

蒸気のプール水中凝縮に伴う圧力および流体の振動

綾 威雄

Pressure and Fluid Oscillations during Steam Condensation in Pool Water

by

Izuo AYA

ABSTRACT

The characteristics and the mechanism of various types of pressure and fluid oscillations, occurring when steam is made to condense in pool water, were examined experimentally using two small-scale apparatus to simulate the suppression type containment of an Integrated Type Marine Reactor. The basic mechanism of the oscillation phenomena, which can qualitatively explain the experimental data, was proposed.

The analysis basing on the oscillation mechanism could predict the frequency and the amplitude of typical regimes, that is, bubbling and condensation oscillation characterized by low- and high-frequency component respectively. Through the discussions, it was shown that the temperature thresholds of those regimes are obtained by linear stability analysis for steam-water interface and that the steam flow rate limit of low-frequency component is well correlated with Hodgson Number to control pulsating gas flow.

Comparing the data of large-scale experiment at the Japan Atomic Energy Research Institute with the predicted values, it was cleared that the results of the present work can be applied to the real suppression type containment systems.

概要

本研究は、沸騰水型原子炉の冷却材喪失事故時に圧力抑制型格納容器内のドライウェルからベント管を通してウェットウェルに流入する蒸気がサブレーション水中で凝縮する際に生ずる振動現象を、小型の模擬装置を用いた実験およびその解析から検討したものである。

第1章は序論であって、圧力抑制型格納容器の開発段階ではほとんど考慮されなかったこの振動現象が注目されるに至った経緯を述べるとともに、現象の分類、特徴、モデル化および解析方法についての従来の考えかたを調べ、本研究が行なわれた背景、動機と目的を明らかにしている。

第2章は、2種類の透明模擬装置を用いた大気圧下の実験について詳述したものである。第1の実験は、ベント管内の蒸気流束が $30 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下の比較的low蒸気流束で生じるチャギング現象に焦点を合わせ、ドライウェルに相当するヘッダー内の圧力変動の様相がプール水温及び蒸気流束でどのように変わるかを明らかにし、プール水が間欠的にベント管内へ逆流するチャギングの発生限界を求めるとともに、ベント管の本数、長さおよび浸水深さ及びヘッダー容積といった実験パラメータの圧力変動へ及ぼす影響について述べている。第2の実験は、チャギングより高蒸気流束で生じる気泡凝縮振動の特性を明らかにするため、蒸気流束 $30 \sim 120 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の範囲で行なわれ、これまでの圧力変動に高速フィルムによる観察を加え、ベント管内の圧力変動と界面変動の係り、及び上述の実験パラメータが圧力変動の振幅と周期に及ぼす影響を詳しく調べている。第1の実験データと合わせ広い蒸気流束に亘る現象マップを得、 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 以上の高プール水温領域には別の振動様式であるバブリング振動が、また、これら3様式に囲まれた部分に間欠的振動(典型的なチャギング)と気泡凝縮振動の遷移域と考えられる振動様式が存在することが明らかにされている。

第3章は前章で示された各振動様式の圧力変動と界面変動の特徴を矛盾なく説明できる振動現象のメカニズムについて述べたものである。蒸気の液中凝縮に伴う振動現象を周波数から見れば、ベント管径 1.8 cm 程度の小規模装置では $2 \sim 8 \text{ Hz}$ の低周波成分と 200 Hz 前後の高周波成分から成っている。多ベント管系におけるベント管間の圧力変動の周期性の有無から、高周波成分と低周波成分はそれぞれベント管出口に形成される蒸気泡とヘッダーまで含んだ大きな蒸気空間をコントロール容積とする圧力振動であることが示されている。このメカニズムを使って、両周波数成分の混在する間欠的振動と遷移振動、高周波成分のみの卓越する気泡凝縮振動及び低周波成分のみから成るバブリングの特徴が定性的に説明されている。

第4章は、第3章のメカニズムに基づく解析であり、種々の現象を定量的に明らかにするため次の4節から構成されている。4.1節は、チャギングによりベント管内へ逆流するプール水の運動を取り扱ったもので、界面がベント管内に存在するときは蒸気凝縮が実質上生じないことに着目した簡単な線形解析から、チャギング発生のためには蒸气流束に上限値が存在すること、及び蒸气流束の増加に伴い気泡凝縮振動へと遷移していく過程が明らかにされている。4.2節は、界面水側に温度境界層を設けるなど、より実際的なモデルを使ってチャギング現象を数値解析したもので、第2章の圧力振動及び界面変動との比較がなされている。この解析により、チャギング時には境界層温度が大きく変動し、界面がベント管内に存在するときはほぼ飽和温度に達しており、前節で用いた近似のなり立つことが示されている。4.3節は、気泡凝縮振動即ち高周波振動成分の周波数を代表的な気泡形状である円筒状、球状および半球状モデルに対する線形解析から求めたものである。周波数はこれらの気泡形状にはあまり依存せず、ベント管径にほぼ反比例しプール水のサブクール度の $2/3 \sim 5/3$ 乗に比例し、従来の研究を含む多くのデータとよく対応することが、また、2つの無次元量で表される厳密解は、大気圧近傍の蒸気に対しては従来からの気泡の自由振動近似と凝縮支配近似によく対応していることが示されている。更に、この解析結果を従来の相関式と比較を行い、それらの相関式が小規模装置による大気圧実験に基づくため、大気圧以上の実規模装置には必ずしも適用できるとは限らないことを述べている。4.4節は、第2章で得られた振動様式マップに表われる4つの境界を解析的に求めたものである。バブリング領域を形成する2つの境界は蒸气流束に余り依存しない温度境界であって、それぞれ高周波および低周波圧力振動成分の発生限界として線形安定論より求められる。他の2つの境界は一種の蒸气流束限界である。チャギング限界は4.1節の考え方に従い、界面がプール水中へ達したときの大量凝縮による負圧（界面を引き上げる力）と恒常的にヘッダーへ流入している蒸気による界面押し下げ効果とがバランスする点として与えられる。最後の遷移振動と気泡凝縮振動の境界は、気泡とヘッダーにおける低周波振動（その2点間を圧縮波が伝播する時間より十分長い周期をもった振動）の周期性の程度を表すHodgson数が一定な線として与えられる。

第5章は考察であり、前章の解析法の適応範囲の検討及びそれまで扱っていない観点から振動現象を眺めたものである。5.1節では、本研究で提案している解析法に出てくる種々のパラメータの寸法依存性の検討や日本原子力研究所等で行われた実規模試験のデータとの比較から本研究の手法が圧力や寸法の大きい異なる実規模装置にも適用可能なことを述べている。5.2節は、非線形振

動が大きく発達したチャギングによる流体力を4.2節のプログラムを使って評価したもので、チャギングによる構造物への潜在的な衝撃力となり得る水柱運動の持つ速度、運動量および運動エネルギーの最大値は蒸气流束が5~10 kg/(m²・s)の低蒸气流束域に現れることを示している。5.3節では、実際の圧力抑制型格納容器を薄肉円筒で近似した場合の固有振動数と解析による圧力振動周波数及び実規模装置におけるデータとの比較から、両者の共振の可能性を指摘している。5.4節では、気泡凝縮振動時の圧力振巾の最大値について、5.5節ではチャギング時の変動するベント管内の蒸气流束について、5.6節では高周波振動成分に対する従来からの音響モデルと本報告で主張している蒸気泡コントロールモデルとの関係について、それぞれ考察した結果が述べられている。

第6章はまとめであり、本研究において明らかにされた事項を個条書きで簡潔に述べている。

なお、付録には、本研究の趣旨から外れるものの、蒸気の液中凝縮時の圧力振動を研究する過程において技術者である筆者が特に興味を抱いた事柄として、蒸気のなす機械仕事の生成から見た圧力振動の発生限界及びチャギングを熱機関と見立てた場合の特性について考察した結果を述べている。

目次

記号一覧

第1章 序論

1.1 在来の研究

1.1.1 現象の分類とマップ

1.1.2 振動現象の特徴

(1) チャギング現象

(2) 気泡凝縮振動

(3) バブリング振動

1.1.3 解析

(1) 計算機による数値シミュレーション

(2) 周波数解析

(3) 安全評価解析

1.2 本研究の動機と目的

1.2.1 本研究の動機

1.2.2 本研究の目的

1.3 第1章のまとめ

第2章 実験

2.1 チャギング現象

2.1.1 実験装置と方法

2.1.2 チャギング現象の特性

(1) ヘッダー内の圧力変動の分類

(2) プール水温の影響

(3) ベント管本数の影響

(4) ヘッダー容積の影響

(5) 浸水深さの影響

(6) ベント管長さの影響

2.1.3 チャギング発生限界

2.1.4 ベント管内の圧力変動

2.1.5 高プール水温時の圧力変動

2.1.6 圧力振動の低周波成分と高周波成分

2.2 気泡凝縮振動

2.2.1 実験装置と方法

2.2.2 振動現象の分類

2.2.3 高速フィルムによる観察

2.2.4 現象マップ

2.2.5 実験パラメータの影響

(1) 圧力振巾への影響

(2) 周波数への影響

(3) その他のパラメータの影響

2.3 第2章のまとめ

第3章 振動現象のメカニズム

3.1 低周波振動のメカニズム

3.2 高周波振動のメカニズム

3.2.1 チャギング時の高周波振動

3.2.2 気泡凝縮振動時の高周波振動

3.2.3 高周波圧力振動の物理モデル

3.3 各振動様式の発生メカニズム

3.3.1 チャギング時の初期負圧

3.3.2 間欠的及びうなり状振動パターン

3.4 第3章のまとめ

第4章 解析

4.1 チャギング時の流体振動の振巾と周期

4.1.1 本解析の目的

4.1.2 解析モデルと基礎式

4.1.3 解析解

4.1.4 チャギング界面変動

4.1.5 流体振動の振巾と周期

4.1.6 考察

(1) ヘッダー容積とチャギング限界

(2) プール水サブクール度とチャギング限界

(3) ヘッダー容積とチャギング周期

(4) ヘッダー圧力変動

(5) チャギング発生限界のスケール効果

4.2 チャギングの数値シミュレーション

4.2.1 現象のモデル化

4.2.2 基礎式

4.2.3 計算方法

4.2.4 インプットパラメータ

4.2.5 計算結果

- (1) 振動様式の蒸气流束依存性
- (2) 実験パラメータの影響
- (3) 境界層温度への影響
- (4) 解析パラメータの影響
- (5) 界面運動の実験データとの比較

4.3 気泡凝縮振動解析

4.3.1 振動周波数データの整理

4.3.2 気泡形状のモデル化

4.3.3 基礎式

- (1) 円筒蒸気泡モデル
 - －界面変動の小さい場合－
 - －界面変動を考慮する場合－
 - －蒸気温度の変化を考慮する場合－

- (2) 球状気泡モデル

- (3) 半球状気泡モデル

4.3.4 線形振動論に基づく振動数

4.3.5 実験データとの比較

- (1) 円筒蒸気泡モデルによる振動数
- (2) 球状蒸気泡モデルによる振動数
- (3) 半球状蒸気泡モデルによる振動数
- (4) 円筒蒸気泡モデルと球状蒸気泡モデルの関係
- (5) 凝縮支配と気泡の固有振動支配の振動数
- (6) 従来の相関式との比較

4.4 振動様式間の境界の解析

4.4.1 高周波および低周波圧力振動の温度限界

- (1) 円筒蒸気泡モデルの場合
- (2) 球状蒸気泡モデルの場合
- (3) 振動限界の解析値
 - －高周波振動限界－
 - －低周波振動限界－

- (4) 実験データとの比較

4.4.2 遷移域と気泡凝縮振動の境界

4.4.3 チャギング限界

4.5 第4章のまとめ

第5章 考察

5.1 本研究結果の大規模装置への適用性

5.1.1 チャギング数値解析

5.1.2 気泡凝縮振動

5.1.3 振動発生限界

(1) チャギング限界

(2) 高周波及び低周波振動成分の発生限界

(3) 遷移振動と気泡凝縮振動の境界

5.2 チャギング時の流体力

5.3 格納構造系との共振の可能性

5.4 気泡凝縮振動(高周波振動成分)の圧力振巾

5.5 チャギング時の瞬間ベント管内流量

5.6 音響モデルと蒸気泡コントロールモデル

5.7 第5章のまとめ

第6章 まとめ

謝辞

参考文献

付録

1. 熱の仕事への変換から見た振動発生限界

2. チャギングと蒸気機関

2.1 チャギングのP-V線図

2.2 チャギングの熱効率

記号

A : 断面積	(m^2)
B_1, B_2, B_3 : 特性方程式の係数	(s^{-1}, s^{-2}, s^{-3})
b : チャギング限界比例定数 (式(115))	($m^2 sK/kg$)
C : 強制項のないときの界面変動振巾 (マノメータ振巾)	(m)
C_x : プール水と界面境界層間の混合係数、	($-$)
c_{PL} : 水の定圧比熱	($J/(kg \cdot K)$)
D : 供給蒸気による界面押し下げ効果を表す項	(m/s^3)
d : 直径	(m)
E : 単位断面積当たり運動エネルギー 縦弾性係数	(J/m^2) ($kg/(m \cdot s^2)$)
F : $E t^3 / \{12(1 - \nu^2)\}$ (式(124))	(kgm^2/s^2)
f : 振動周波数	(s^{-1})
G : 質量流量	(kg/s)
g : 重力の加速度	(m/s^2)
h : 熱伝達率	($W/(m^2 K)$)
i : 比エンタルピ	(J/kg)
j : 質量流束	($kg/(m^2 \cdot s)$)
k : $m \pi r / l_H$ (式(124))	($-$)
L : 蒸気の潜熱	(J/kg)
l : 長さ又は高さ	(m)
M : 単位断面積当たり運動量	($kg/(s \cdot m)$)
m : 質量、 蒸気凝縮が振動周波数に及ぼす効果を 示す無次元数 (式(45))	(kg) ($-$)
縦方向波数	($-$)
N_H : Hodgson数	($-$)
n : ベント管数、 ポリトロープ指数、 蒸気の温度変化が振動周波数に及ぼす効果を 示す無次元数	($-$) ($-$) ($-$)
周方向波数	($-$)
p : 圧力	(Pa)

ΔP : 圧力差	(Pa)
Q : 単位時間当たりの伝熱量、 式(63)で定義される量	(J/s) (s^{-3})
R : 式(64)で定義される量	(s^{-2})
r : 界面境界層の厚さ、 球状気泡モデルにおける気泡半径	(m) (m)
S : 気液界面積	(m^2)
s : 特性方程式の変数	(s^{-1})
T : 温度	($^{\circ}C$)
ΔT : サブクール度	(K)
t : 時間 板厚	(s) (m)
U : エンタルピ	(J)
u : 流速	(m/s)
V : 容積	(m^3)
v : 比容積	(m^3/kg)
W_1 : 蒸気のなす図示仕事	(J)
Y : 半球状気泡モデルにおける気泡の高さ	(m)
z : ベント管出口からの界面位置	(m)
\bar{z} : z の平均値 ($\bar{z} = 0.5 z_{MAX}$)	(m)
α : 式(103)で定義される量 $12(1-\nu^2)r^2/t^2$ (式(124))	(-)
η_c : カルノーサイクルの熱効率	(-)
η_1 : 図示熱効率	(-)
κ : 断熱指数	(-)
λ : 熱伝導度、 管摩擦係数	(W/(m.K)) (-)
μ : 面積密度	(kg/m^2)
ν : 動粘度 ポアソン比	(m^2/s) (-)
ξ : 出入口損失係数	(-)
ρ : 密度	(kg/m^3)
τ : 周期	(s)
τ' : 界面がプール水中に存在する期間	(s)

ω : 角周波数 (rad./s)
 ω^* : ω の近似値 (rad./s)

添字

0 : 平衡状態
1 : 蒸気供給系のオリフィス上流
2 : 蒸気供給系のオリフィス下流
3,4: ベント管出口付近の熱電対位置
I : 振動発生限界
IA, IB: それぞれ、高周波及び低周波振動成分の発生限界
II : 凝縮振動発生限界
III : 内部チャギング発生限界
 ∞ : 無限遠
A : 大気圧
B : 円筒モデルにおける底面
btm : 下死点
C : マノメータ振動
CHG: チャギング
CON: 凝縮
cylinder: 円筒状気泡モデル
D : ヘッダー(ドライウエル)
DN: 降下
F : 境界層
H : ベント管サブマージェンス
プール水深
IN: 流入又は入口
inst: 瞬時
L : 水又はベント管内の水柱
M : プール水の慣性
MAX: 最大値
MIN: 最小値
OUT: 流出又は出口
S : 蒸気
sat: 飽和状態
SI: 蒸気-水界面

semisphere:半球状気泡モデル

sphere:球状気泡モデル

top : 上死点

UP: 上昇

V : ベント管

第1章 序 論

沸騰水型原子炉(BWR, Boiling Water Reactor)の大半は、図 1-1 に示される圧力抑制型格納容器のいずれかのタイプを採用している。これは、近年のBWRの大型化に伴う1次系エネルギー保有量の増大に対応し、格納容器の設計基準事故である1次系冷却材喪失事故(LOCA, Loss Of Coolant Accident)時に破断口からドライウェル空間へ噴出する大量の蒸気をベント系を通してウェットウェル内の圧力抑制プール中へ導き凝縮させることにより、格納容器容積をできるだけ小さくするという経済上の理由から開発されたものである。

LOCA時における圧力抑制型容器の安全性を評価する上で考慮すべき荷重は、大別して次の2つに分類できる。第1は、LOCA発生直後の、ベント管内水柱の排出(ベントクリアリング)や圧力抑制プール水中への空気流入による水面上昇(プールのスエリング)などによる圧力抑制系への過渡的な水力学的荷重であり、第2は、ベント管出口近傍での蒸気凝縮に伴う圧力抑制系への荷重である。前者は圧力抑制型格納容器の開発初期から注目されていた荷重であるのに対し、後者は後述のMarviken炉によるMX-1実験[1]~[3]まではあまり注目されていなかった。MX-1実験以降の実規模試験および小規模実験から、蒸気をベント管を通してプール水中で凝縮させる際には蒸気流量とプール水温に依存して色々なパターンの圧力振動や流体振動がベント管系に生ずることが明らかにされているが、このような現象の発生メカニズムについては十分には解明されていない。本研究は、蒸気凝縮に伴う圧力抑制系への荷重評価において有用となる圧力振動の発生メカニズムと解析に関するものである。

1.1 在来の研究

BWRの圧力抑制型格納容器の開発段階で行われた小規模模擬実験[4]~[6]は、プール内での蒸気の完全な凝縮や格納容器内の巨視的な圧力応答の確認を目的とする圧力抑制型格納容器の動作の実証のための実験であったため、プール水中での蒸気凝縮に伴う圧力振動には大きな関心が寄せられていなかった。また、船用原子炉の圧力抑制型格納容器として、圧力容器を水づけにする格納方式の開発のための模擬実験[7][8]も行われ、高温・高圧の蒸気が水中へ放出される際の蒸気噴流による衝撃荷重が問題にされたことがある。

その後、この問題に関する基礎研究が小関ら[9][10]やSaitoら[11]により始められた。小関らは、船用加圧水炉の小型化をめざした圧力抑制格納方式の開発を念頭におき、小口径の上向きノズルからの蒸気凝縮に伴う圧力振動周波数に対する蒸気流量、プール水温や空気混入量等の影響を調べるとともに、高速写真をもとに気泡消滅過程の熱伝達率を求めた。また、Saitoらは小型の垂

直下向き管による実験を行い、小蒸気流量時に管内の急激な負圧に伴うプール水の管内への逆流を生ずる、いわゆるチャギング現象を観察し、その抑制策としてプール水のサブクール度を下げて凝縮速度を和らげる方法などを提案した。

一方、発電炉を使ったLOCAの実規模試験として、開発計画が中止されたまま放置されていたスウェーデンのMarviken炉を用いたMX-1実験[1]~[3]が1972年から73年にかけて行われた。16回のブローダウン実験を通して、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予想外に大きな圧力振動が発生していることが注目された。図1-2はMarviken炉の断面を、また図1-3は圧力振動の記録例を示している。図1-3(a)から、ヘッダーとベント管出口間の差圧がブローダウン開始後13秒から1000秒あたりまで激しく振動していることが分かる。図1-3(b)は(a)の一部を拡大したもので、6 Hz程度の振動が卓越しているのが見られる。この振動数は近接する構造材の固有振動数に近いと考えられたことから、このような圧力振動が格納容器に何らかの損傷をもたらす可能性が指摘された。この圧力振動をさらに研究するためMX-II実験[12]が実施され、1976年に9回の試験が行われた。そして、これらの実験を契機にベント管系に生ずる圧力振動の評価と発生メカニズムに対する関心が世界的に高まった。

以上の状況を背景に、さまざまな規模の実験が行われるようになった。圧力抑制型格納容器の設計に有用なデータを得るための中規模実験として、米国のMark III格納容器の1/3スケール装置による実験[13]や西独のPSS (Pressure Suppression System) による実験[14]が行われ、安全評価法の確立のためのデータを得るのを主目的とした実規模装置による試験として、米国のPSTF (Pressure Suppression Test Facility) 試験[15]と4Tテスト[16]、日本原子力研究所のMark II格納容器圧力抑制試験[17]や西独の多ベント圧力抑制試験[18]などが行われデータの蓄積が進められてきた。

また、BWRの圧力抑制プールは、LOCA時にベント系を通して流入する蒸気の凝縮に用いられるばかりでなく、他の工学的安全施設からのエネルギーシンクとしても用いられる。特に、SRV (Safety Relief Valve) 排気管における蒸気凝縮による荷重発生は、Würgassen炉でのプール内構造物の損傷[19]以来関心が集まり、排気管の先端形状の変更による荷重の軽減[20]や実機試験による動荷重の測定[21]が行われた。

ところで、プール水中の蒸気凝縮による圧力振動現象は、上述の蒸気流量やプール水温ばかりでなく、ベント管径、ベント管長さ、ベント管本数、ベント管の侵入深さ(サブマージェンス)、蒸気ヘッダー部の容積など、多くのパラメータの影響を受けるものと考えられる。小規模実験装置は、実規模装置に比べ

てこのような実験パラメータを容易に変えることができるため、圧力振動現象のパラメータ依存性や振動メカニズムに関連した研究は、これまで小規模装置によるものが中心となって行われてきた。小規模装置の利点を利用して、蒸気凝縮による荷重を和げるベント管の開発をめざした基礎的研究[22]～[23]も行われている。しかし、振動現象のメカニズムという観点から見れば、未だ十分には解明されておらず、実機に対する安全評価は、実規模装置によるデータまたはそのデータに基づく解析により実施されている[24]。

1.1.1 現象の分類とマップ

Marksら[25]は、蒸気流量とプール水温の広い範囲に亘り実験を行い、現象をチャギング、凝縮振動とバブリングの3様式に分類し、各様式の発生範囲を示す Regime map 図1-4を得た。Arinobu[23]は圧力振動波形をもとにチャギングと凝縮振動を含む数種の様式に分類した。Chanら[26]は、高速写真によるベント管出口の気泡形状とその運動から広い領域に亘る Regime map を得るとともに、チャギングをさらに幾つかの様式に細分化することを試みている。図1-4に示すように、Regime map は通常、ベント管内を流れる平均蒸気流束 \dot{J}_g ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) とプール水温 T_L ($^{\circ}\text{C}$) (またはサブクール度 ΔT (K)) に対して示される。これは、ベント管出口に形成される蒸気泡の形状がベント管径に依存せず、単位界面積当たりの凝縮速度が蒸気流束とプール水サブクール度のみによって定まる場合に成り立つことであるが、小規模装置による実験に基づくこれまでの Regime map がそのまま実規模装置に適用できるという確証は十分には得られていない。

本振動現象が複雑でいまだそのメカニズムが十分解明されていないことその他に、分類基準や判定方法の違い、さらに振動様式間の遷移の不鮮明さのため、研究者によって Regime map にはかなりの差異が存在する。しかし、図1-4に示すように、チャギングと凝縮振動（本研究では後述の振動メカニズムに対応させ、以降、気泡凝縮振動と言う）にはプール水温の上限値があり、チャギングは低蒸気流束側で凝縮振動は高蒸気流束側で発生し、バブリングは高プール水温時に生ずるという3様式の発生域についての基本的特徴は、その後に表示された map [27]も含めて全ての map に共通している。ただし、低プール水温時のチャギング発生域は、図1-4では高蒸気流束側へ延びているが、他の Regime map ではチャギングと凝縮振動の境界は直線的でもっと垂直に近く、チャギング発生の蒸気流束限界が存在することが明らかにされている。

上述の Regime map に現れる各振動様式間の境界の物理的意味を把握することは重要である。しかし、振動発生のメカニズムから見た考察あるいは解析は、福田ら[27]によるチャギング発生限界の解析以外見当たらない。福田らの方法

はベント管出口の蒸気泡寸法の平衡値からの微小変動に線形安定論を適用することにより、チャギング発生の温度限界(チャギングとバブリングの境界)を求めるものであるが、この解析法からはもう一つのチャギング限界である蒸気流束限界(チャギングと凝縮振動の境界)を求めることができない。

ところで、各振動様式の名称は振動メカニズムの解明が不十分であることもあって、研究者により異なっている。その中で、Marksにより名付けられた上述の3様式の名称が比較的広く用いられておりまた各様式の特徴をよく表していると思われるので、本研究においても、凝縮振動を気泡凝縮振動と呼び換える以外、その名称を使用することにした。

1.1.2 振動現象の特徴

(1) チャギング

蒸気流束が小さくプール水温がある値以下では、図1-5に示すように、間欠的なプール水のベント管内への逆流をくり返す所謂「チャギング」現象が生ずる。これは、界面がベント管外へ出ている間の凝縮速度がベント管内を流れる平均的蒸気流束を上まわるときに起こるものと考えられている。チャギングの発生には不規則性が見られることがあるが、Sargisら[28]はプール水中の渦がチャギング発生のトリガになると考え、水中渦の不規則性とチャギングの不規則性を統計的に結びつける試みを行っている。

一つの蒸気ヘッダーに複数のベント管が設けられている場合のチャギングによる界面変動はベント管間でほとんど同期していると見なされる[29]が、チャギング開始に伴う急激な圧力変動の開始時刻はベント管間でごく僅かの差(実規模装置では、2s前後のチャギング周期に対してその差は10msのオーダー[30])が見られ、チャギング発生による格納容器壁への荷重を和らげる効果をもたらす[31]。

チャギング状態から蒸気流束を増加させていくと、チャギング発生間隔は次第に短くなり[27]、ついにはプール水のベント管内への逆流が起こらなくなるというチャギングの蒸気流束限界が現れる。更に蒸気流束を増すと気泡凝縮振動領域に入る。逆に、蒸気流束を減じていくと、ベント管内の界面がベント管外へ出ないうちに再び上昇を始めるといった流体振動が通常のチャギング振動の中に混ざってくる。Chanら[26]はこれを内部チャギング(Internal chugging)と呼んでいる。

チャギング時のベント管内およびプール壁面上の圧力波形は図1-6が示すように、チャギング発生に同期した振巾の小さい低周波の圧力変動に周波数の高い成分が重畳して現れる。この高周波成分の振巾は通常低周波成分を圧倒しており、これらが重畳して現れるときは低周波成分の方が不鮮明である。高周波

成分の周波数はベント管内径が1～3 cmの小規模装置では100～300Hz[27]であるのに対し、内径60cmの実規模装置では10Hz程度[30]となり、ベント管内径に強く依存する。また、低周波成分の周波数すなわちチャギング発生頻度では装置寸法が大きいほど小さくなる(小規模装置では数Hz～数10Hz[27]、実規模装置では0.5Hz前後[32])が、先に述べたように蒸気流束の影響も受ける。チャギングに伴って現れる高周波成分は急激な負圧として始まり、その直後正圧の最大ピークが現れた後、徐々に圧力振巾が減ずるリングアウト波形を示す。

(2) 気泡凝縮振動

蒸気流束の高い領域で生ずる気泡凝縮振動では、気泡界面は常にベント管外のプール水中にあって膨張と収縮を繰り返す。蒸気凝縮は界面変動の影響を受け変動するであろうが、ほぼ連続して行われていると考えられる。圧力振動は高周波成分のみが卓越し連続して現れる。その周波数はチャギング時の高周波成分と同じオーダーであってベント管径ばかりでなくプール水のサブクール度の影響も受けるが蒸気流束の影響は小さい。図1-7は、横田[33]により得られた実験データで、振動周波数がいかにベント管径とプール水サブクール度に支配されるかを示している。

(3) バブリング

プール水温を70℃以上に上昇させると、低水温時には騒音が伴い界面が白く不鮮明であったものが、急に静かな振動となるとともに界面もはっきり見えるようになる[27]。これがバブリング振動であり、ベント管内の圧力波形は、ベント管出口を包むような形をした蒸気泡の膨張と収縮による低周波振動のみとなり、その振巾は低温における高周波成分に比べて小さい。しかし、蒸気泡の不均衡凝縮に起因すると見られる水平力がベント管に加わるのがこの様式の特徴である[23]。また、バブリングとチャギングあるいは気泡凝縮振動の境界、即ち、プール水温を上昇させていった際に凝縮音が急に弱まる境界は低水温で蒸気流束を増加させていった際のチャギングと気泡凝縮振動の境界より鮮明である[27]。

1.1.3 解析

(1) 計算機による数値シミュレーション

電子計算機により現象をシミュレーションする方法で数値解析を行った例としては、Sargisら[34]、Okazaki[35～36]、Pitts[37]やLee[38]による研究がある。この内、前2者は主として高い周波数成分の圧力振動を対象としているのに対し、後の2者はチャギングに焦点を合わせており、気泡形状を円筒でモデル化している。これらの解析においては、界面がプール水中に出ている間の非常に速い蒸気凝縮がこの現象を支配しているとの認識から、凝縮速度を支配

する界面近傍の水側温度境界層に対してそれぞれ独自の考えに基づいたモデルを採用している。

(2) 周波数解析

数値シミュレーションからは、周波数などの振動特性とベント管径やプール水温などのパラメータの関係が判り易い形で与えられないので、現象を支配していると考えられる因子に着目した単純化されたモデルにより周波数を解析的に求める試みが幾つか行われてきた。その際、本現象のメカニズムに対する考え方が定式化に大きな影響を与えるが、研究者により着目する因子が異なるため多少異なった結果となっている。

Saitohら[11]は、ベント管内への供給蒸気とベント管内界面への弱い蒸気凝縮が釣合うようなごく小さな蒸気流束時のチャギングに至らないベント管内の水柱振動を解析し、実験データと良く一致することを示した。界面がプール水中へ間欠的に出る、いわゆるチャギング振動の周期を解析したものとしては、Sursockら[39]の研究があるが、彼らの導いた式には蒸気流束が含まれておらず、周期は蒸気流束に依らないという結果になっている。しかし、福田ら[27]の実験では、チャギング周期は蒸気流束に強く依存し、蒸気流束の増加とともに急激に短くなっている。

気泡凝縮振動時の卓越振動数については、研究者により振動メカニズムに対する考え方に大きな差が見られ、これまでに次の3つのモデルが提案されている。Appeltら[40]は Marviken 炉によるMX-I実験で測定された圧力振動の周期性をベント管等の気相部の振動との共鳴(Acousticモデル)から説明しようとした。その後、Marksら[25]は蒸気泡容積も含めたベント管内気体の1/4波長定常波という新しい Acoustic モデルを提案した。一方、Arinobu[41]は、ベント管出口に形成される蒸気泡の自由振動により決定づけられるとする気泡の自由振動モデルを使って彼の得た実験値と比較してゐる。これに対し、福田[42]は蒸気流入量の一定な球状気泡の寸法変化と凝縮量変化が互いに影響し合っ生ずると考え、線形振動論による振動数が実験値とほぼ一致することを示した。

Marksらにより提唱された Acoustic モデルは主として実規模装置を使った試験を行っている研究者グループに支持されている[30]。また、蒸気凝縮を考慮した Acoustic モデル[43]も提案されているが、そこでは蒸気凝縮を単なる圧力振動の増巾項として取り扱われている。後の2つのモデルは小規模装置を使った研究者により考えられたものであり、小規模装置における気泡凝縮振動の周波数がベント管長にほとんど依存していないこと[42]やベント管径にはほぼ逆比例すること[33]などの実験事実を説明することができる。Acoustic モデルからはこのような実験事実を説明することができないが、実規模装置において

も小規模装置と同様なベント管径依存性を示すかどうかについては、装置寸法の変更が容易でないこともあり十分なデータが得られていない。

高プール水温時のバブリング振動に伴う圧力振巾はチャギングや凝縮による振巾に比較して小さいので、これまで研究者の注目も余り集めておらず、振動周波数の解析も行われていない。

(3) 安全評価解析

LOCA時におけるBWRの圧力抑制型格納器の安全評価の立場からは、圧力抑制室を構成している容器側壁や底面がチャギングや気泡凝縮振動時に受ける変動圧力の評価が最も重要な問題となる。この考えに立った解析プログラムとしては、Sargisら[34]やArinobuら[44]の方法が挙げられる。Sargisらの方法は、実規模実験装置で測定されたチャギング発生時の最初の負圧とそれに続く圧力スパイクがベント管出口に発生するものと仮定し、圧力抑制格納系の応答を解析するものである。一方、実規模試験を行ってきたグループの中には、試験結果を直接利用して評価を行った方が良いとの考え[45]もある。

1.2 本研究の動機と目的

1.2.1 本研究の動機

船舶技術研究所においてブローダウン実験[46]を行っていた際、放出蒸気のダンプ系に「スーパン、スーパン……」という大きな音が観測された。その頃、前節で述べたMarviken炉での蒸気凝縮に起因した圧力振動に関心が集まっていたが、このダンプ系の周期音も蒸気凝縮に起因した現象の一つであろうと考えられた。その後、船舶技術研究所では、BWRのMark II型圧力抑制方式と類似の方式を採用している船用炉として日本造船研究協会で概念設計がなされた一体型船用炉[47]を取り上げ、その格納方式の有効性を確かめるための模擬実験[48]および解析[49]が行われた。図1-8は、容積で設計炉の約1/200に縮小した模擬装置の概要を示すもので、実験の都合上圧力容器と格納容器が分離されている。ブローダウン過程においてベント管出口付近の圧力変動にも注目していたところ、一定の条件下で図1-9に示すような圧力振動[50]が測定された。Marviken炉で生じたものと同様なこの振動現象を究明することが本研究の直接の動機となっている。

1.2.2 本研究の目的

蒸気をプール水中で凝縮させる際に生ずる圧力振動現象は、前節で述べたようにLOCA時におけるBWRの圧力抑制型格納容器の健全性に関連した現象として関心が持たれ、これまで多くの実験的あるいは解析的研究が行われ、振動現象の全体像がかなり明らかにされている。しかしながら、この現象には多くのパラメータが複雑に係わっているため、幾つかの事柄に関しては未だ十分

には解明されていない。特に、振動発生メカニズムに関しては実規模装置を使った研究者と小規模装置を使った研究者、或は小規模装置を使った研究者間で必ずしも意見が一致していない部分がある。また、Regime map に現れる振動発生限界や各振動様式間の境界については、チャギング発生のための上限プール水温についての解析[27]以外にはほとんど物理的説明がなされていない。

本研究は、未だ統一の見解の示されていない圧力および流体振動現象の各々の振動様式を支配している因子とメカニズムを明らかにすることを目的とし、概略、以下の順序で研究を進めた。

(i) 代表的な振動様式であるチャギングと気泡凝縮振動を主な対象とした小規模可視装置をそれぞれ製作し、ベント管の内径・長さ・本数とサブマージェンス、ヘッダー容積を実験パラメータとして振動現象が蒸気流束とプール水温にいかに関係するかを調べる実験を行った。

(ii) ベント管内の圧力変動、ベント管出口付近の温度変動および高速度写真による界面形状のデータをもとに、新たな Regime map を求めるとともに、これらのデータを矛盾なく説明できる振動メカニズムを考えた。

(iii) その振動メカニズムに基づいた解析モデルを使ってチャギングと凝縮振動を解析した。チャギングについては、流体変動の振巾と周期および発生限界の解析と計算機による数値シミュレーションを行った。気泡凝縮振動については、ベント管出口にある蒸気泡の運動に対する基礎式を線形化し、その特性方程式を使って気泡振動に対する一般論を展開し、気泡固有振動モデルなどの従来から提案されている振動モデルとの関係を調べるとともに解析値と本研究および在来のデータとの比較を行った。

(iv) (iii) で用いた基礎式に線形安定論を適用することにより振動発生限界を導き、従来ほとんど考察されていないバブリング振動の発生範囲を調べた。

(v) 種々の振動様式や様式間の境界に対して本研究で提案した手法の大規模装置への適用性を検討するとともに、実炉における格納系固有振動数の推定値を求め共振の可能性を考察した。

(vi) チャギング数値解析プログラムを利用し、チャギングに伴う水柱運動の持つ潜在的衝撃力について検討した。

1.3 第1章のまとめ

圧力抑制型格納容器の開発段階ではほとんど考慮されなかった蒸気の水中凝縮に伴う圧力振動現象が、Marviken 炉を使った実証試験で格納系の固有振動に近い予想外に大きな圧力振動が測定されて以来、BWR の LOCA 時における格納系の健全性に関して注目されるようになった経緯を詳細に述べるとともに、振動現象の分類、特徴、モデル化および解析法についての従来の研究結果や考

え方の検討から、振動発生メカニズムや振動様式間の境界などいまだ理論的に十分には解明されていない事項を明らかにし、本研究の動機と目的について述べた。

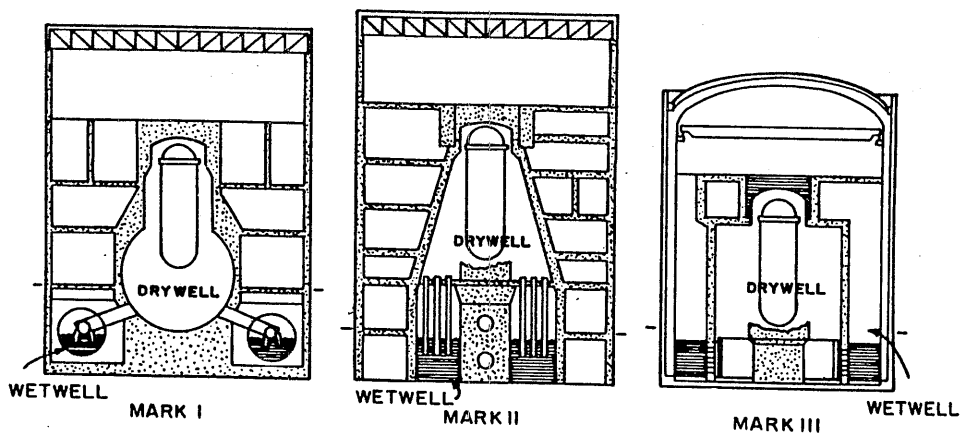


図1-1 BWRの各種圧力抑制型格納容器

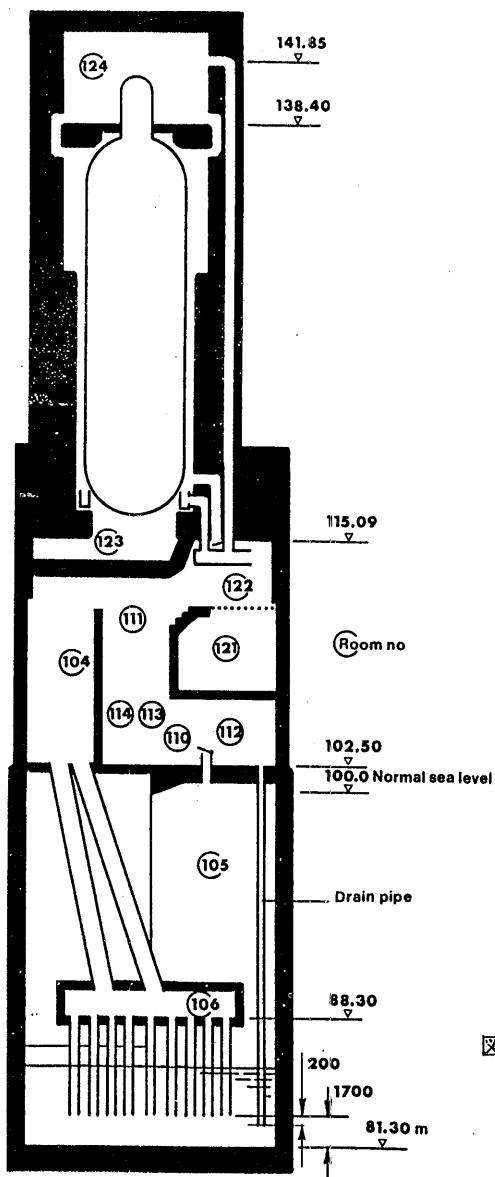


図1-2 Marviken
炉の格納容器断面図 [1]

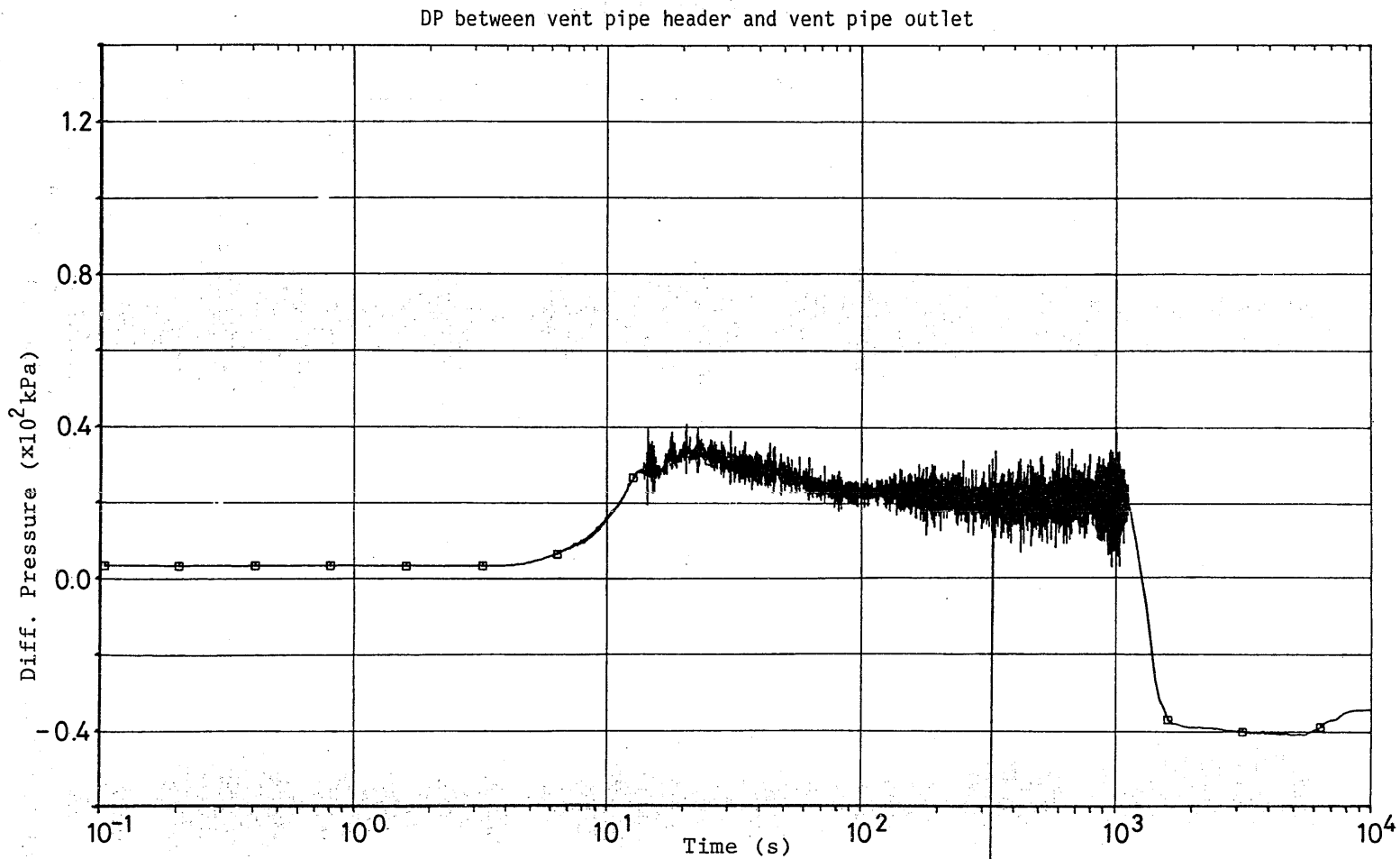


図1-3 (a) Marviken 炉によるブローダウン実験で測定された圧力振動例 [2]

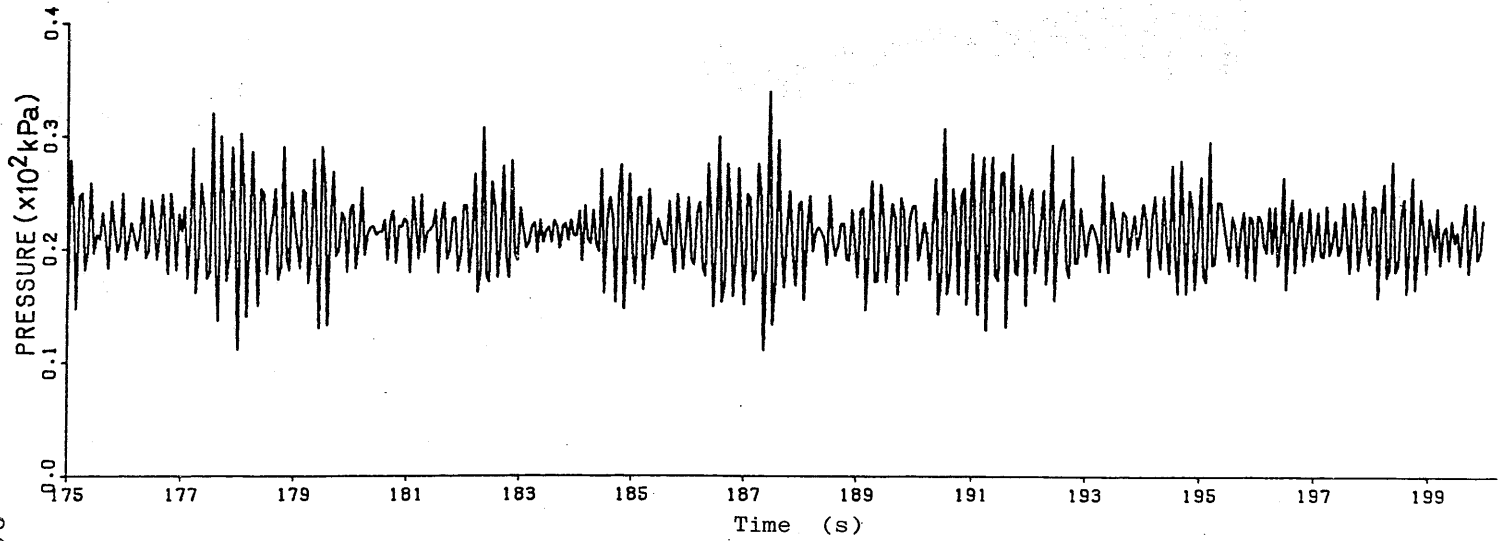
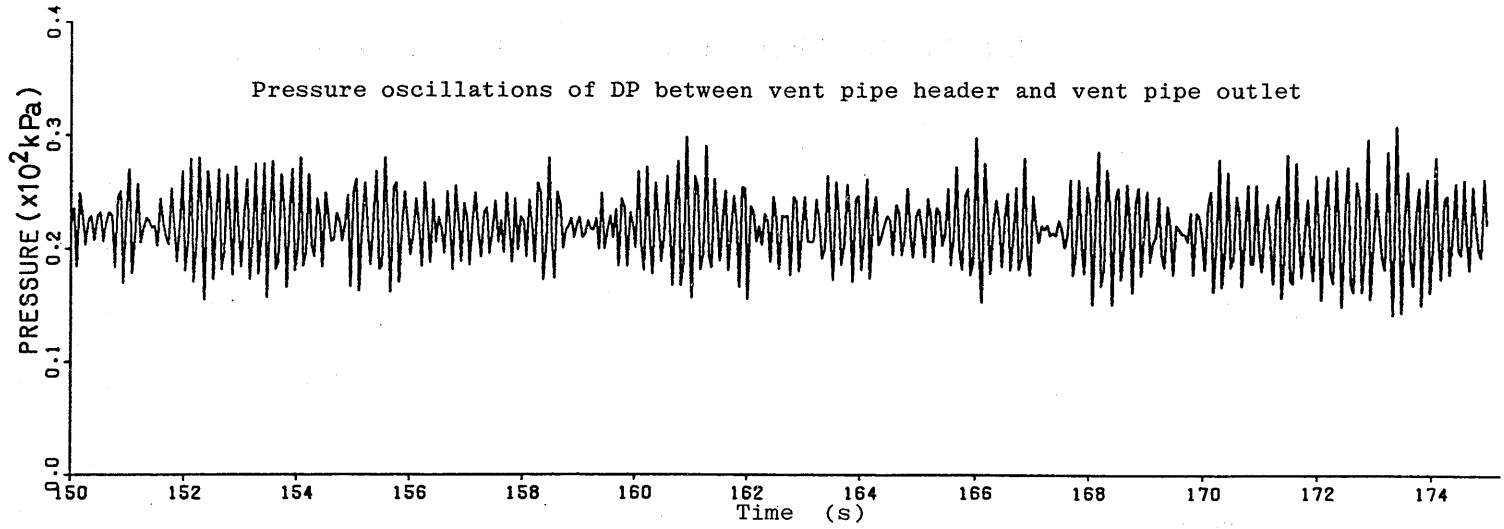


図1-3 (b) (a)の拡大図 [2]

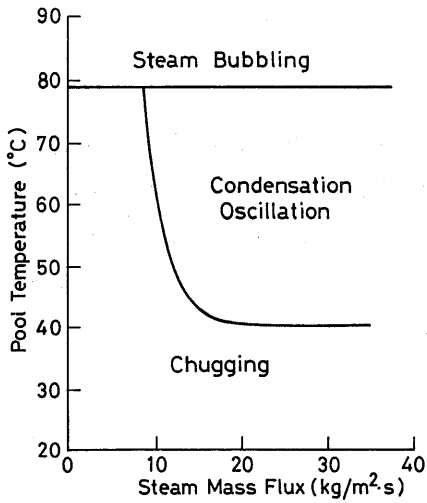


図1-4 Marksらによる Regime map [25]

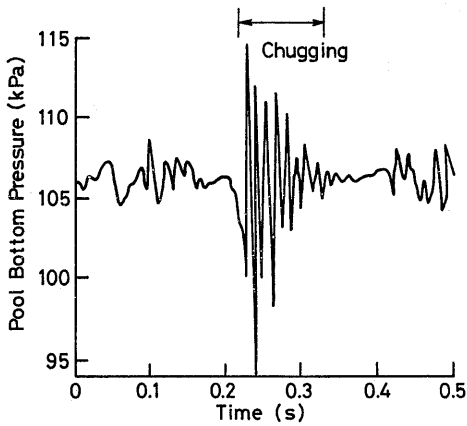


図1-6 チャギング時の典型的な圧力振動例 [26]

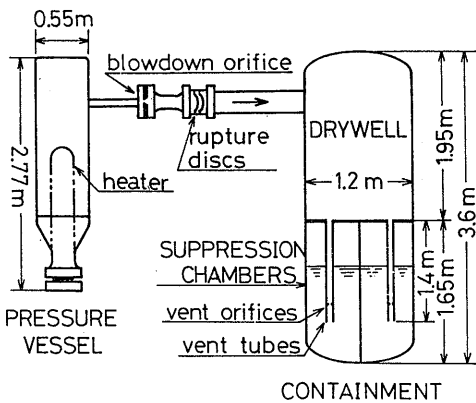


図1-8 一体型船用炉安全性模擬実験装置 [48]

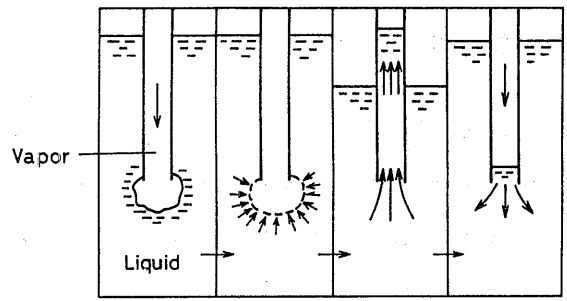


図1-5 チャギング現象の模式図 [23]

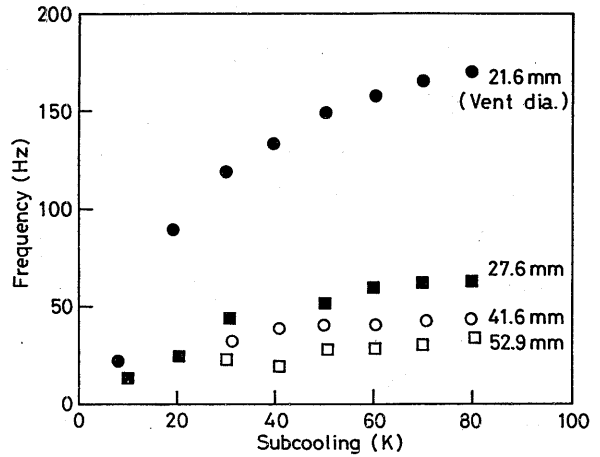


図1-7 気泡凝縮振動の振動周波数 [33]

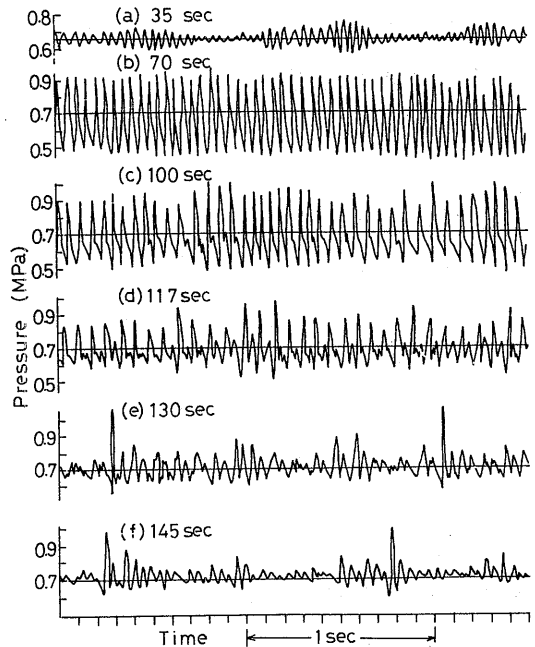


図1-9 図1-8の装置で測定された圧力振動例 [50]