打点式記録計により記録するいわゆる自然冷却テストを5回のケースについて行った。

また、3.3節で説明したようにエンジン指圧計により本装置各部の圧力振動の測定を5ケースについて行った。

なお、No.10 実験はベント管のオリフィス口径が25mmと最も絞った状態であり、かつ、ブローダウンオリフィス口径は24mmと最も大きな状態の組合せであったため、ドライウェル圧力がブローダウン開始後急上昇し、約 5 sec でドライウェルに取付けた安全弁としてのラプチャディスクの破壊が生じ圧力が低下したため、圧力振動を含めそれ以後のデータはとれなかった。

4.3 実験データの整理

自然冷却テストにおける打点式記録計とデジタルポルトメータによる記録を除き、記録は全てビジグラフによって行った。温度と圧力および差圧については検定値との比較から実際の値へ変換して、各値の時間的変化として整理した。そのうち、特に重要な圧力容器内圧力、ドライウェル内の圧力、ドライウェル壁面と空間部の温度、ウェットウェルの温度について、5章に実験結果として示した。なお、ドライウェルの空間部の温度は全てほとんど同じ値を示したため特に1点TE 4-2で代表させて示した。また、ウェットウェルの圧力は、ベント管オリフィス絞りが無い場合には、ほとんどドライウェル内圧力に一致したが、ベント管絞りがある場合には差圧が生じた。この場合には差圧あるいはドライウェルとウェットウェルの両方の圧力を示すことで整理した。

図4-1はウェットウェル内の水位測定用差圧計の出力と水位との関係を示したもので、図にはベント管、圧力抑制室の直視式水面計、及び電極式水位計の相対的位置も同時に示してある。ビジグラフの記録とこの検定値とにより、特にブローダウン直後の液面の飛び上りに関する測定を行った。

自然冷却時の現象は、約10時間にわたる長時間のため、打点記録計によるドライウェルおよびウェットウェル各室の水温の時間的変化として整理したが、同時

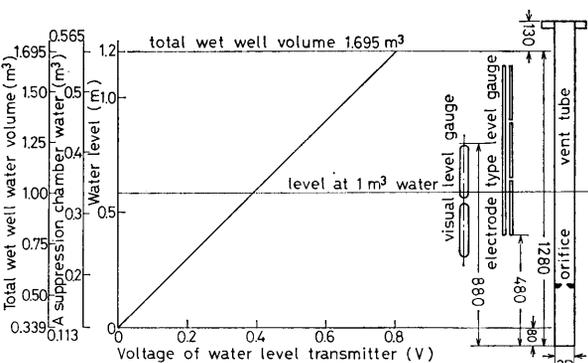


図 4-1 差圧式水位計出力と水位の関係

に、各圧力抑制室内の水面の変化もデジタルポルトメータで記録し、温度変化と対応させて現象の把握を行った。

ブローダウン時の圧力抑制室内各部の早い圧力変化を正確にとらえるため、エンジン指圧計による測定を行った。ベント管絞りが25mmで、ブローダウンオリフィスが12mmの場合に、ベント管出口部で激しい圧力振動がみられた。

5. 実験結果

5.1 圧力・温度特性

ブローダウンに伴う、圧力容器および格納容器内各部分における圧力と温度の時間的変化について、各実験ごとに図5-1～図5-13に示す。実験は大きく分けて、ベント管オリフィスに絞りを付けなかった6回の実験、ベント管オリフィスとして口径25mmのものを用いた4回の実験、およびベント管オリフィス口径50mmの3回の実験の3つに分類できる。

(1) ベント管オリフィスに絞りのない場合

実験1～実験6は、ベント管オリフィスとして絞りが無い場合である。図5-1は実験1に関するものであり、図5-1(a)は圧力容器内圧力の時間的変化、図5-1(b)は格納容器内圧力の時間的変化、図5-1(c)はドライウェル内各部の温度の時間的変化、図5-1(d)はウェットウェル内各部の温度の時間的変化を示す。図5-1(a)は圧力容器内圧力の時間的変化であって、破断オリフィス口径が24mmと最大であるため、30秒程度のブローダウン時間となっている。図5-1(b)は格納容器内の圧力の時間的変化である。ベント管オリフィスに絞りが無いため、ドライウェルとウェットウェルは常にほとんど同じ圧力を示した。図5-1

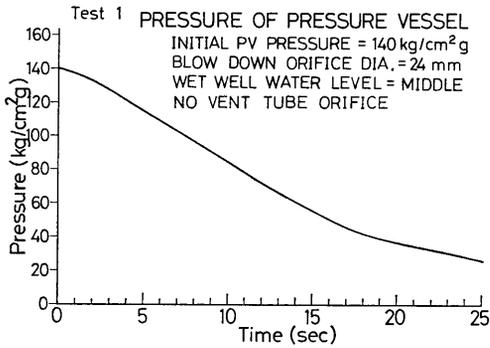


図 5-1 (a) No.1 実験の圧力容器内圧力

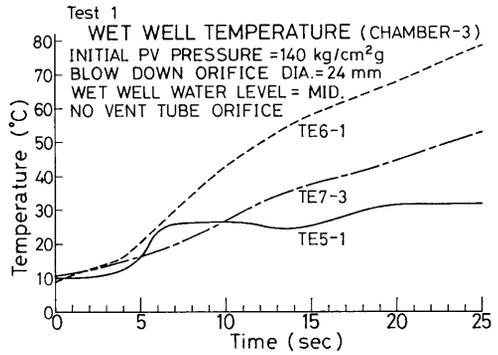


図 5-1 (d) No.1 実験のウェットウェル温度 (第3 圧力抑制室)

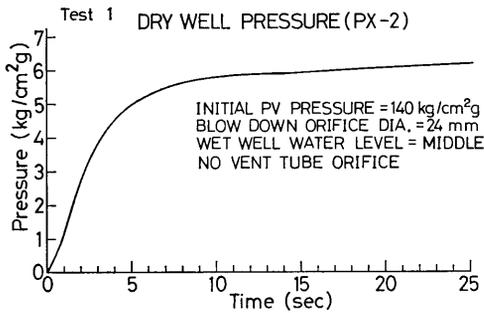


図 5-1 (b) No.1 実験のドライウェル圧力

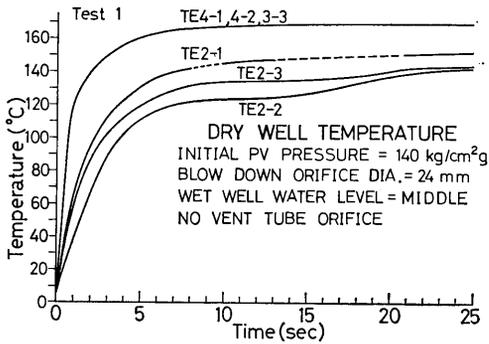


図 5-1 (c) No.1 実験のドライウェル温度

(c)はドライウェル内の温度の時間的変化である。TE 4-1 等は各温度計の取付位置を示すもので、図 3-8 にその詳細がある。すなわち、TE 4-1, 4-2, 4-3 はドライウェル内部の垂直方向 3 点の温度変化であって、3 点共ほとんど同じ温度を示すことがわかる。また、TE 2-1, 2-2, 2-3 はドライウェル内壁温度変化であって、ドライウェル内頂部の TE 2-1 の温度の上昇が最も大きく、次が、放出系取付ノズルに對面する位置にある TE 2-3 で、最もおそい温度上昇は、放出系取付ノズル側の位置にある TE 2

—2 である。

図 5-1 (d)は、第 3 圧力抑制室のウェットウェル内の温度の時間的変化を示すもので、温度計の各取付位置の詳細は図 3-9 に示してある。第 3 圧力抑制室は放出系取付ノズルに對面する最も遠い位置にある圧力抑制室であって、TE 5-1, 6-1, 7-3 は垂直方向の温度分布を示す。一般に空気部温度である TE 5-1 が最も低い温度の上昇であり、水部で上方にある TE 6-1 が最も大きな温度の上昇を示す。また水部で下方の TE 7-3 がその中間の温度の上昇を示す。

図 5-2 は、実験 2 に関するもので、図 5-1 と同様に図 5-2 (a)~図 5-2 (e)まで各圧力と温度の変化を示す。ただし、今回は、ウェットウェル温度の変化を第 2 圧力抑制室と第 3 圧力抑制室の両室について示した。

実験 2 は、放出オリフィス口径が 6 mm と最も小さなブローダウン口径であるため、図 5-2 (a)に示すようにブローダウン時間は 5 分以上とゆっくりしたもの

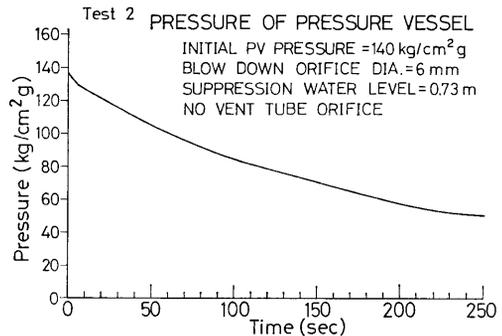


図 5-2 (a) No.2 実験の圧力容器内圧力

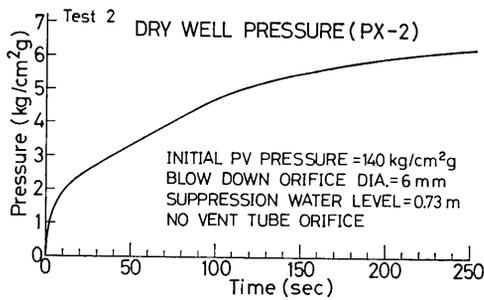


図 5-2 (b) No.2 実験のドライウェル圧力

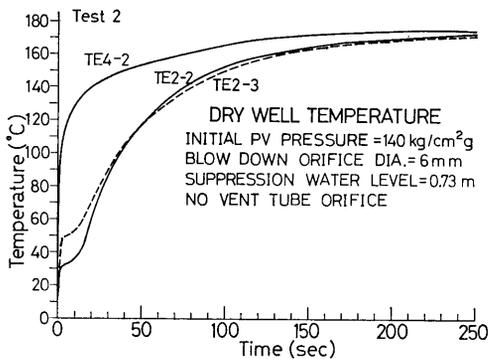


図 5-2 (c) No.2 実験のドライウェル温度

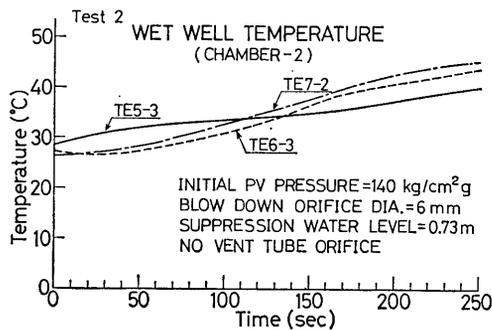


図 5-2 (d) No.2 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

になっている。それと共に図 5-2 (b) に示すように格納容器の圧力上昇もゆっくりしたものとなる。

図 5-2 (d)(e) はそれぞれ第 2 圧力抑制室と第 3 圧力抑制室のウェットウェルの各温度の変化を示すものである。この場合、両図ともに特徴的なことは、まず、空気部の TE 5-1 又は TE 5-3 の温度が上昇し、時間の経過と共に、水温が上昇することである。そして水中の中程の位置にある TE 7-2 又は 7-3 が最も高い温度を示し、次いで上方の TE 6-3 又は 6-

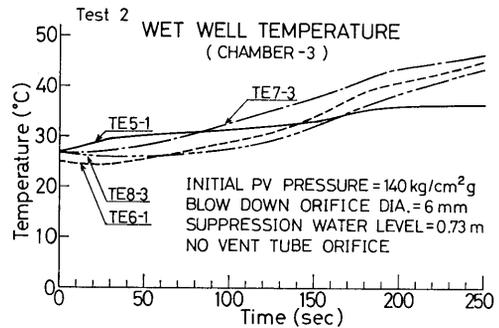


図 5-2 (e) No.2 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

1 であって、最も低いのが下方にある TE 8-3 であることである。これは、ゆっくりしたブローダウン過程における水の対流と熱の放散の組み合わせた効果と考えられる。なお、TE 2-1 と TE 2-2 はほとんど同じ時間的変化を示した。

図 5-3 は、実験 3 の結果であり、压力容器内の初期圧力を約 100 kg/cm²g としただけで、ほぼ実験 2 と同条件での実験である。ブローダウン時間はほぼ同じであるが、压力容器から流入する流体の流量やエネルギーが、実験 2 とくらべ小さいため、図 5-3 (b) で示す

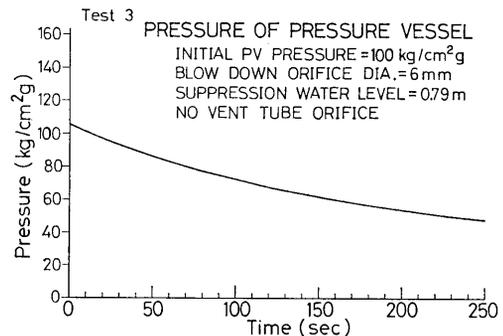


図 5-3 (a) No.3 実験の压力容器内圧力

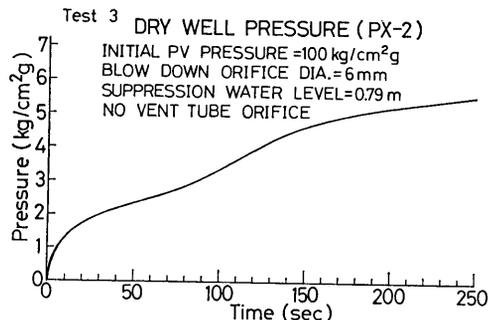


図 5-3 (b) No.3 実験のドライウェル圧力

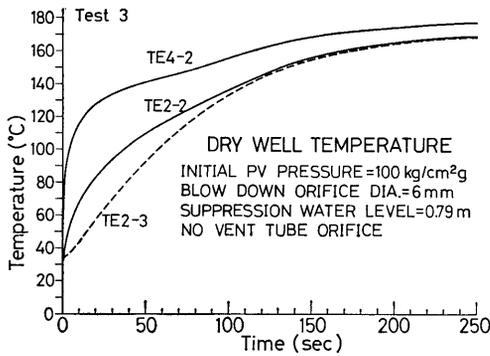


図 5-3 (c) No.3 実験のドライウェル温度

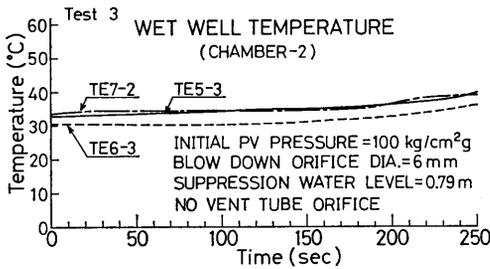


図 5-3 (d) No.3 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

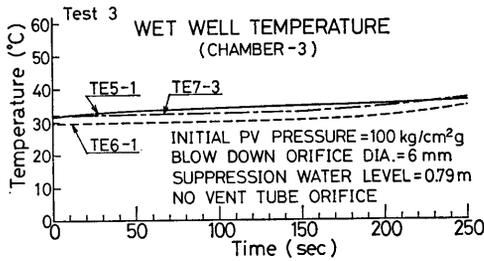


図 5-3 (e) No.3 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

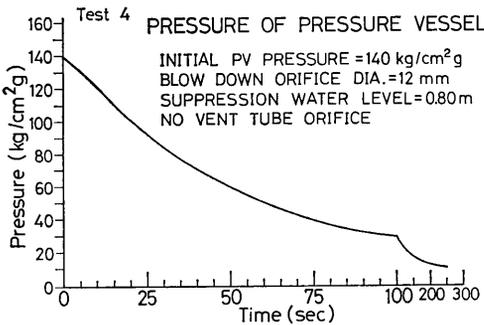


図 5-4 (a) No.4 実験の圧力容器内圧力

ドライウェル圧力, 図 5-3(e)のドライウェル温度, 図 5-3(d)(e)のウェットウェル温度とも図 5-2 の対応するものと比較し, 若干低くなっている。

図 5-4 (a)~(e)は実験 4 の結果であり, プロダクションオリフィス径を12mmとした場合である。これらの図では, 100秒以後時間スケールを縮めてある。また, 図 5-5 (a)~(e)は実験 5 の結果であって, 図 5-4 と

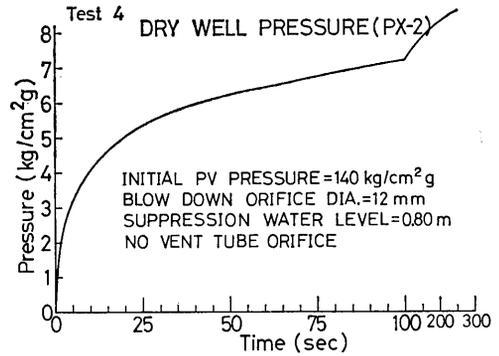


図 5-4 (b) No.4 実験のドライウェル圧力

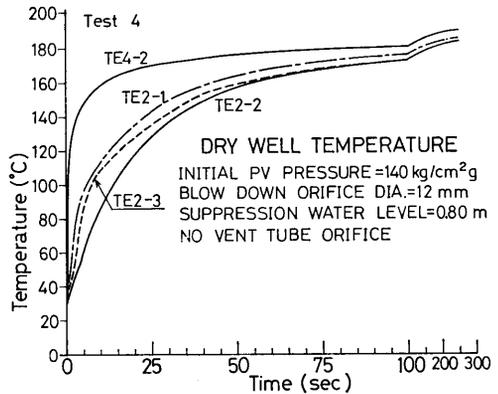


図 5-4 (c) No.4 実験のドライウェル温度

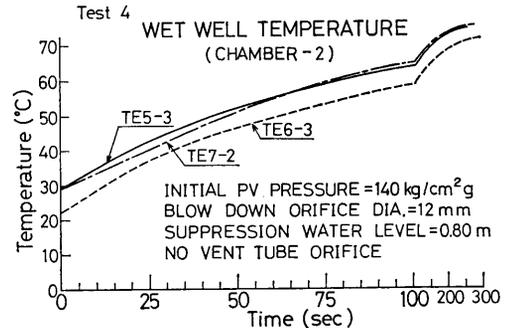


図 5-4 (d) No.4 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

の相違は、ウェットウェルの水位が実験4の方が高く、実験5の方が低いことである。ドライウェル圧力を比較した場合、図5-4(b)の方が図5-5(b)より高いのは水位が高い方がウェットウェル上部空間がせまく、ウェットウェル内へ導かれた空気の圧縮割合が大きいためである。また、圧力が高い方が飽和温度も高く、従って、ドライウェル内温度も実験4の方が高くなっている。さらに、水位が高いと、ウェットウェル

内の熱電対は水中に没したり、初期の水面の飛び上りでぬれたりするものも多く、図5-4(d)(e)のように温度の単調な上昇を示す。これに対し、水位の低い図5-5(d)(e)では、TE5-1やTE5-3のように、熱電対が完全に空気部に出ているため、最初の空気の圧縮による温度上昇を検知できる。

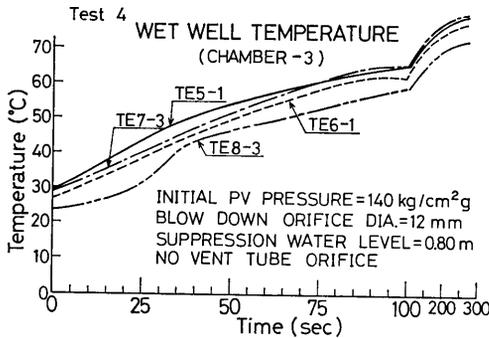


図 5-4 (e) No.4 実験のウェットウェル温度 (第3 圧力抑制室)

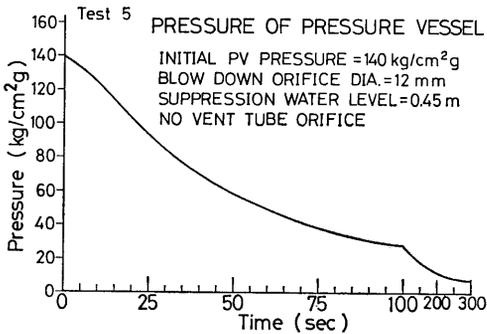


図 5-5 (a) No.5 実験の圧力容器内圧力

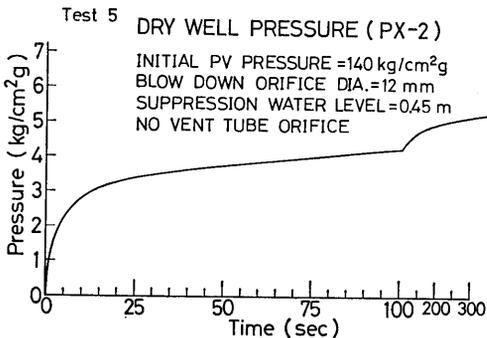


図 5-5 (b) No.5 実験のドライウェル圧力

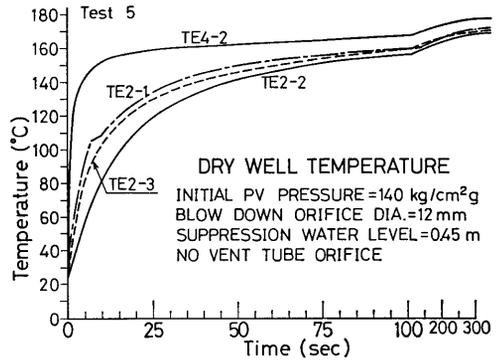


図 5-5 (c) No.5 実験のドライウェル温度

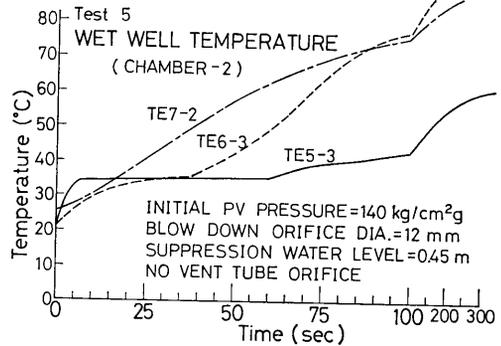


図 5-5 (d) No.5 実験のウェットウェル温度 (第2 圧力抑制室)

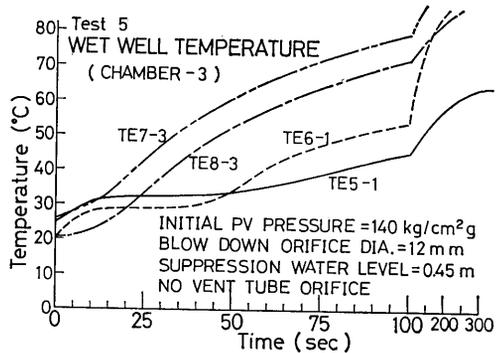


図 5-5 (e) No.5 実験のウェットウェル温度 (第3 圧力抑制室)

図5-6(a)~(e)は、実験6で圧力容器内初期流体圧力を約100kg/cm²gとした場合のもので、実験条件は実験5とほとんど同じである。それ故、実験2と実験3の比較で説明したのと同様に、実験5と絶対値がいずれも小さくなっているだけで、定性的な傾向は一致している。

(2) ベント管オリフィス口径25mmの場合
 実験7~10は、ベント管に25mmの絞りを入れた場

合の結果である。この場合、ドライウェルとウェットウェル間に絞りの効果のため圧力差が生ずるのが特徴である。

図5-7(a)~(f)は、実験7の結果であり、図5-7(b)にドライウェルとウェットウェルの圧力の変化を示し、また、その差圧の変化を図5-7(c)に示す。この圧力差のため、ドライウェルからウェットウェルへの空気と蒸気の移動がおくれるが、ドライウェルとウェ

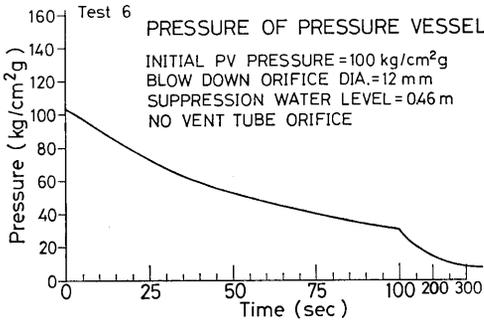


図 5-6 (a) No.6 実験の圧力容器内圧力

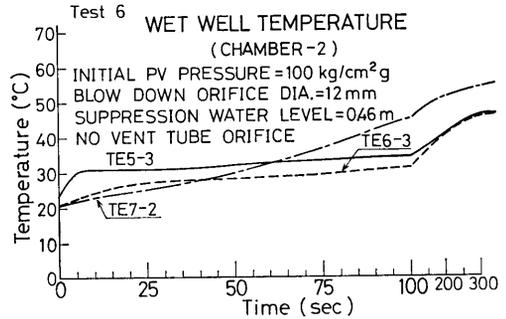


図 5-6 (d) No.6 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

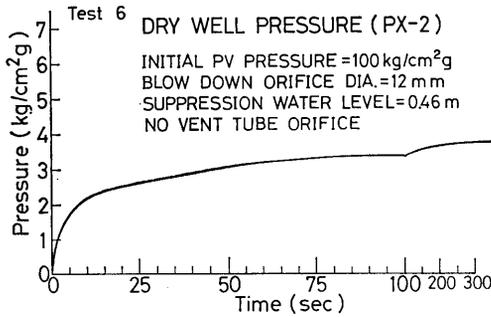


図 5-6 (b) No.6 実験のドライウェル圧力

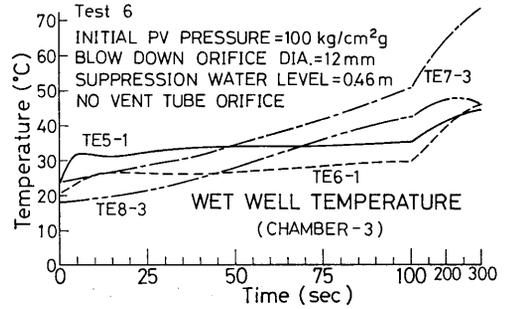


図 5-6 (e) No.6 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

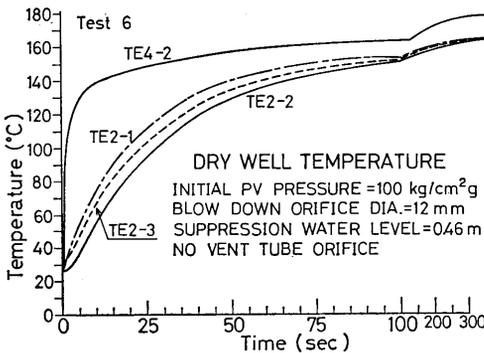


図 5-6 (c) No.6 実験のドライウェル温度

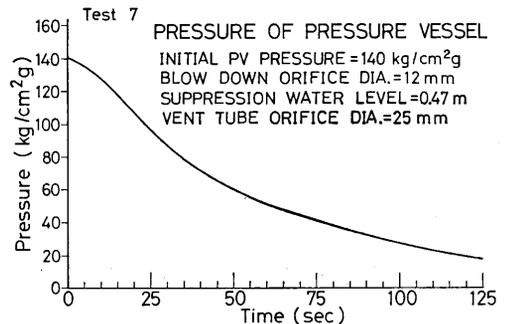


図 5-7 (a) No.7 実験の圧力容器内圧力

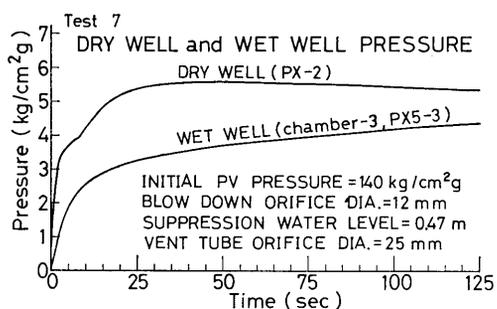


図 5-7 (b) No.7 実験のドライウェルとウェットウェルの圧力

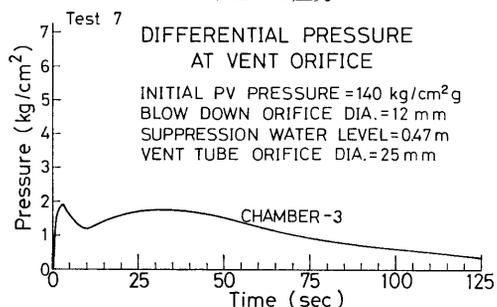


図 5-7 (c) No.7 実験のベント管オリフィス差圧

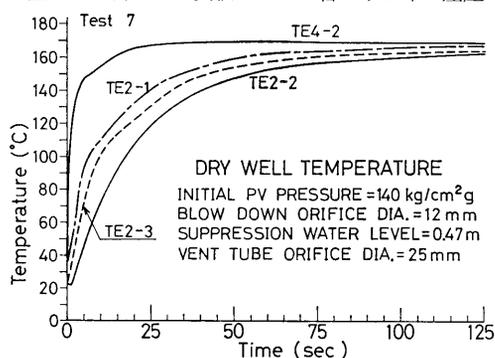


図 5-7 (d) No.7 実験のドライウェル温度

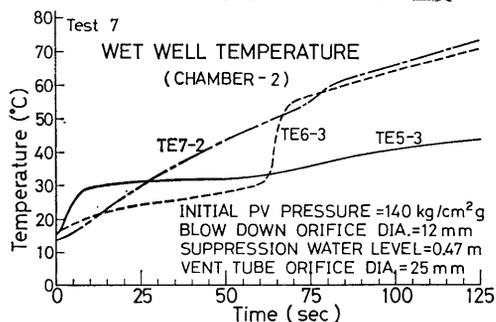


図 5-7 (e) No.7 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

ットウェルの温度分布などは定性的には、ベント管オリフィスがない場合と一致している。

図 5-8 (a)~(f) は実験 8 の結果で、実験 7 と比較し、ウェットウェルの水位が高い。従って、圧力や温度も高く、またウェットウェルの温度は全部水中に没して、単調に増大する。

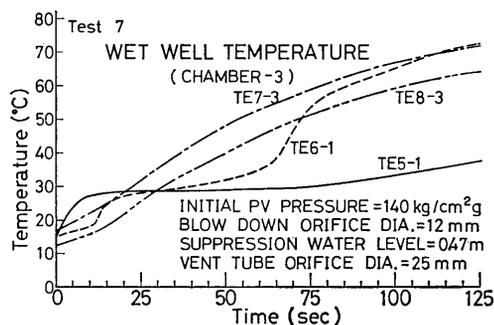


図 5-7 (f) No.7 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

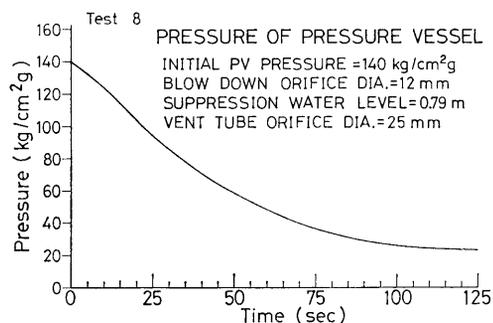


図 5-8 (a) No.8 実験の圧力容器内圧力

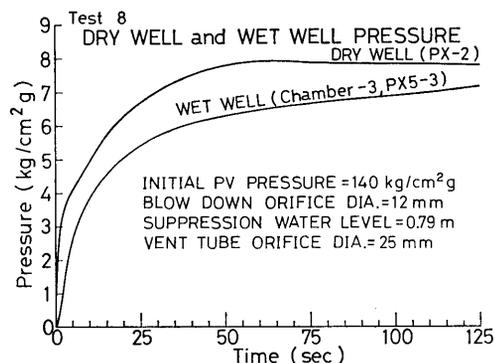


図 5-8 (b) No.8 実験のドライウェルとウェットウェルの圧力

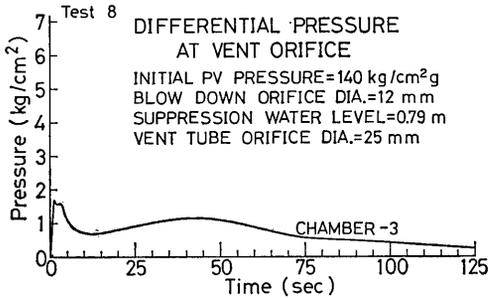


図 5-8 (c) No.8 実験のベント管オリフィス差圧

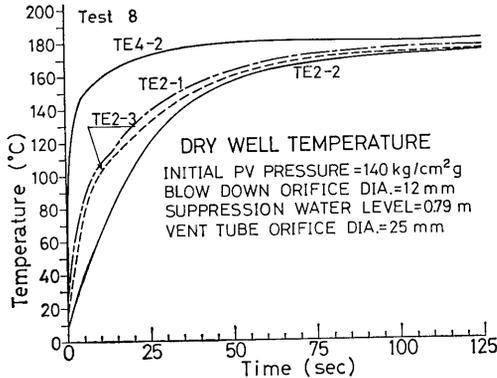


図 5-8 (d) No.8 実験のドライウェル温度

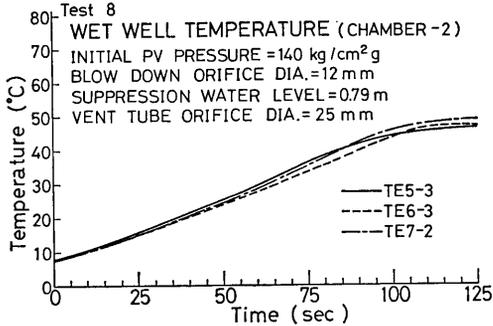


図 5-8 (e) No.8 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

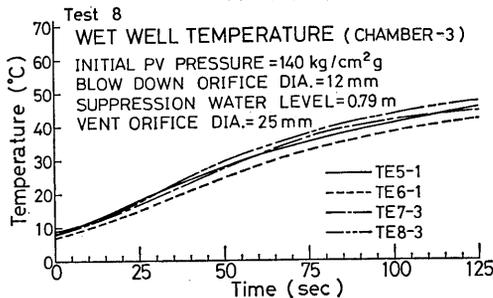


図 5-8 (f) No.8 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

図 5-9 (a)~(f)は実験 9 の結果である。実験 9 では、ブローダウンオリフィス径が 6 mm と最小であるため、圧力容器からの流体の移動速度が小さい。そこで、図 5-9 (b)(c)に示すように、ドライウェルとウェットウェル間の圧力差も小さくなる。そのほか、温度分布等は、ウェットウェル水位が高い場合の特徴を示している。

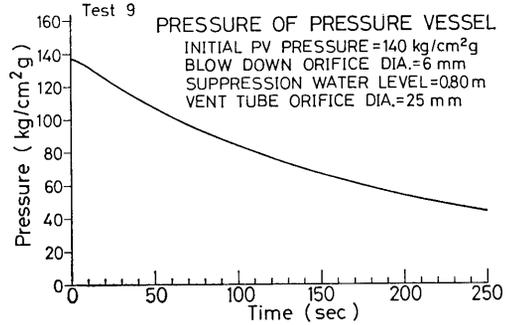


図 5-9 (a) No.9 実験の圧力容器内圧力

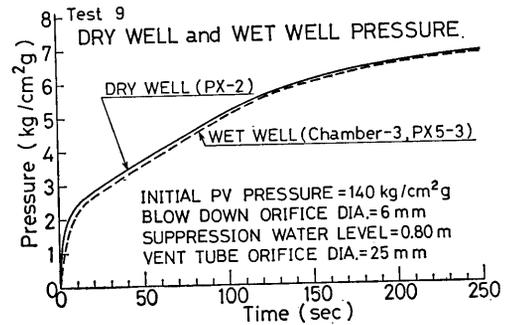


図 5-9 (b) No.9 実験のドライウェルとウェットウェルの圧力

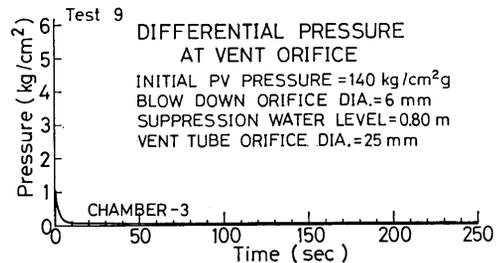


図 5-9 (c) No.9 実験のベント管オリフィス差圧

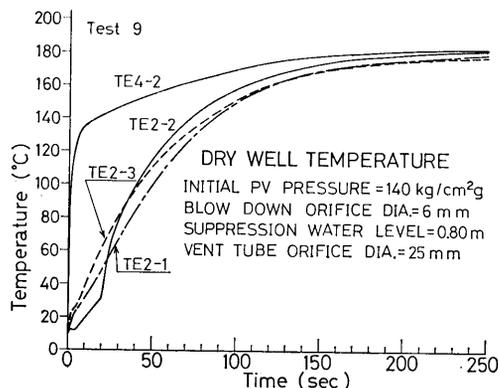


図 5-9 (d) No.9 実験のドライウェル温度

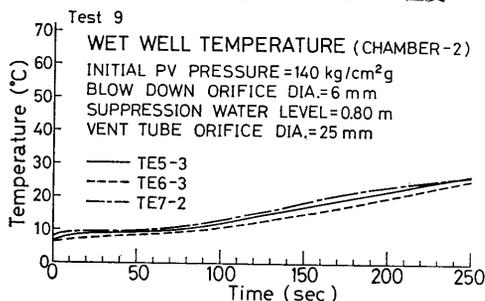


図 5-9 (e) No.9 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

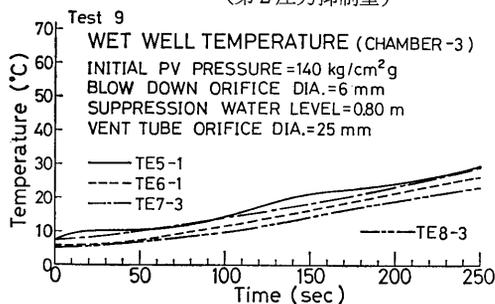


図 5-9 (f) No.9 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

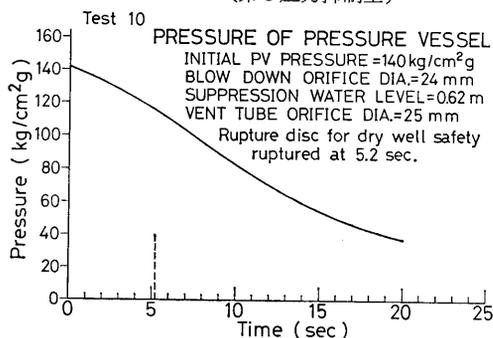


図 5-10 (a) No.10 実験の圧力容器内圧力

図 5-10(a)~(f)は実験10の結果である。ブローダウンオリフィス口径が24mmと最大であるため、ドライ

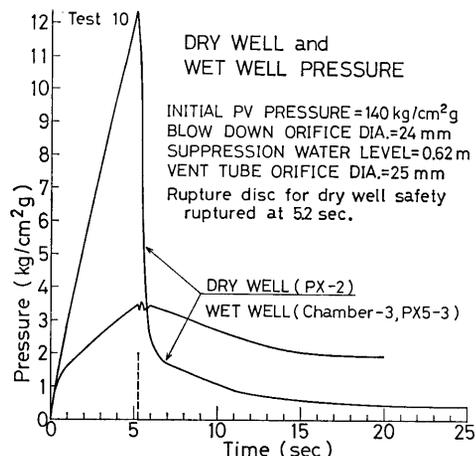


図 5-10 (b) No.10 実験のドライウェルとウェットウェルの圧力

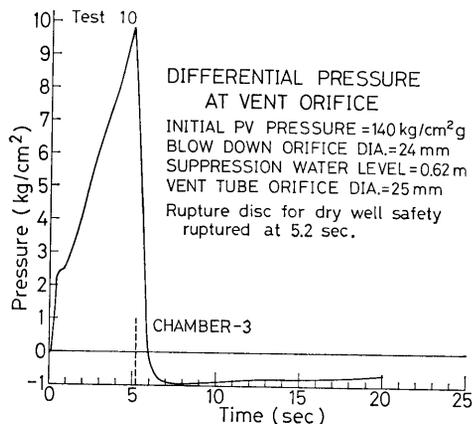


図 5-10 (c) No.10 実験のベント管オリフィス差圧

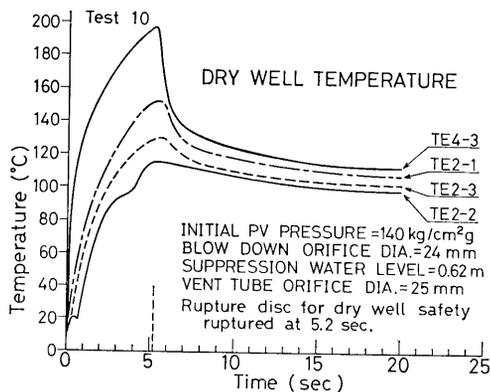


図 5-10 (d) No.10 実験のドライウェル温度

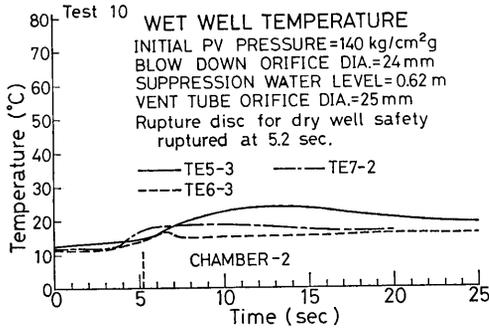


図 5-10 (e) No.10 実験のウェットウェル温度 (第2 圧力抑制室)

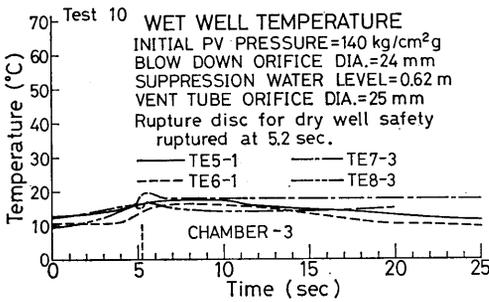


図 5-10 (f) No.10 実験のウェットウェル温度 (第3 圧力抑制室)

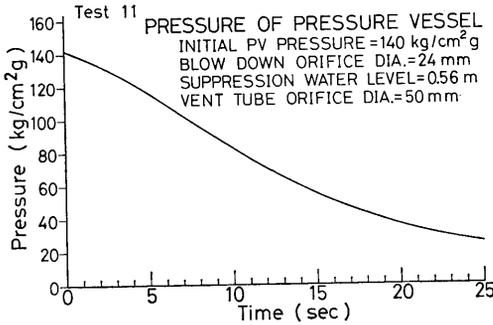


図 5-11 (a) No.11 実験の压力容器内圧力

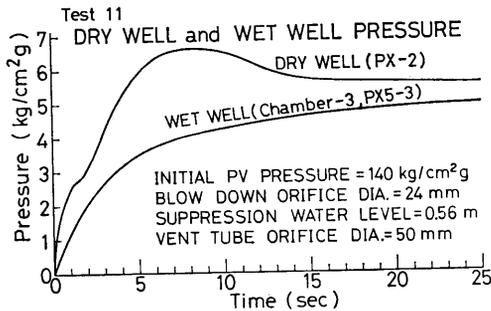


図 5-11 (b) No.11 実験のドライウェルとウェットウェルの圧力

ウェル圧力が急上昇し、5秒すぎに12kg/cm²gを越えてドライウェルに取付けた安全弁としてのラプチャディスクが破裂し、ドライウェル中の蒸気が大気中へ放出した。それ故、5.2秒以後は圧力・温度応答としての正しいデータを示していない。

(3) ベント管オリフィス口径50mmの場合

実験11~13は、ベント管に50mmの絞りを入れた場合である。

図 5-11(a)~(f)は実験11の結果である。ベント管オ

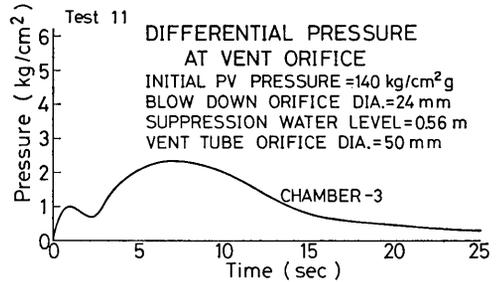


図 5-11 (c) No.11 実験のベント管オリフィス差圧

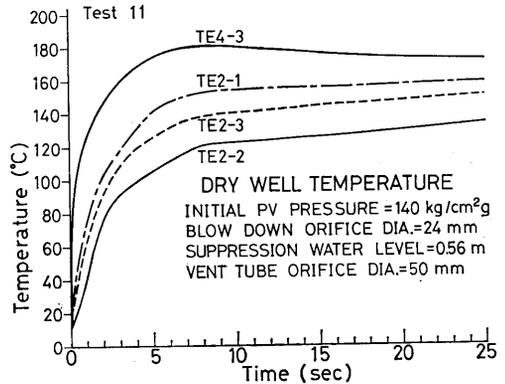


図 5-11 (d) No.11 実験のドライウェル温度

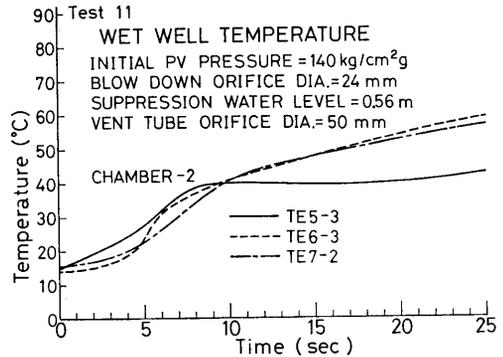


図 5-11 (e) No.11 実験のウェットウェル温度 (第2 圧力抑制室)

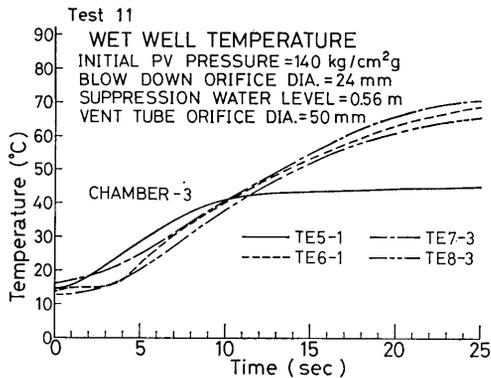


図 5-11 (f) No.11 実験のウェットウェル温度 (第3 圧力抑制室)

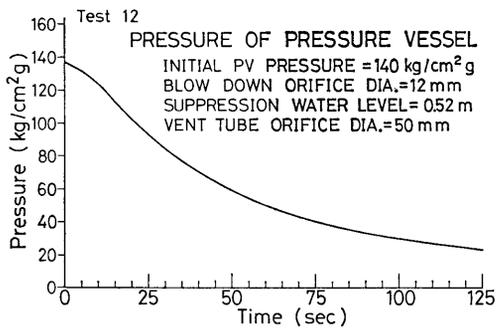


図 5-12 (a) No.12 実験の圧力容器内圧力

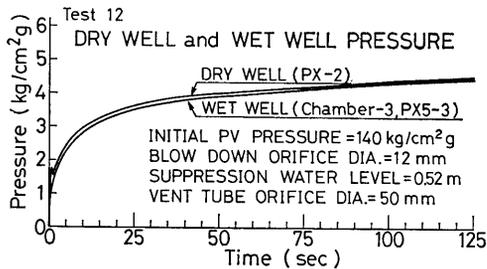


図 5-12 (b) No.12 実験のドライウェルとウェットウェルの圧力

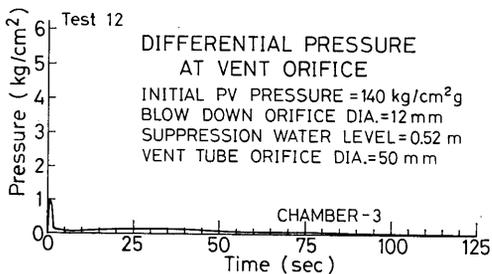


図 5-12 (c) No.12 実験のベント管オリフィス差圧

リフィス径が50mmという中間のものであり、ブローダウンオリフィス径が24mmと最大であるので、図5-11(b)にみるように、ドライウェル圧力に山ができるのが特徴である。ドライウェルとウェットウェル間の差圧も、図5-11(e)のようにドライウェル圧力の山ができる時ピークになる。ドライウェル中の温度TE4-3も、ドライウェル内の圧力に対する飽和温度の変化にあわせて山ができる。

図5-12(a)~(e)は、実験12の結果である。ブローダウンオリフィス径が12mmなので、ドライウェルとウェットウェル間の差圧も小さく、またドライウェル圧

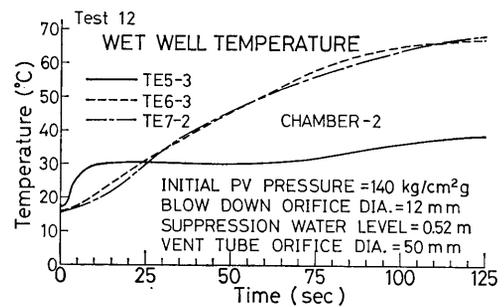


図 5-12 (d) No.12 実験のウェットウェル温度 (第2 圧力抑制室)

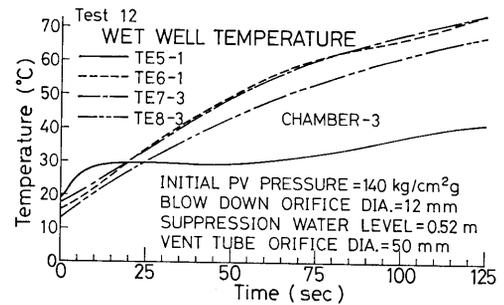


図 5-12 (e) No.12 実験のウェットウェル温度 (第3 圧力抑制室)

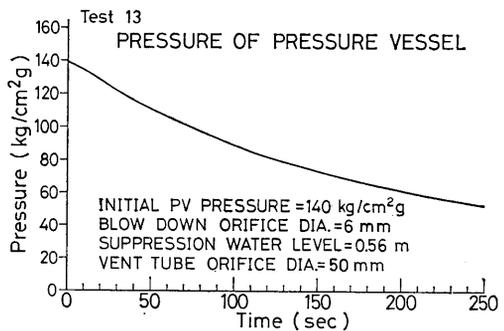


図 5-13 (a) No.13 実験の圧力容器内圧力

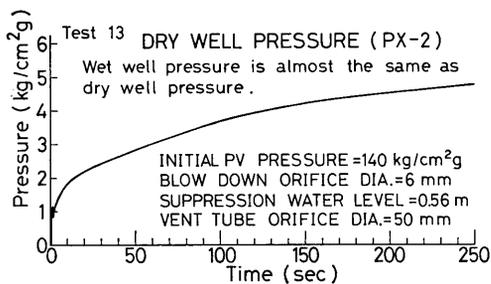


図 5-13 (b) No.13 実験のドライウェル圧力

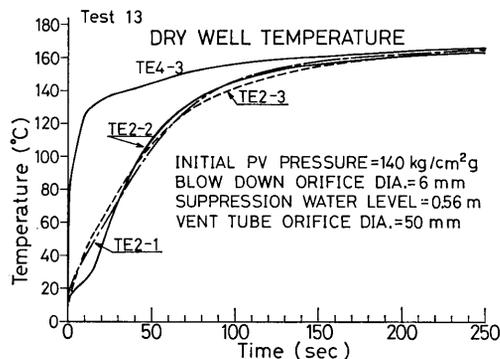


図 5-13 (c) No.13 実験のドライウェル温度

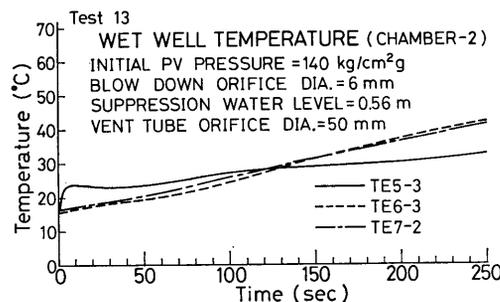


図 5-13 (d) No.13 実験のウェットウェル温度 (第2圧力抑制室)

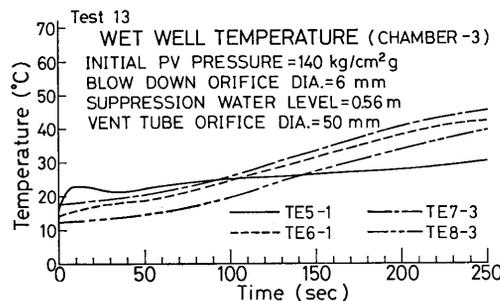


図 5-13 (e) No.13 実験のウェットウェル温度 (第3圧力抑制室)

方に山はできない。なお、ビジグラフの操作上、ドライウェル温度の測定に失敗した。

図 5-13(a)~(e)は実験13の結果である。ブローダウンオリフィス径が6 mmのため、ドライウェルとウェットウェル間の差圧はほとんど変わらない。

5.2 自然冷却時の変化

ブローダウン終了後も装置全体を放置し、長時間にわたって格納容器内の温度と圧力の時間的変化を観察した。実験は、実験6, 7, 8, 11, 13の5回について行った。

図 5-14~18は、それぞれの実験のドライウェル温度 (TE 3-1) 第1, 第2圧力抑制室の水温 (TE 8-1と8-2) の打点式記録計による時間的変化を示すものである。

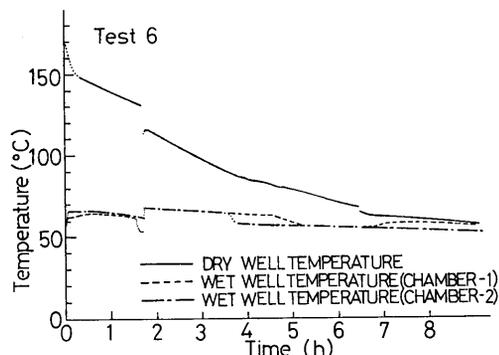


図 5-14 自然冷却時のドライウェルとウェットウェルの温度変化 (No.6 実験)

図 5-14は、実験6で、ベント管オリフィスを取付せず、ブローダウンオリフィスが12mmの場合である。最初の1時間30分ほどの間、水温はあまり低下しないがドライウェル内の温度降下は急である。1時間30分をすぎたところで第1圧力抑制室の温度が低下する。そして、しばらくすると装置全体をゆるがす振動と共にドライウェル温度の急低下が生じ、しばらくすると落ちつく。この時、ウェットウェルの温度の上昇とドライウェル温度の低下がみられる。3時間30分頃まで、再び静かな状態が続いたあと、今度は第2圧力抑制室の温度の低下がみられ、しばらくしてドライウェル温度の変動がみられるが、今度はそれほど大きな振動は発生しなかった。6時間半を過ぎたところで、ドライウェル温度の急低下がみられるが、これは第3圧力抑制室の温度の低下に伴うものであろう。

このウェットウェルの温度低下と、その後のドライ

ウェル内の温度変動等は、ドライウェル温度および圧力の降下に伴い、ウェットウェルの空間部が膨脹して水面が低下し、ある値以上になるとベント管を通して空気が逆流するためと考えられ、後に詳しい考察を行った。

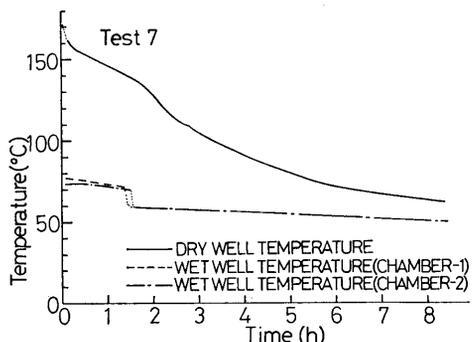


図 5-15 自然冷却時のドライウェルとウェットウェルの温度変化 (No. 7 実験)

図 5-15 は、実験 7 で、ベント管オリフィス径が 25 mm である。この場合も約 1.5 時間後にウェットウェル温度の低下がみられるが、それに伴う激しい振動はみられず、ただ、ドライウェル温度の低下が早まるのがみられる。

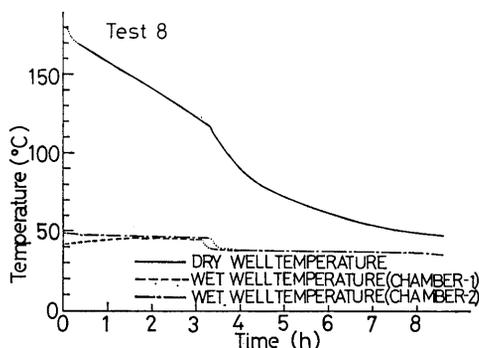


図 5-16 自然冷却時のドライウェルとウェットウェルの温度変化 (No. 8 実験)

図 5-16 は実験 8 で、実験条件は実験 7 とほぼ同じである。ただ、ウェットウェルの水位は実験 8 の方が高いため、ウェットウェルの空気の膨脹に伴って水位がベント管出口まで低下する時間が長くなり、約 3.5 時間となっている。この場合も激しい振動はみられないが、これ以後、ドライウェルの温度の低下速度が増大することがわかる。

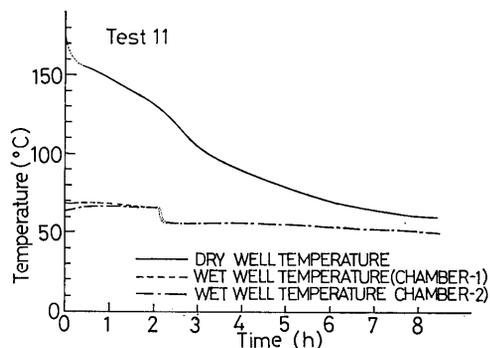


図 5-17 自然冷却時のドライウェルとウェットウェルの温度変化 (No.11 実験)

図 5-17 は実験 11 で、ベント管オリフィス径が 50 mm、ブローダウンオリフィス径が 24 mm の場合である。約 2 時間後に実験 7、8 と同様の現象がみられることがわかる。

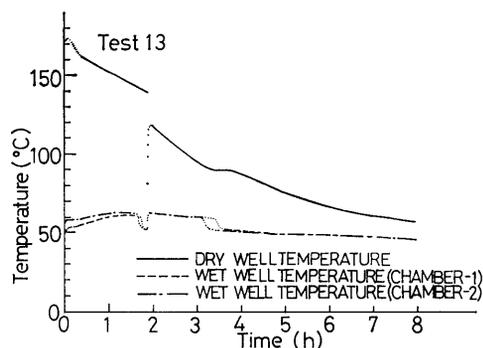


図 5-18 自然冷却時のドライウェルとウェットウェルの温度変化 (No.13 実験)

図 5-18 は実験 13 でベント管オリフィス径が 50 mm、ブローダウンオリフィス径が 6 mm の場合である。この場合には、約 2 時間後に激しい振動とドライウェル温度の急低下がみられる。さらに、3.5 時間後のドライウェル温度の盛り上りは次のように説明される。圧力抑制室内の水面がベント管の出口に達し、空気がドライウェルへ移動して、ドライウェル内をかく乱する。これによりドライウェル内圧が低下するが、これを補償する形で、圧力容器から蒸気がゆっくり供給される。図 3-8 に示すようにドライウェル温度として示した TE 3-1 はドライウェル内上層の放出系ノズルにほぼ相当する高さにあるため、この部分の蒸気分率がそれまでの値より大きくなる。そこで、蒸気分圧に相当する飽和温度が若干高くなり、従って、指示値

も盛り上りを示したものと考えられる。

以上をまとめると、格納容器の冷却に伴ってドライウェルの圧力が減少し、それによりウェットウェルの空気が膨張してウェットウェルの水をドライウェルへ逆流させ、ついに空気が逆流するようになる。その際、ドライウェルの圧力や温度の急減と共に装置を振動させることもある。激しい振動は、ベント管の口径が大きく、ブローダウンオリフィス口径が小さい時ほど生じ易い。ベント管口径が小さいと、大量の空気の瞬時逆流とならないため、大きな振動とならない。これらのことは、実験6が大きな振動、実験13が中位の振動を生じ、実験7, 8, 11がほとんど振動を生じなかったことにより説明される。

5.3 ベント管出口の圧力振動

格納容器内の各部における圧力振動を、エンジン指圧計を用いて測定した。計測は実験8以後13までの6回について行ったが、このうち実験10は、ブローダウン後5.2秒でドライウェルのラプチャディスクが破れたため測定できず、結局5回についてデータを得た。

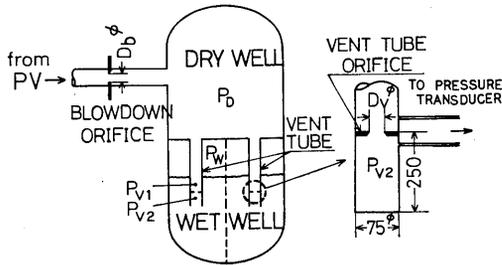


図 5-19 格納容器模式図

エンジン指圧計は図5-19の格納容器の模式図に示す位置に取付けた。すなわち、ドライウェル内圧力 (P_D)、ウェットウェル内圧力 (P_W) およびベント管オリフィスをはさんで P_{V1} と P_{V2} の4点である。

全実験にわたり、 P_D 、 P_W 、 P_{V1} はほとんど大きな圧力振動を示さなかったが、ある条件がそろると、ベント管出口部圧力 P_{V2} において大きな圧力振動が観察された。

図5-20に、この圧力振動の記録を示す。これは実験8のデータであり、ブローダウン後35秒経過すると(a)で示すようなうなりを伴う小さな振動があらわれる。時間の経過と共に振巾は増大し、70秒になると(b)で示すように一定振巾の激しい振動となる。蒸気の流量が次第に減少して、100秒位になると圧力の形がぐずれ、周期も長くなる。(c)(d) それと共に、圧力の

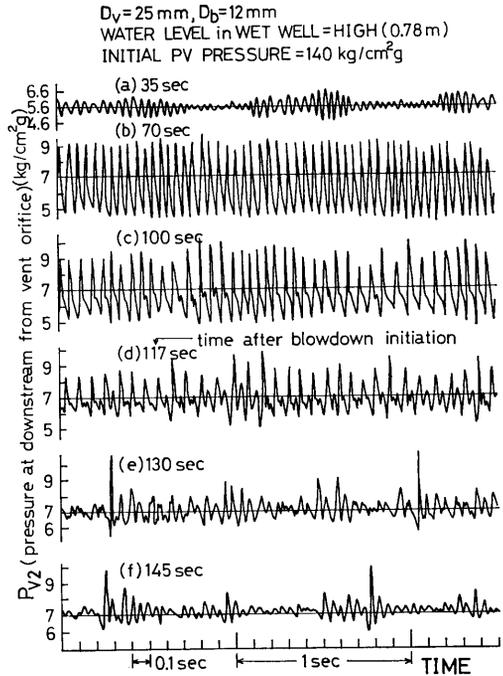


図 5-20 ベント管出口部の圧力振動波形

山と山に別々の山が生ずるようになる。さらに、蒸気流量が減少し、130秒を過ぎると1つの大きな圧力振動後、しばらく小さな振動が続くという間歇的な繰返し振動となる。(e)(f)そして、150秒を過ぎると、数秒から数十秒間隔の大きな振動が生じ次第に減衰していく。

これは後の考察で示すように、図5-19のベント管出口部の $75\phi \times 250$ の空間が形成する蒸気室への水の逆流に伴う圧力振動で説明でき、この空間への蒸気の供給と水中への蒸気の放出のかねあいで決まるものである。ブローダウンオリフィス口径が6mmの実験9では、蒸気の供給量が小さいため、数秒から数10秒おきに生ずる大きな圧力振動のみしか記録できなかった。

また、実験11~13では、ベント管のオリフィス口径が大きいのでドライウェルとベント管全体が1つの空気室として作用するため、得られる圧力振動はごく小さいものであった。

5.4 ウェットウェルにおけるプールスウェル

ブローダウン直後に、ドライウェルからウェットウェルへの空気の移動に伴い、ウェットウェルの水面が飛び上る現象がみられた。これをプールスウェルと呼

ぶ。

本実験では、ウェットウェル中の差圧計および電極式水位計の両者より、このプールスウェルを測定したが、本実験では全般に飛び上りの量が小さく、数例のデータしかとることができなかった。また、差圧計では感度が不足したこと、電極式水位計は応答は早い、検定がむつかしく、絶対値に信頼ができないことなどの問題があった。

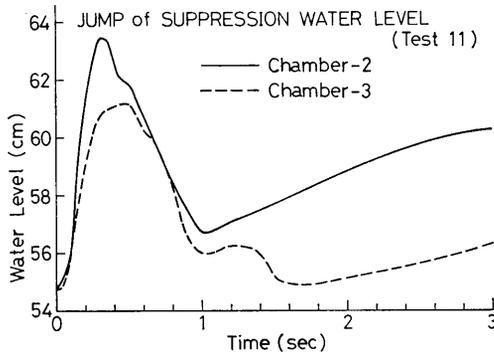


図 5-21 プールスウェルの測定例 (No.11実験)

図 5-21 は、実験 11 の例で、ブローダウンオリフィス口径が大きく、飛び上り量も比較的大きかった例である。これにより 1 秒一寸のスウェルがみられることがわかる。

6. 考 察

6.1 圧力容器からのブローダウン特性

圧力容器からのブローダウン特性は、圧力容器流体の圧力が格納容器側の圧力にくらべずっと高いため、圧力容器内流体および破断口径のみの条件で定まる。さらに、圧力容器内の流体の条件が同じなら、ブロー

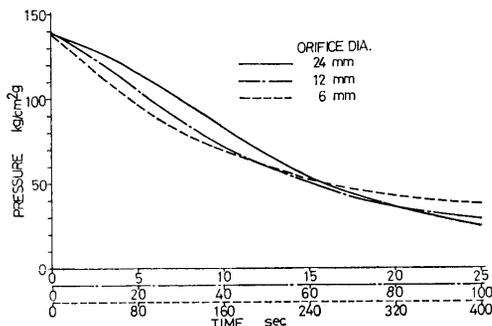


図 6-1 (a) 換算時間スケールによる圧力容器内圧力の時間変化

ダウン時間すなわち圧力容器内流体の流出に要する時間は、ほぼブローダウンオリフィスの断面積に反比例すると考えられる。

図 6-1 (a) は、圧力容器内圧力を縦軸にとり、横軸に、ブローダウンオリフィスの断面積と時間の積が一定となるように時間スケールをとって各ブローダウンオリフィス径について比較したものである。本実験では、圧力容器内の初期水位を一定としたので、初期圧力が約 $140 \text{ kg/cm}^2 \text{g}$ の場合、圧力容器内流体の条件が同一となる。そこで、ブローダウンオリフィス径が同じ場合のブローダウン特性は、いずれも差がなかった。図 6-1 (a) の曲線は、3 種のブローダウンオリフィス口径に対するブローダウン特性をあらわすものである。同図の 3 本の曲線より、このような整理によって、時間スケールの大きく異なるブローダウン特性がうまくあらわせることがわかる。さらに、詳細に 3 本の曲線を比較すると、オリフィス口径が大きい場合、始めの圧力降下はゆるやかであり、途中から急勾配で低下する。このことは、別のブローダウン実験でも、すでに説明したが⁽²⁾⁽³⁾、オリフィス口径の大きい方が減圧沸騰が相対的に激しく、初期に液体が同伴されて流出する、いわゆるキャリーオーバーの割合が大きいことによる。初期に 2 相流で流出すれば、圧力の低下速度はゆっくりしたものになるが、流体の流出質量および流出熱量は大きくなり、圧力容器内の残留水量は小さくなる。ブローダウンオリフィス径が大きいほど、ブローダウン後期に圧力が低下するのは、図 6-1 (b) に示すようにこの残留水量が小さいことによる。

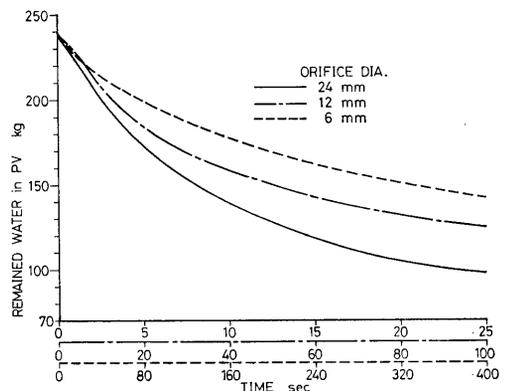


図 6-1 (b) 換算時間スケールによる圧力容器内残留水の時間変化

6.2 ドライウェル内の圧力と温度

ドライウェル内流体の圧力と温度の過渡変化に影響

する因子は、(1)ウェットウェル内の初期水位、(2)压力容器からの流体の流入速度とエネルギー、(3)ウェットウェルへの流出速度（ベント管絞り）の3つが考えられる。このうち、第1番目の水位は、格納容器のブローダウン終了時における圧力を決める重要なものである。すなわち、ドライウェル中の空気は、ブローダウン中にほとんど全てウェットウェルへ移動し、ウェットウェル上部の空気と一緒に圧縮空気の状態になる。この圧力が、格納容器の圧力を決めることになる。すなわち、格納容器のブローダウン終了時の圧力は、おおよそドライウェルの容積とウェットウェルの空気部の容積の比で定まることになる。また、第2、第3の効果である、ブローダウンオリフィス口径とベント管オリフィス口径は過渡変化に対し影響を与える。

(1) ウェットウェル水位の影響

図6-2は、実験4と5のドライウェル圧力を比較したものである。両実験は、ブローダウンオリフィス

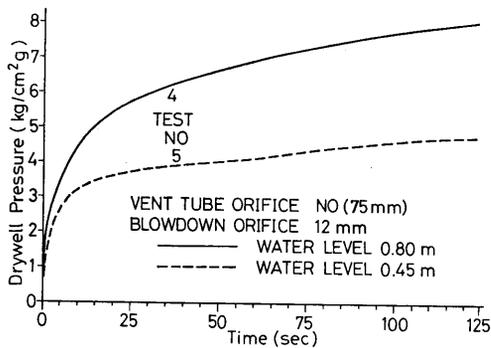


図6-2 ドライウェル圧力に対するウェットウェル水位の影響

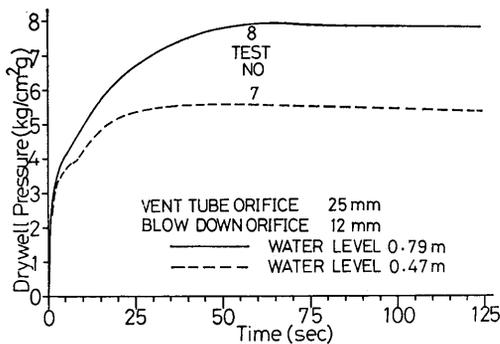


図6-3 ドライウェル圧力に対するウェットウェル水位の影響

口径が12mm、ベント管に絞りがなく、初期压力容器圧力が約140kg/cm²gという同一の実験条件で、ウェットウェルの水位を変えたものである。この図より、水位が高くウェットウェル内の空気室の容積が小さな実験4の方が圧力が高くなっていることがわかる。同様に図6-3は実験7と8の比較であって、ベント管を25mmに絞った場合である。水位の高い実験8の方が圧力が高くなっている。

(2) ブローダウンオリフィス口径の影響

ドライウェル内の温度と圧力の過渡的变化を考える場合、压力容器からの流入蒸気量とエネルギー量が問題となる。ところで、6.1節で、压力容器からのブローダウン特性は、ブローダウンオリフィスの断面積と時間の積が一定になるような時間スケールで整理できることを示した。そこで、ドライウェルの温度と圧力の特性も、同様の時間スケールで比較すれば便利である。

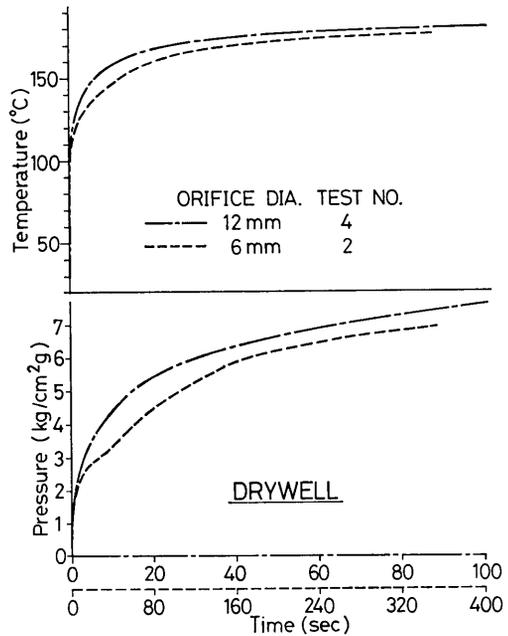


図6-4 換算時間スケールによるドライウェル温度と圧力の比較

図6-4は、ベント管の絞りのない実験2と4について、この換算時間を用いて、ドライウェル圧力とドライウェル内の温度を比較したものである。この場合も長時間を考えると、この換算時間でうまく整理できることがわかる。初期にブローダウンオリフィス径の大きい実験4の温度と圧力が高めになるのは、液体の

キャリーオーバー量が多く、ドライウェルへの流入エンタルピ量が相対的に大きいことによると考えられる。

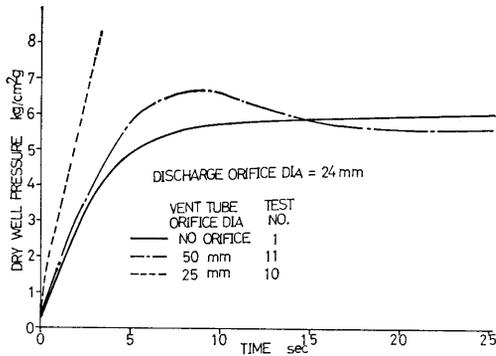


図 6-5 ドライウェル圧力に対するベント管絞りの影響

(3) ベント管絞りの影響

ベント管のオリフィス口径が小さいと、ドライウェルからウェットウェルへの流体の移動速度に限界が生じ、ドライウェル内の圧力が上昇する。図 6-5 は圧力容器からの流入条件が同一で、ベント管のオリフィス径を変えた場合のドライウェル圧力の比較である。ベント管に絞りが無い実験 1 では、ドライウェル圧力は単調に増加するのに対し、50mm のオリフィスを入れた実験 11 の場合、10 秒位の時点で圧力の山が生ずる。これはドライウェルへの流入、流出流量のかね合いで定まるものである。25mm のオリフィスを入れると、ドライウェル圧力はブローダウン後急上昇し、5.2 秒で 12 気圧以上となって、ドライウェルのラプチャディスクが破れる。なお、実験 1 と 11 で最終圧力が実験 1 の方が若干高いのは、圧力抑制室水位が若干高いことによる。

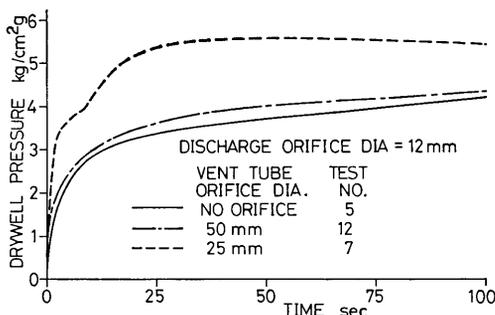


図 6-6 ドライウェル圧力に対するベント管絞りの影響

図 6-6 は同様の比較を実験 5, 7, 12 で行ったもので、この場合もベント管オリフィス径が 25mm の場合は絞りの効果がよく現われるが、オリフィス径 50mm とオリフィスの無い場合との差は非常に小さくなっている。6 mm のブローダウンオリフィスからの流入量は、25mm のベントオリフィスにとっても充分に小さいため、ドライウェルとウェットウェル間の圧力差はほとんど生じない。従って、ブローダウンオリフィス径 6 mm の場合は、ベント管オリフィス径の影響は見られなかった。

以上示したように、過渡的なドライウェル圧力には、流体の流入速度（ブローダウンオリフィス口径）と流出速度（ベント管オリフィス口径）が主要なパラメータとなる。前者の若干の効果は、すでに図 6-4 に示した。しかし、より大きな効果はベント管の絞りとブローダウンオリフィス口径のかね合いで決まる。図 6-7 は、ベント管オリフィス口径が 50mm の実験 11 と 13 について、ブローダウンオリフィスの換算時間を用いてドライウェル圧力と温度を比較したものである。ベント管口径が同一であるので、ブローダウンオリフィス口径が大きい時、圧力の山ができる様子がわかる。

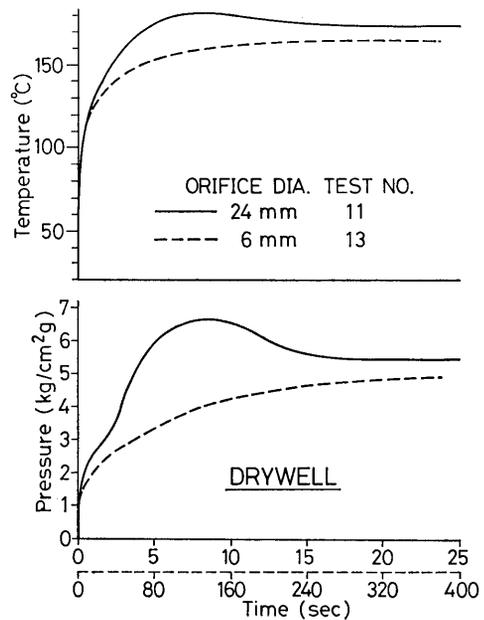


図 6-7 換算時間スケールによるドライウェル温度と圧力の比較

6.3 圧力抑制室内の圧力と温度

(1) 圧力抑制室内の温度分布

ブローダウンの初期には、ドライウェル内の空気が大量に圧力抑制室へ入り、その後、徐々に蒸気の流入割合が増大する。その際、圧力抑制室へ入った空気は、上方の空気部へ抜けて前からあった空気と混合し、圧縮効果によって温度が若干上昇する。一方、蒸気は水中で凝縮して水温を上昇させると同時に、水位も上昇させる。ウェットウェル内各部の温度の過渡的変化は、ドライウェルからの空気と蒸気の流入速度、すなわち、主にブローダウンオリフィス口径と、ウェットウェル水量すなわち水位に依存する。ブローダウンオリフィス口径が大きいと、流入エネルギー速度が大きく温度上昇率が大きい。一方、ウェットウェル水量が多ければ水温上昇率が小さくなる。なお、水位が低い場合、TE 5-1~3は空気部の温度変化を示す。図6-8は実験5、すなわち、ブローダウンオリフィス口径が12mmで、水位が低い場合の第2圧力抑制室内の図示する3点の温度上昇変化を示したものである。破線で示す空気中の温度はブローダウン直後流入した空気の圧縮により、最も早く上昇し、その後はほぼ一定の値を保つ。一点鎖線で示す位置の温度は、始め空気中に出ていたが、蒸気の流入で水位が上昇し、水中につかるようになった35秒以後は水温を示すようになり、上昇を始める。始めから、水中にあった実線の位置の温度は、ほぼ一定の割合で上昇する。80秒近くで実線の方が一点鎖線より低くなるのは、上層の水温が若干高いことを示すものである。

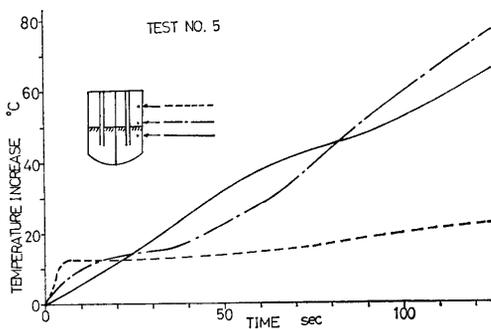


図 6-8 圧力抑制室の温度の時間的変化

水位が低い実験5 (図5-5(d)(e)), 6 (図5-6(d)(e)), 7 (図5-7(e)(f)), 11 (図5-11(e)(f)), 12 (図5-12(d)(e)), 13 (図5-13(d)(e)) は、いずれも初期の空気部温度の上昇をはっきりと示している。一方、

(30)

水位の高い実験では、いずれも水中の温度を示し、ブローダウンオリフィス径が小さかったり、ベント管絞りが小さいものほど均一の温度上昇を示す。この上昇率は水位が高いものほどゆっくりすることはすでに説明した。

(2) 圧力に対するベント管絞りの影響

圧力抑制室内の圧力は、ドライウェルから流入した空気が上部の空気と混合して圧縮されることによるものが大部分である。ところで、ベント管の絞りの大きい方が空気の流入速度が若干小さくなるので圧力の立上りがおそくなる。しかし、最終的には、絞りにはあまり関係せず、ほとんどの空気が圧力抑制室へ入るため、圧力は初期水位が同じであればほぼ同じ値となる。

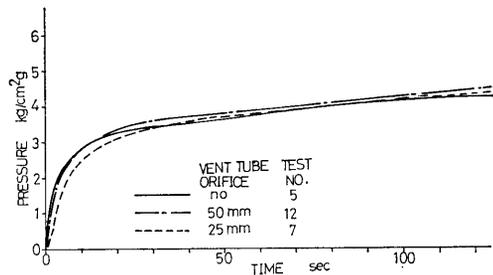


図 6-9 圧力抑制室圧力の時間的変化

図6-9は、ブローダウンオリフィス径が12mmでベント管オリフィスをかえた場合の比較であり、ベント管絞りの大きい方が圧力の立上りがゆっくりしていることがわかる。一方、同じベント管の場合、ブローダウンオリフィス口径が小さい方が圧力の立上りはおそくなる。だが、ブローダウンオリフィスの断面積と時間の積が一定となる換算時間で比較すると、図6-10に実験11と13の比較で示すように、ブローダウンオ

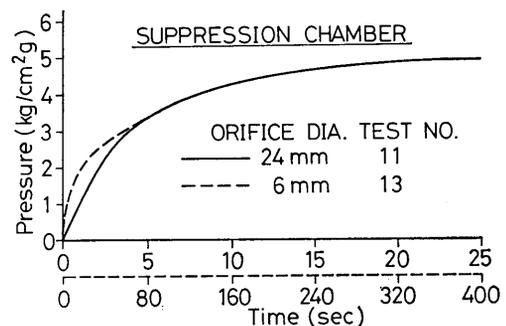


図 6-10 換算時間スケールによる圧力抑制室圧力の比較

リフィス口径が小さい方が相対的に立上りが早い。これは、ブローダウンオリフィスが大きいほど、あるいはベント管オリフィスが小さいほどベント管の絞りの効果が大きいということによるもので、同じベント管オリフィスの場合、ブローダウンオリフィスが大きい方が絞りの効果がでてきて、圧力の立上りがゆっくりすることによる。

(3) 圧力抑制室水位の影響

圧力抑制室の水位は、最終的な圧力に対し、大きく影響する。この最終的圧力は、ドライウェルもウェットウェルも同じ値となるので、詳細はドライウェル圧力で、説明した通りである。

6.4 自然冷却過程

(1) 自然冷却過程で生ずる現象

5.2節において、ドライウェル温度および第1、第2圧力抑制室の温度変化により、自然冷却過程を説明した。

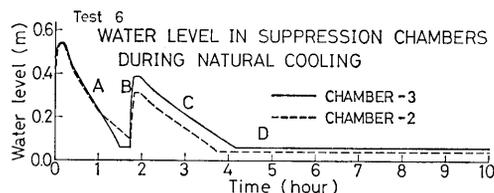


図 6-11 自然冷却時のウェットウェル水位の変化

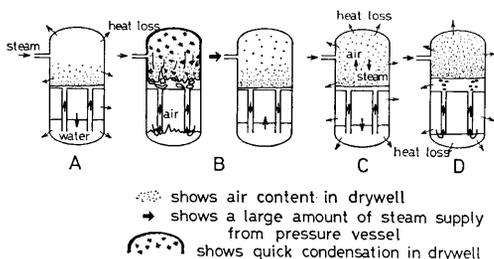


図 6-12 自然冷却過程現象説明図

図 6-11 は、実験 6、すなわちブローダウンオリフィス径 12mm でベント管に絞りが無い場合の第 2、第 3 圧力抑制室の水位の変化を示す。また、図 6-12 は、これに対応する現象の説明図である。ブローダウン終了後、A の段階では格納容器の冷却によりドライウェル内の圧力及び温度が次第に減少する。それに伴って、圧力抑制室の空気は膨脹し、水位が低下する。そして、ベント管を通して水が逆流する。

B の段階は、いずれかの圧力抑制室の水位がベント管出口に達し、空気が逆流する。そしてドライウェル

内の水を攪乱するためドライウェル内の蒸気が急速に凝縮して圧力が減少し、さらに空気の逆流を促進させる。このような自励振動的効果により、場合により装置が大きな振動をうける。その後圧力容器に残留している温水から蒸気が供給されてドライウェル内圧力はかなり回復し、圧力抑制室内の水位は再び上昇する。

C の段階は、再びドライウェルが冷却し、圧力抑制室水位が低下する段階であるが、この間 B の段階で流入した空気と残留蒸気とで相互拡散現象がみられる。

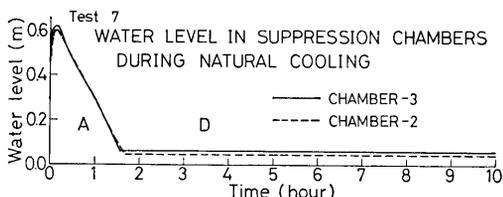


図 6-13 自然冷却時のウェットウェル水位の変化

D の段階は、再び空気がドライウェルへ逆流するのであるが、この場合は、ドライウェル内の温度差も小さく、激しい振動は生じず水位もベント管出口に一定のままである。このような B の段階の激しい振動を生ずるのは、空気の逆流が生じ易いベント管の絞りが無い場合や、圧力容器からの蒸気の供給が小さいブローダウンオリフィス径の小さい場合である。図 6-13 は、実験 7 で、ベント管オリフィス径が 25mm と小さい場合の圧力抑制室水位の変化である。ベント管口径が小さいため、A 段階から D 段階へとび、一定の水位を保ち激しい振動を生じないことがわかる。

(2) 自然冷却過程中のドライウェル内の空気分圧の変化

自然冷却過程中のドライウェル内の圧力は蒸気分圧と空気分圧を加えたものである。ドライウェル内の圧力は均一であるが、蒸気または空気分圧は垂直方向にかなり相違があると考えられる。すると、蒸気は飽和状態と考えられるので、その温度に相当する飽和圧力が蒸気分圧となり、残りが空気分圧となる。この事を利用して TE 4-1 と TE 4-3 の 2 点の温度の変化から垂直方向の蒸気又は空気分圧の変化を求めた。図 6-14 は、実験 6 の場合の各分圧および全圧の変化を示したものである。ブローダウン後も、A 段階でわずかに下部に空気が残っていることがわかる。B 段階で大量の空気がドライウェル内に入ると空気分圧は急に増大する。そして、下部はほぼ一定である

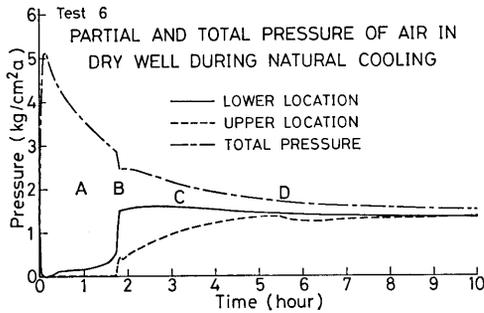


図 6-14 自然冷却時のドライウェル内空気分圧の垂直方向の違い

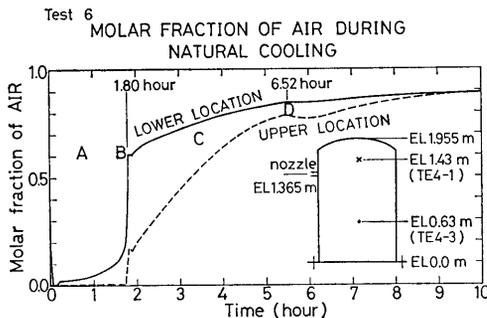


図 6-15 自然冷却時のドライウェル内空気モル分率の変化

が、上部の空気分圧は徐々に上昇することがわかる。これを空気モル分率の変化としてあらわしたのが図 6-15 である。これは、単位容積当りに存在する空気モル濃度の比率を示したものである。すなわち、温度 $t^{\circ}\text{C}$ の蒸気の飽和圧力を $P_s(t)$ 、蒸気の飽和比容積を $V_s(t)$ とし、全圧を P とすると、空気分圧 P_{air} は

$$P_{air} = P - P_s(t)$$

空気の比容積は、

$$V_{air} = \frac{RT}{P_{air}}, \quad (R = 29.27 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{k}, \quad T = t + 273.15)$$

蒸気モル濃度 (Kmol/m^3) は、 $\frac{1}{18V_s}$ 、空気モル濃度は $\frac{1}{28.8V_{air}}$ である。そこで、空気モル分率は

$$\frac{\frac{1}{28.8V_{air}}}{\left(\frac{1}{18V_s(t)} + \frac{1}{28.8V_{air}}\right)}$$

で与えられる。

図 6-16、6-17 は同様に実験 7 の場合の空気分圧と空気モル分率の変化を示す。

なお、図 6-15 の C 段階では、上部と下部のモル分

率が接近しつつある。これは、蒸気と空気が相互拡散をしていると考えられる。そこで、この間の垂直方向モル分率がドライウェル内で直線的に変化しているものと仮定し、次のように相互拡散係数 $D(\text{m}^2/\text{s})$ を求

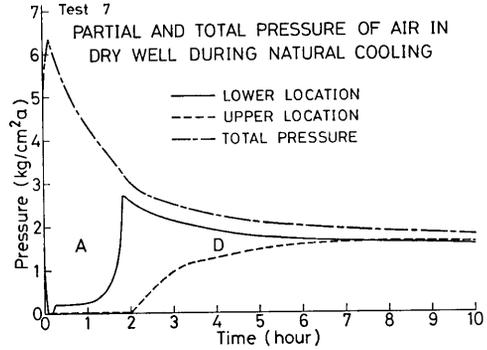


図 6-16 自然冷却時のドライウェル内空気分圧の垂直方向の違い

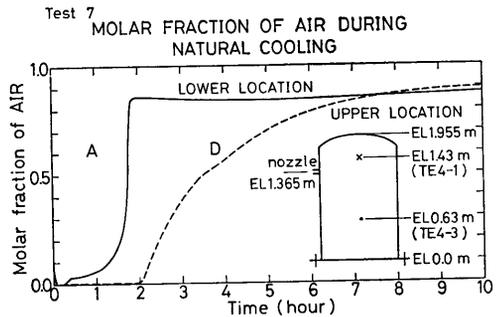


図 6-17 自然冷却時のドライウェル内空気モル分率の変化

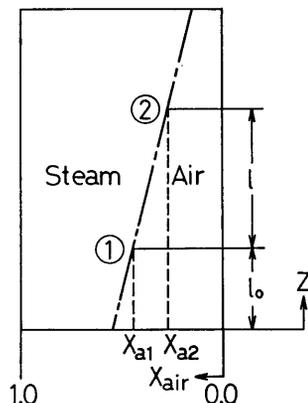


図 6-18 ドライウェル内の空気モル分率の直線的变化と相互拡散

めることができる。すなわち図6-18に示すように垂直方向に距離 l だけ離れている1, 2の点のモル分率を x_{a1}, x_{a2} とする。下方の l_0 領域にある空気のモル分率が減少して、速度 $w_a(\text{kg/s})$ で上方へ拡散する。(同時に蒸気は下方へ拡散する。)すると、 A を容器の断面積として、

$$w_a = \frac{Al_0\gamma_a}{2l} \left\{ (2l-l_0) \frac{dx_{a1}}{dt} + l_0 \frac{dx_{a2}}{dt} \right\}$$

$$= -\frac{DA}{RT} \frac{dP_a}{dz} = -\frac{DA}{RT} \frac{P_{a2}-P_{a1}}{l}$$

(ただし γ_a は空気の比重量である。)

この式より、ある時間内での x_{a1} と x_{a2} の変化から D を推定できる。図6-15のC段階では、 $D \approx 0.2 \text{ m}^2/\text{h}$ であった。これは、空気と蒸気の分子拡散による $D \approx 0.1 \text{ m}^2/\text{h}$ より若干大きい、かなり近い値であることがわかる。

6.5 ベント管出口での圧力振動

5.3 節でベント管出口部に生ずる圧力振動の結果を示し、これはベント管出口部が形成する蒸気室への蒸気の流入流出で定まることを説明した。さらに具体的には、これは蒸気室への水の逆流に伴う、いわゆるチ

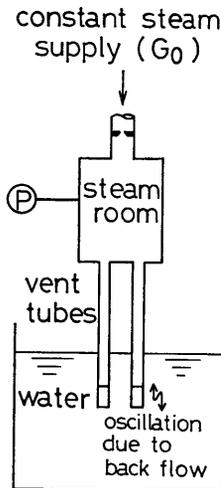


図6-19 ベント管におけるチャギング現象概念図

ャギング現象であると推定できる。すなわち著者らは、別の可視モデルによる蒸気の凝縮実験を行い、チャギング時に生ずる圧力振動を得て、本実験の結果を推定した。可視モデル実験は図6-19に示すように、蒸気室とベント管よりなる体系に、一定速度の蒸気 $G_0(\text{kg/s})$ を流入させ、水につかったベント管出口での水の逆流に伴って振動する蒸気室の圧力 P を測定したものである。 G_0 をいろいろにかえた時の圧力振動の記録例を図6-20に示す。

流量 G_0 によって現象は大きく4つに分けられる。第1は、様式1であって、蒸気の流量が G_0 ごく小さいとベント管出口近傍で定常的に蒸気が凝縮し、逆流を伴わないもので、圧力変化はほとんどみられない。蒸気流量が増大すると様式2へ移る。これは蒸気が冷水中で凝縮することにより蒸気室が負圧になり、ベント管内へ水が逆流し、上下往復運動を行うもので、2-1は数回に1回の割合で大きな負圧とそれに伴う大きな逆流がみられる。流量が増大すると2-2のよう

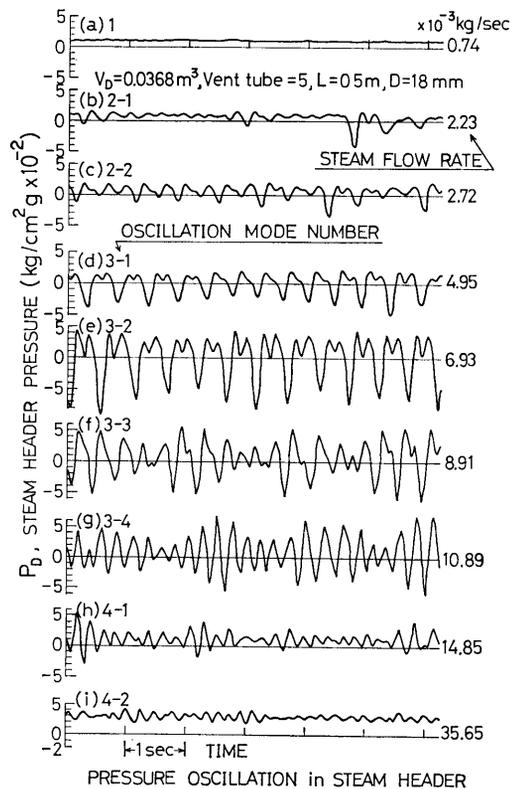


図6-20 圧力振動記録例

に2〜3回に1回負圧となる。さらに蒸気流量が増大すると様式3のようになる。これは水柱の往復運動の1回毎にベント管出口で蒸気の凝縮が生ずるもので、蒸気流量の増大に伴い、3-1から3-4のような振動がみられる。流量がさらに増大すると、ベント管出口で連続的に凝縮をくり返し、逆流が殆んど生じなくなるもので、圧力振巾は流量の増大と共に小さくなるのである。本実験の結果である図5-20と対応させると、(a)の35秒近くでは3-4〜4-1の様式に近く、(b)の70秒から(d)の117秒位までは3-1〜3-3の様式に近く、(e)(f)の130秒すぎは2-1〜2-2の様式に近いことがわかる。

6.6 実炉との対応

以上の実験結果を実炉との対応で考察してみよう。表3-1に造研のNSR-7炉と本模擬実験装置の比較が示してあるが、本実験装置は容積で約1/200である。ところで、一体型炉には、一次冷却系の主配管がないので、一次系の破断場所として何を選ぶかが問題になる。圧力容器の開口部として、NSR-7炉では、上部鏡の直径100mmの制御棒駆動機構や中性子計測孔、あるいは中間鏡の直径100mmの崩壊熱除去、浄化、注水系などを考えた⁽⁴⁾。これは本模擬装置における6mmと12mmの中間で6mmに近いブローダウンオリフィス口径に対応している。またベント管はオリフィスをつけないものが縮尺比として最も近い。すなわち、No.2実験がNSR-7炉を熱流力的に最もよく模擬していると考えられる。この結果は図5-2(a)〜(e)に示すように次のような特徴を有している。

- (i) ブローダウン時間は、図5-2(a)に示すように数百秒にわたる。
- (e) ベント管の断面積が十分大きいので、ドライウェルとウェットウェルの圧力はほとんど変わらない。
- (f) ブローダウン流量が小さいので、ドライウェルの圧力に山ができない。

そのほか若干一般的な事項としては

- (i) 実炉では、ベント管に多くの孔をあけて接触面積をふやし、かつ圧力振動を減少させるものと思われる。圧力振動は、ベント管を含む系に、いわゆる蒸気室ができる時生じ易いので、ヘッダー付の場合、検討を行う必要がある。
- (e) 実炉では、圧力抑制室の水がドライウェルへ逆流しないよう逆止弁をつけられるので、本実験での自然冷却過程での諸現象はそのまま生ずること

はない。ただし、ドライウェル下部にたまった水の攪乱に伴う凝縮の促進現象やドライウェル内部の空気と蒸気の相互拡散の考察など興味ある結果と考えられる。

実炉について、さらに詳細に定量的な熱流力的応答特性の評価を行うためには、以上の実験をもとに厳密な解析モデルを作成し、これにより解析を行う必要がある。解析モデルについては、次報で詳細を記す。

7. ま と め

一体型炉安全性模擬実験装置により実験を行い、圧力抑制型格納容器の熱流力的応答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) 日本造船研究協会のNSR-7炉の約1/200の模擬実験装置により13回の実験を行った。本装置は、圧力容器、格納容器と両容器を結合放出系を本体とするもので、格納容器はさらにドライウェルと3室の圧力抑制室からなるウェットウェルに分れている。圧力容器内の初期圧力は、NSR-7炉の常用圧と等しく約140 kg/cm²aとし、参考として100kg/cm²aについても、実験を行った。ブローダウンオリフィス口径、ベント管の絞り、ウェットウェル水位を主なパラメータとして実験した。

(2) 圧力容器からのブローダウン特性は、圧力容器内流体の条件が同じ場合、ブローダウンオリフィス断面積と時間の積が一定となるような換算時間によってうまく整理できる。

(3) ブローダウン終了後のドライウェルおよびウェットウェルの最終的な圧力は、ドライウェルの容積と、ウェットウェルの空気部の容積の比で定まる。これは、ブローダウンに伴って、ドライウェルの空気が大部分ウェットウェルへ移動し、ウェットウェル上部で圧縮されることによる。

(4) ドライウェルおよびウェットウェルの温度圧力の過渡的な変化も、ブローダウン特性と同様の換算時間によって整理すると便利である。これは、過渡的応答が、ブローダウンに伴うエネルギー流入量に最も大きく依存するからである。また、別の重要なファクターとして、ベント管の絞りがあり、この効果によって、ドライウェル圧力に山ができることがある。

(5) 圧力抑制室内の温度は、特に空気部と水部で、きわだった差を生ずる。これはブローダウン初期にドライウェルから流入した空気が圧力抑制室上部で圧縮し、温度上昇するが、その後ほとんど変化しないのに

対し、水温は蒸気の流入に伴って、次第に上昇することによる。

(6) ブローダウン終了後約10時間にわたり、実験装置をそのまま放置して生ずる現象を観察した。時間と共に、圧力抑制室の水がドライウェルへ逆流し、遂に空気が逆流するようになると、ドライウェル下部の水の層を攪乱して、蒸気の凝縮を促進し、圧力降下が生じてさらに空気の流入を増大させるという自励的現象が生ずることを確認した。そのほか、自然冷却過程でのドライウェル内の空気と蒸気の相互拡散について考察した。

(7) ベント管オリフィス口径が小さい時に、ベント管出口で圧力振動を観察した。これを別の可視モデルでの実験結果から類推して、ベント管出口部の小さな領域(蒸気室)への逆流により生ずるチャッキング現象であると見た。

(8) ブローダウン直後にドライウェルからウェットウェルへの空気の大量流入に伴い、ウェットウェル水面の飛び上り(プールのウェル)がみられた。本実験ではこの飛び上り量はたかだか10cmで、1秒内外の飛び上り時間であった。

以上の実験結果をもとに、格納容器の熱流力的応答やプールのウェルに対する解析モデルを作成し、実験との比較と考察を行ったが、その詳細は次報で記す。

なお、本研究のうち、実験データの取得に関する部分については、三井造船株式会社との共同研究として実施した。

8. 引用文献

- 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) Nariai, H., “Thermo-hydraulic behaviour of Fluid in pressure vessel during blowdown,” Conference on Heat and Fluid Flow in Water Reactor Safety, C 208/77, the Inst. of Mech. Engrs., Manchester, Sep. 1977
- 3) 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
- 4) Ashworth, C. P. 他 “Pressure Suppression”, Nuclear Engineering, Aug. 1962 p. 313
- 5) 石川島播磨重工原子力部 “軽水冷却型発電用原子炉の圧力抑制型格納方式に関する試験研究”, 石川島播磨技報, 第5巻第24号, 昭和40年7月, P. 369
- 6) SAFE Project 小委員会報告書, “軽水型動力炉の圧力抑制装置の基礎試験”, 日本原子力産業会議安特研SAFEプロジェクト小委員会, 昭和41年6月
- 7) Lucken, R. C., & C. A. Leeman, “Vapor Suppression Test Program Report”, BAW-1258, August, 1962
- 8) Hovanec, F. L., & R. C. Lucken, “Closed-Tank Vapor Suppression Test Program”, BAW-3198-2, May 1964
- 9) Koseki, M. et al, “Experimental Studies on Pressure-Suppression Containments for Nuclear Ships”, Proc. Symp. on Nuclear Ships, Hamburg, Germany, May 1971, p. 215
- 10) 小関守史, 桑原信一, “船用炉用圧力抑制格納方式の研究”, 日本船用機関学会誌 第7巻第12号, 昭和47年12月 P. S45
- 11) Aust, E. et al, “Pressure Suppression System (PSS) for Nuclear Ships …… Experimental Results obtained at the GKSS PSS-Test-Facility”, Proc. Symp. on the Safety of Nuclear Ships, Hamburg, Dec. 1977, p. 629
- 12) Wade, G. E., “Evolution and Current Status of the BWR Containment System”, Nuclear Safety, vol. 15, No. 2, Mar-April, 1974, p. 163
- 13) Carmichael, C. F. et al, “CONTEMPT-PS …… A Digital Computer Code for Predicting the Pressure Suppression Containment Vessel in Response to a Loss-of-Coolant Accident”, IDO-17252, April 1969
- 14) 原子力船第7研究部報告書, “船舶用一体形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