

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7-013 改3
提出年月日	2020年4月20日

水平ベント確認試験に基づく蒸気凝縮振動荷重の設計基準事故時包絡性について

1. 指摘事項の内容

- ① ABWR 水平ベント試験の範囲を超える高蒸気流束下においても、発生する凝縮振動 (C0) 荷重は設計基準事故時に設定した荷重に包絡されることを示すこと。
- ② ABWR のベント管の吹き出し口が3本であることの影響について示すこと。

2. 指摘事項への回答①

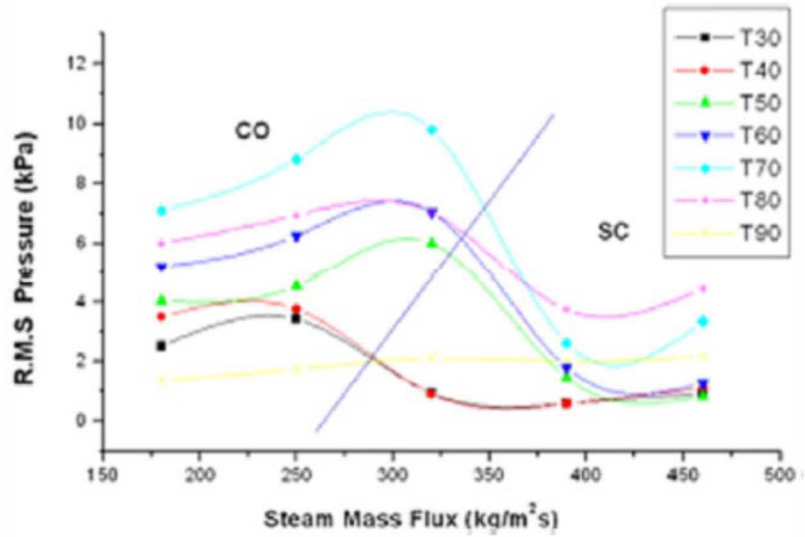
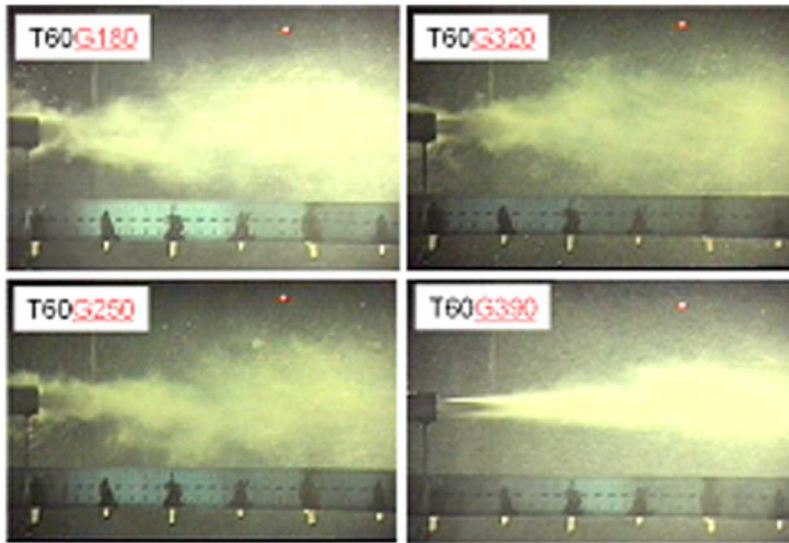
以下ではまず 2.1 において、蒸気凝縮に関する試験の結果等を元に、一般的な傾向として、凝縮モードが凝縮振動 (C0; Condensation oscillation) モードの時に蒸気流束が増加すると凝縮モードは凝縮振動 (C0) から安定凝縮 (SC; Stable condensation) に遷移し、水力的動荷重は小さくなることを示す。なお、ここで参照した試験は ABWR 水平ベント試験の範囲を超える高蒸気流束の条件で実施されたものを含む。その後 2.2 において、ABWR 水平ベント試験を参照し、蒸気流束の試験条件の上限付近で凝縮振動の振幅 (荷重) が弱まる傾向が確認されていることを示す。これにより蒸気流束が試験条件の上限より増加しても、荷重は増大しないことを説明する。

また、回答に関する参考資料として水平ベント体系における動荷重測定試験及びその成果を別紙 1 に示す。

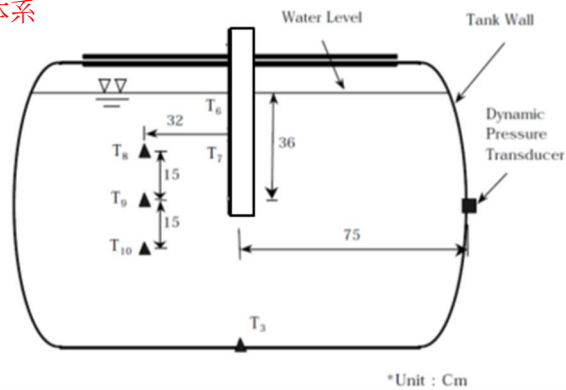
2.1 蒸気流束と水力的荷重の関係について

2.1.1 蒸気凝縮モードと水力的荷重の関係について

プール水中での蒸気の凝縮モードは蒸気流束の増加に伴い、凝縮振動 (C0) から安定凝縮 (SC) に遷移するが、安定凝縮 (SC) モードでは、発生する水力的荷重は、凝縮振動 (C0) モードに比べ小さくなることが知られている。図 1 に Song らの実験 [1] の例を示す。図 1 では、蒸気流束の増加に伴い、凝縮モードが凝縮振動 (C0) から安定凝縮 (SC) へと遷移し、水力的荷重は減少している。また、図 1 上部の写真のうち、右下の写真は蒸気流束の高い 390kg/s/m^2 における蒸気凝縮の様子をとらえた写真であるが、凝縮界面はベント管から離れ、蒸気ジェットは円錐又は楕円型の形状を形成している。なお、図 1 はプール水温の異なる複数のケースをプロットしており、安定凝縮 (SC) の領域である蒸気流束が 390kg/s/m^2 から 460kg/s/m^2 にかけて、荷重が低下する傾向を示すケースと荷重が微増する傾向を示すケースがあるが、荷重が微増するケースにおいても安定凝縮 (SC) の領域であることには変わりがなく、凝縮振動 (C0) の荷重を上回ることはない。



試験体系



注：凡例の T の後ろの数字はプール水温 (°C), G の後ろの数字は蒸気流束 (kg/s/m²) を表す。

図 1 圧力振幅の蒸気流束依存性 (Song らの実験)

「BWR. MARK II型格納容器圧力抑制系に加わる動荷重の評価指針」では、プール水中の蒸気凝縮の現象に関しては、以下の3つの現象がみられるとしており、上述の図 1 の傾向はこれとも整合している。

- (1) 蒸気流速が高い場合の、比較的静かな凝縮
- (2) 蒸気流速が中位の場合の、振動的な凝縮
- (3) 蒸気流速が低い場合の、間欠的な凝縮（チャギング）

また、ストレートパイプによる試験 [2]では、蒸気凝縮にともなう荷重値とプール水温との関係が、複数の蒸気流束条件で確認されている(図 2)。この結果について、FCI 時の S/P サブクール度とるサブクール度の範囲で蒸気流束と荷重値の関係を整理すると図 3 のとおりとなる。この図からも高蒸気流束における蒸気凝縮時の荷重は、蒸気流束が増大しても大きくなることはなく、むしろ低下する傾向がみられる。

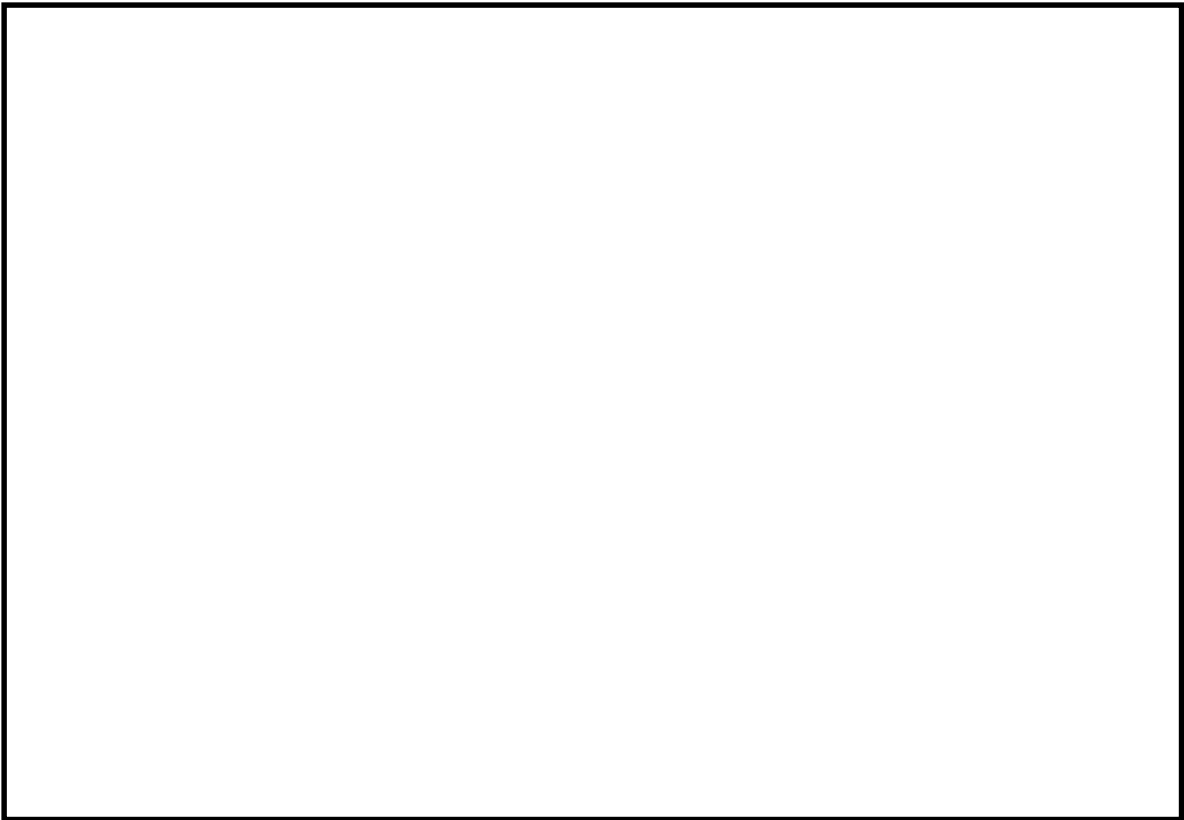


図 2 ストレートパイプ型 SRV 作動時の圧力振動

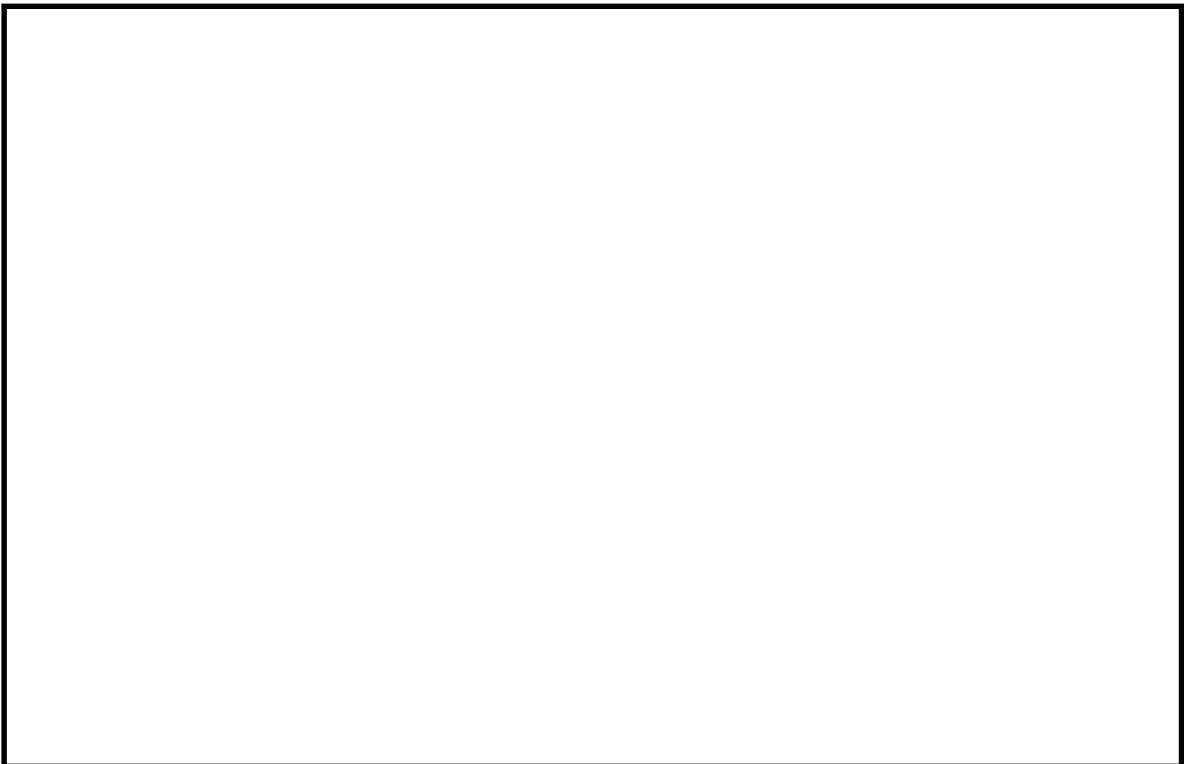


図 3 蒸気流束と圧力振幅の関係 (直管 [] mm)

2.1.2 CO から SC への遷移領域について

凝縮モードが凝縮振動 (CO) から安定凝縮 (SC) に遷移する蒸気流束については、小規模体系において 図 4 のとおり確認されている [3]。試験のノズル口径は 4.45~10.85mm の範囲であるが、口径が大きくなるほど安定凝縮領域がより低蒸気流束まで広がっていることが分かる。実機の水平ベント管出口の口径が 700mm であることを踏まえると、FCI 発生時の蒸気流束の最大値 595kg/s/m² においては、実機でも蒸気凝縮モードは安定凝縮モードとなり、荷重が大きくなることはないと考えられる。

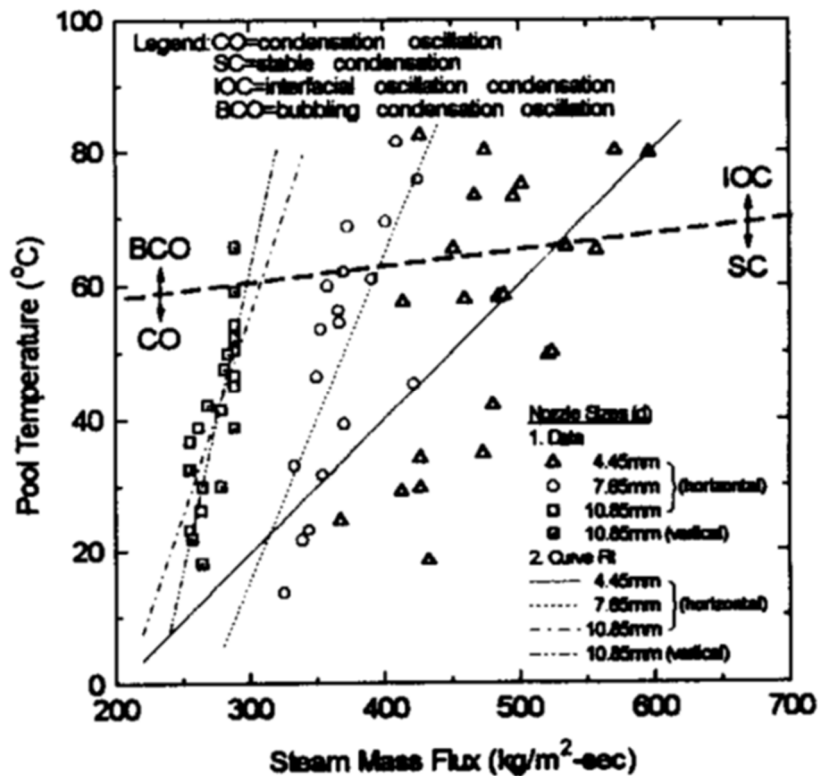


図 4 小規模体系試験における CO/SC 領域図

2.2 水平ベント確認試験における荷重の傾向について

ここでは ABWR 開発時に実施した水平ベント確認試験の 1/2.5 サブスケール試験 [4] (Sub-scale test; SST, 試験施設は図 5 参照) で観察された水力学的荷重の傾向について述べる。SST で実施された複数の試験ケースを表 1 にまとめる。このうち高蒸気流束条件であり、かつ試験装置内をあらかじめ蒸気置換 (プリパージ) したケースである SST-4 に着目すると、図 6 に示すとおり、ベントクリアが完了していると考えられる試験開始 秒後以降から 秒過ぎまでの間、ベント管蒸気流束の計算値は単調低下の傾向にある。この間、プール床面の圧力 (凝縮振動 (CO) 荷重の設定に使われている圧力であり、ほとんどのテストケースにおいて圧力の最大値がプール底面圧力で観測されている) は、初めは比

較的静かな振動を示しているが、試験開始から約□秒過ぎから凝縮振動 (C0) による振巾が増大し始めている (図 7)。すなわち、ベント管蒸気流束が高い状態では、比較的静かであった振動が、ベント管流束が低下した際に C0 による振幅が増大する結果を示した。2.1 に示したように、高蒸気流束では凝縮モードは凝縮振動 (C0) から安定凝縮 (SC) に遷移し、水力的荷重は低下することを示したが、本節で述べた水平ベント確認試験のベント管蒸気流束の試験範囲上限近くでは、すでに蒸気流束の増加に伴い荷重が低下又は一定となる傾向が観察されており、ベント管蒸気流束がそれより大きい領域においても、荷重は増大することはなく、既往の DBA 条件に包絡されるものと考えられる。

なお、試験開始から約□秒の間で比較的大きな圧力の振動が観察されているがこの振動は、プリパーシケースについてのみ観察されており、プリパーシをしないケースでは確認されていない。このような傾向は Mark-II の実規模体系の試験である旧原研の格納容器圧力抑制系信頼性実証試験 [5] においても観察されており、同試験では、同様の試験初期の振動はプリパーシケースのみで観察されている。この振動の発生する機構については、以下のように推測される。実機と同じプリパーシなしの条件ではベントクリア後、非凝縮性ガスによりベント管出口に気泡が形成されるが、プリパーシありのケースではそのような過程を経ずに、ベントクリア後から蒸気のみの流れがプールに流入し、これにより次第にベント出口に蒸気泡が形成され凝縮振動 (C0) が発生する。したがって、この振動は、凝縮界面が持続的にベント管の外側に形成される凝縮振動 (C0) の状態が成立するまでの間の過渡的な振動と推測される。BWR の格納容器は窒素ガス置換により不活性化されていることから、原子炉格納容器バウンダリが健全な状態で、プリパーシケースのような蒸気置換の状態になることは考えにくく、上述した試験初期の圧力振動は実機では発生しないものと考えられる。この圧力の振動は、試験開始後約□秒過ぎから振幅が増大している凝縮振動 (C0) が示す□Hz 及び□Hz の周波数の振動と比べ周波数が大きいことから凝縮振動 (C0) をとらえたものではないと考えられる。

また、SST-2 においては図 8 に示したとおり、試験開始約□秒から□秒後にかけて、蒸気流量は約□%低下しているが、プール床面圧力の振幅や周期に顕著な変化は見られない (図 9)。したがって、蒸気流束が十分大きい領域では、蒸気流束の変化に対する圧力変動荷重の感度は小さいものと考えられる。

高蒸気流束が得られるベンチュリ径の大きい試験ケースは SST-1~6, 10 であるが、これらのケースでは、圧力の時刻歴データが確認できなかった SST-3 を除いていずれのケースにおいても蒸気流束の低下に伴い荷重が増大するか、一定の荷重 (すなわち、蒸気流束が上がっても荷重は増大しない傾向) を示した。蒸気流束の低下に伴い荷重が増大したケースの代表例として SST-1 のベント管蒸気流束と、プール底面圧力をそれぞれ図 10, 図 11 に、SST-2 のプール底面圧力を図 12 に示す (ベント管蒸気流束は図 8 で示したとおり)。SST-1 及び 2 では、試験開始から約□秒過ぎから凝縮振動 (C0) による振巾が増大し始めているが、このときのベント管蒸気流束は約□kg/s/m² であり、SST-4 で凝縮振動による振巾

が増大し始めるときのベント管蒸気流束と同程度の値となっている。また、蒸気流束の低下に伴い、荷重が変化しなかったケースの代表例として、SST-5のベント管蒸気流束と、プール底面圧力をそれぞれに図 13, 図 14 に示す。図 14 で示す試験開始から 10 秒程度までの範囲で蒸気流束（図 13）は約 %程度減少しているが、この間、プール底面の圧力の振幅に大きな変化は見られない。

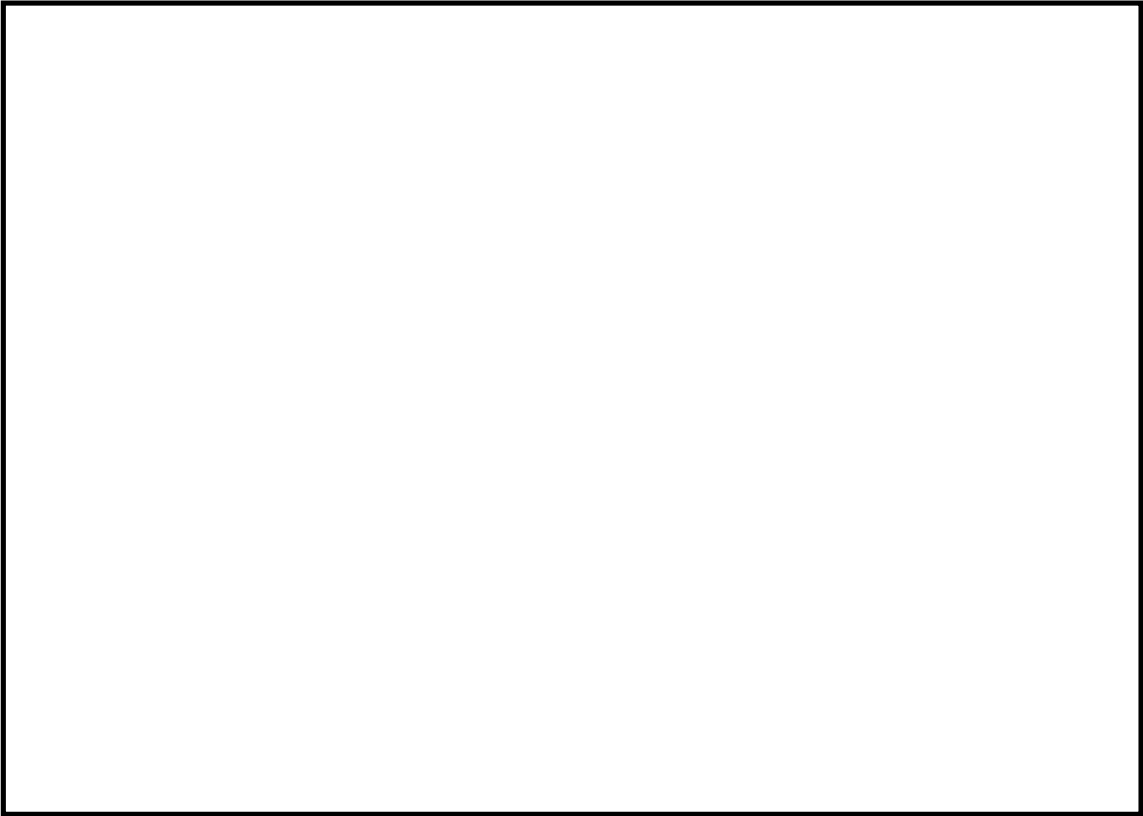


図 5 SST 試験施設

表 1 SST 試験ケース

試験ケース	破断の種類	ベンチュリ径 (インチ)	プリパージ *	PCV 圧力 (psig)	プール温度 (F°)	目的
SST-1	液相	2.5	なし	0	120	CO 荷重の設定
SST-2					70	プールの水温の影響確認
SST-3						
SST-4			120	あり	20	背圧の影響確認
SST-5		33				
SST-6		20				
SST-7						
SST-8		1.75			スケール則の確認	
SST-9	気相	2.125	なし	0	130	気相破断
SST-10	液相	2.5		0	120	下部 D/W なしの影響確認
SST-11		1.75		0		中規模破断
SST-12	気相	2.125		0	70	プールの水温の影響確認
SST-14				あり	20	130

注記* : 試験開始前に PCV 内を蒸気置換すること

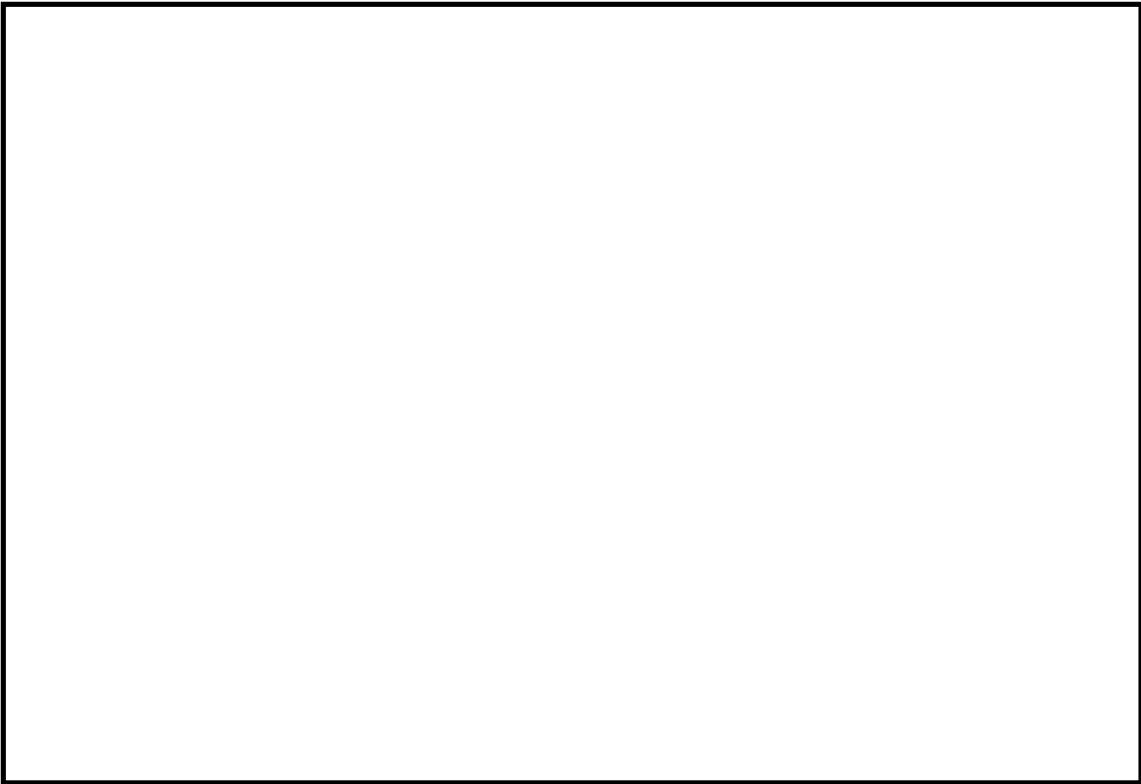


図 6 SST-4 のベント管蒸気流束

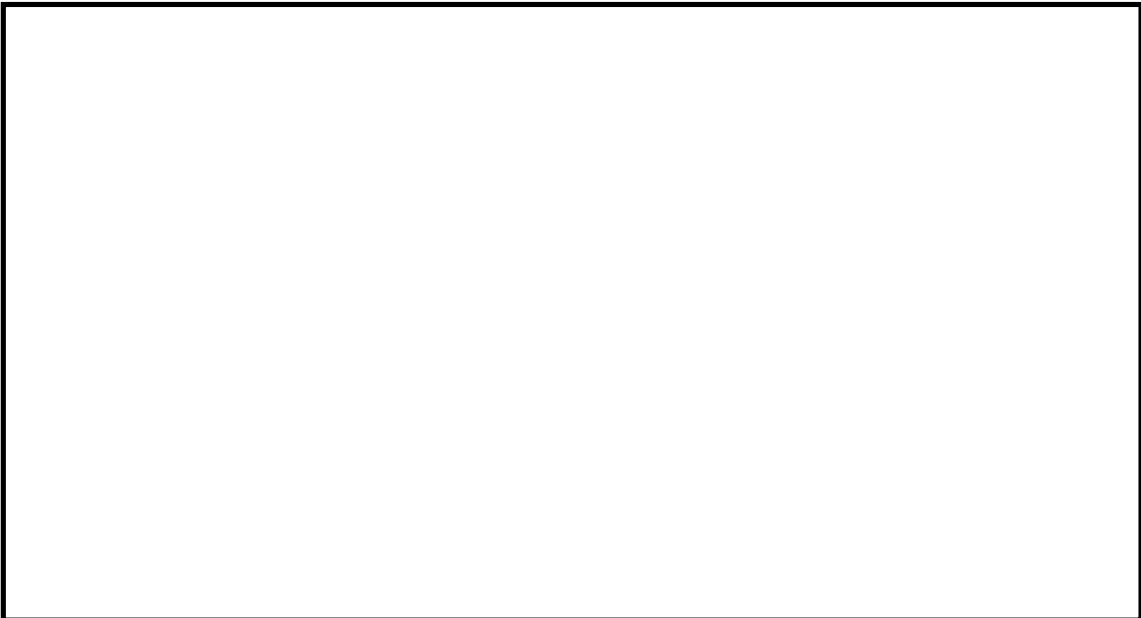


図 7 SST-4 の圧力変化

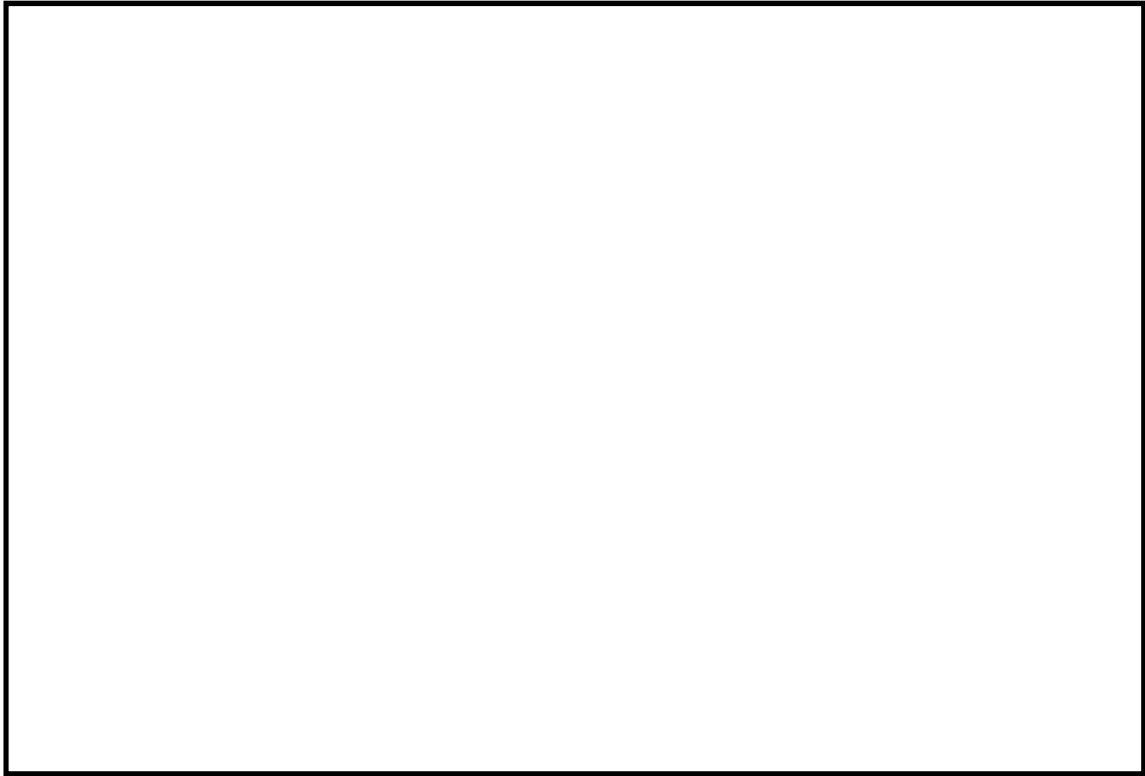


図 8 SST-2 のベント管蒸気流束

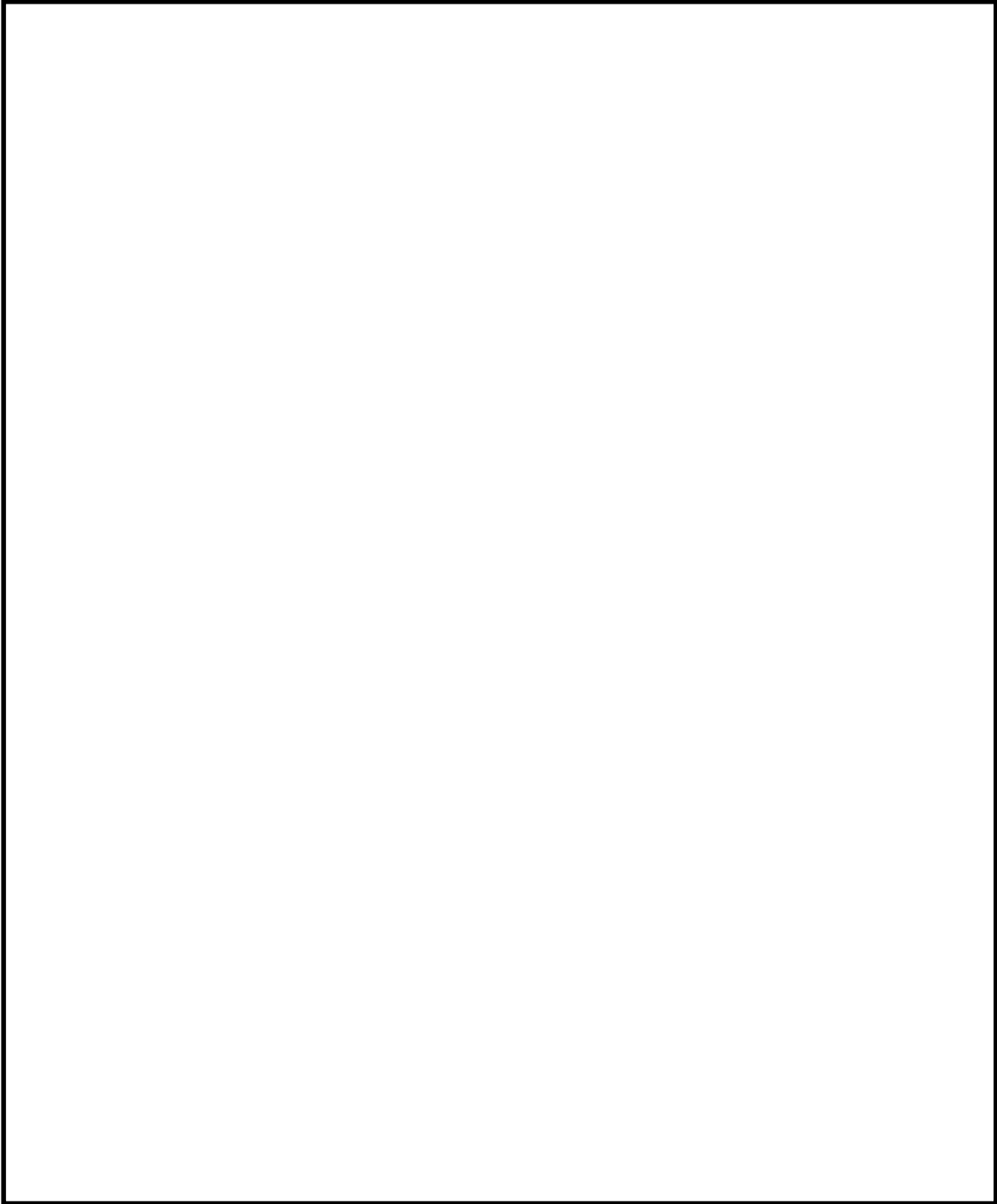


図 9 SST-2 のプール底部圧力

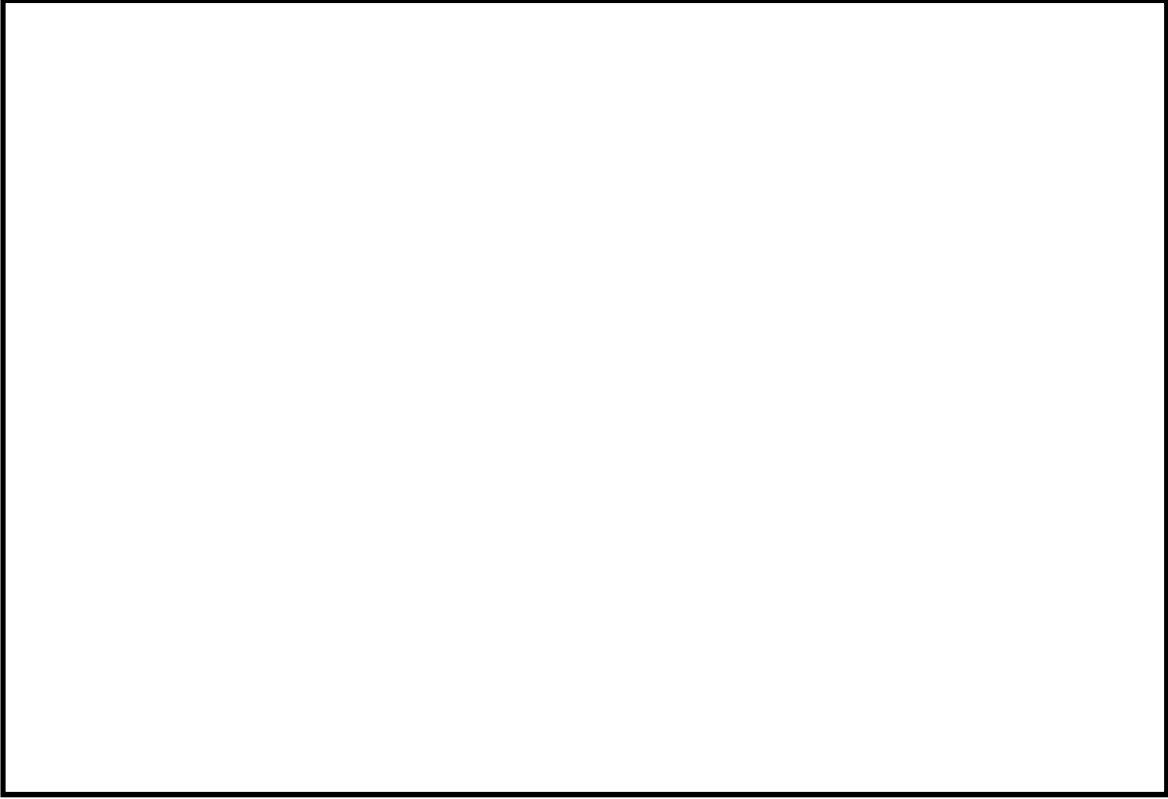


図 10 SST-1 のベント管蒸気流束

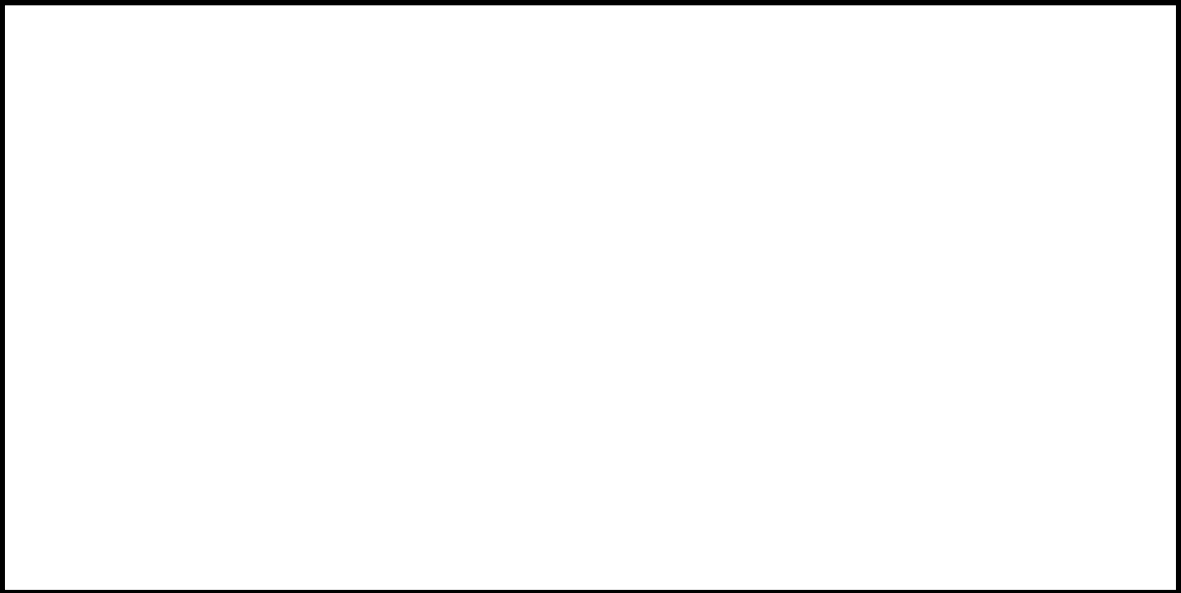


図 11 SST-1 の圧力変化

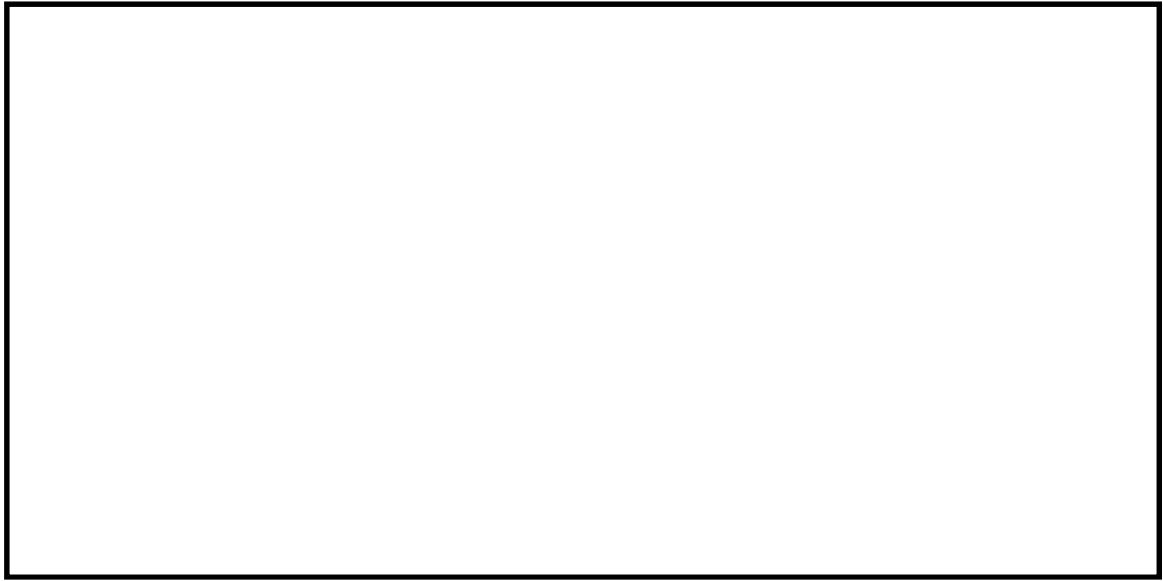


図 12 SST-2 の圧力変化

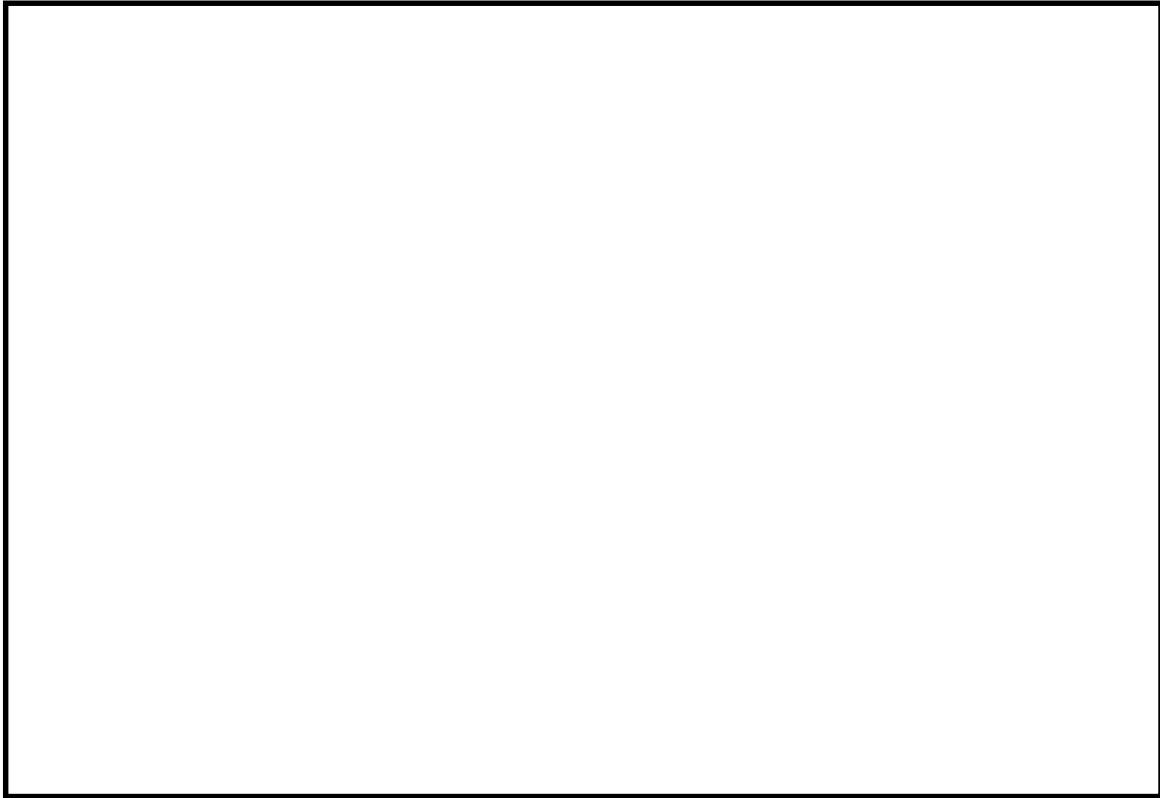


図 13 SST-5 のベント管蒸気流束

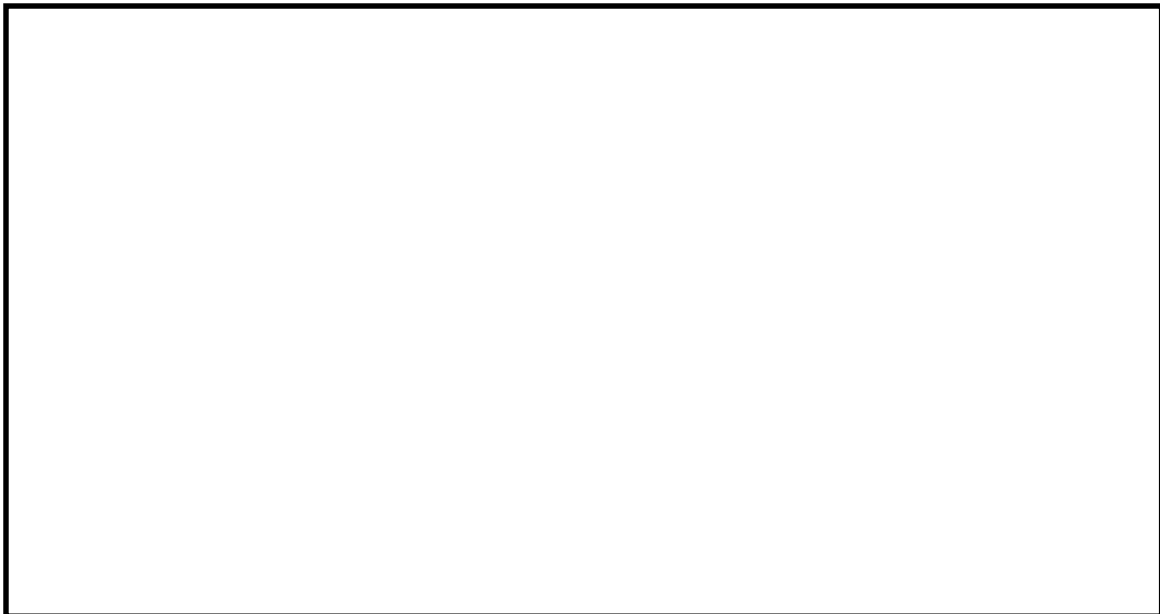


図 14 SST-5 の圧力変化

2.3 既往の DBA の CO 荷重の保守性について

また、既往の DBA の CO 荷重条件の設定においては、水平ベント確認試験の実規模試験と 1/2.5 サブスケール試験の比較から蒸气流束が同程度であれば荷重の大きさは同程度であることが確認されているものの、1/2.5 サブスケール試験で得られた荷重の大きさに保守的に 2.5 倍を乗じている。この結果、ABWR の CO 荷重は、フルスケール試験に基づき設定された Mark-II 型格納容器の荷重値に比べ相対的に厳しい荷重値となっている(表 2)。よって、DBA の CO 荷重条件は、試験で得られた結果に対し、十分な保守性をもって設定されている。

表 2 DBA の水力学的荷重の比較

型式	試験及びスケール	設計評価荷重値
Mark-II 改	旧原研 CRT (フルスケール)	
ABWR	水平ベント確認試験 (サブスケール) (フルスケール)	

2.4 結論

水平ベント確認試験の結果等より、蒸气流束が水平ベント確認試験条件の上限より増加しても、荷重は増大しないことから、溶融燃料-冷却材相互作用発生時の水力学的動荷重として、DBA における CO 荷重を用いることは妥当である。

3. 指摘事項②回答

Mark-III 型格納容器のための水平ベント管試験 (Pressure Suppression Test Facility : PSTF) では、各種スケール (1/9, 1/3, 実規模) でプールのスウェル、CO/CH 等の動荷重に係る試験が行われており、そのうち 1/9 スケール試験では図 15 のような 3 列 (各列 3 段) のベント管を有する体系で、多ベント効果のデータも取得している。プール内に隔壁を設けた時 (1 セル+2 セル) の、1 セルと 2 セルの荷重を図 16 に示す。2 セルの荷重は概ね 1 セルの荷重を下回っており、多ベント効果が確認された [6]。左記は水平方向に複数配列されたベント管による多ベント効果を示した結果であるが、多ベント効果は複数のベント管振動の非同期性に起因するものと考えられることから、複数のベント管の配列が水平方向か垂直方向かには依存せず、垂直に 3 段設置された ABWR のベント管のそれぞれについても同様の多ベント効果を有するものと考えられる。したがって、ABWR は 3 本の水平ベント管を有するものの、1 本の場合と比べても発生する水力学的荷重の観点では同等以下の荷重となると考えられる。



図 15 PSTF 試験体系 (1/9 スケール試験)

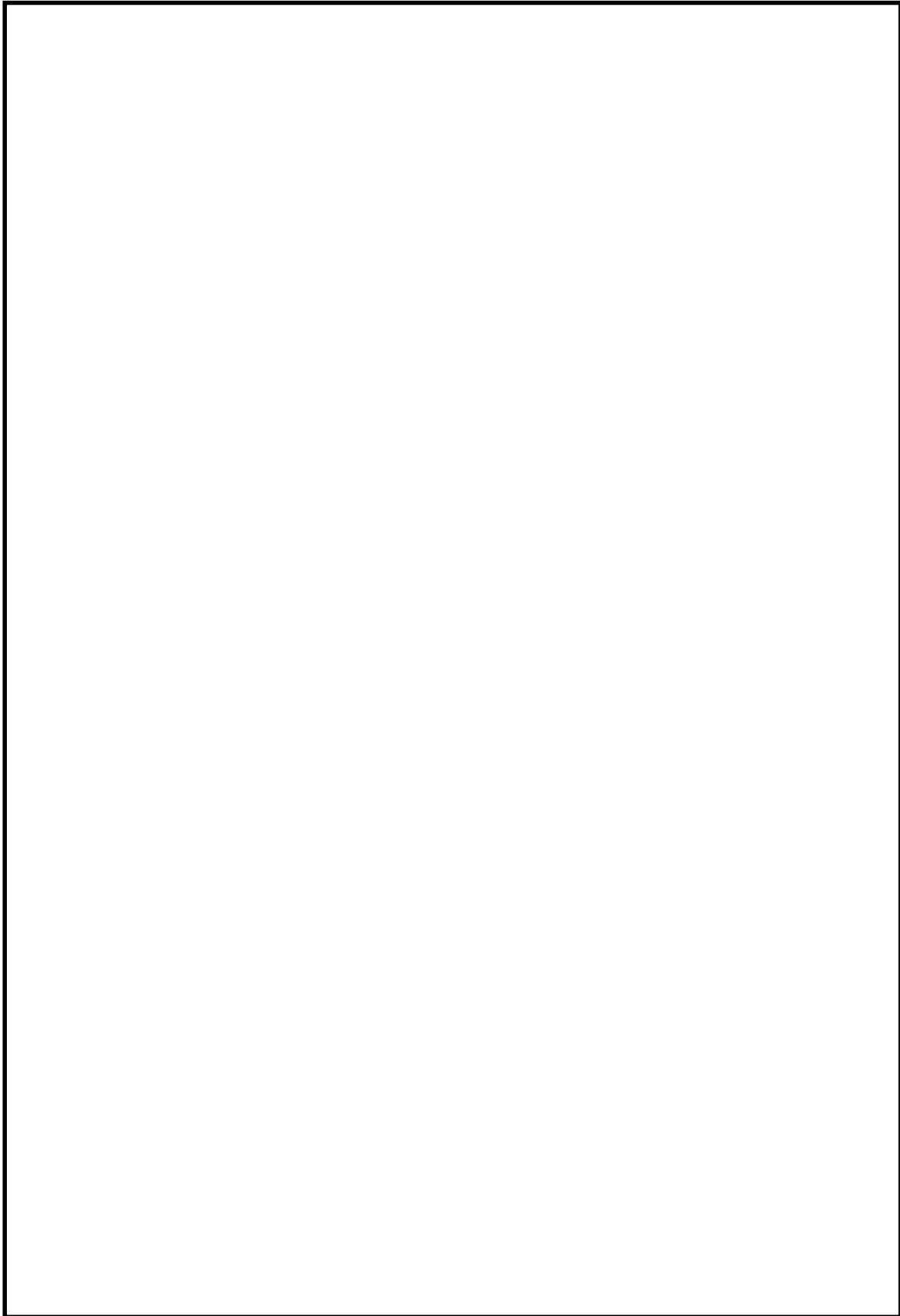


図 16 単一ベント管と多ベント管の荷重の比較

4. 参照文献

- [1] Song et al, “Steam Jet Condensation in a Pool: From Fundamental Understanding to Engineering Scale Analysis,” Journal of Heat Transfer, 2012.
- [2] “ELIMINATION OF LIMIT ON BWR SUPPRESSION POOL TEMPERATURE FOR SRV DISCHARGE WITH QUENCHERS,” General Electric Company, December 1984.
- [3] M.-H. Chun, Yeon-Sik Kim , Jee-Won Park, “AN INVESTIGATION OF DIRECT CONDENSATION OF STEAM JET IN SUBCOOLED WATER,” Int. comm. HeatMass Transfer, 1996.
- [4] “JOINT RESEARCH REPORT JOINT STUDY WITH REGARD TO “STUDY RELATED TO ADVANCED BOILING WATER REACTOR” CONTAINMENT HORIZONTAL VENT CONFIRMATORY TEST, PART I,” General Electric Company, 1987.
- [5] “格納容器压力抑制系信頼性実証試験評価委員会報告書,” 科学技術庁原子力局, 昭和 58 年 11 月.
- [6] “1/9 Area Scale Multicell Condensation and Stratification,” General Electric, 1980.

水平ベント体系における動荷重測定試験及びその成果について

1. はじめに

本資料は、Mark-III型格納容器およびABWRで採用されている水平ベント方式について、開発時に実施された確証試験の概要および当該確証試験結果から得られた知見についてまとめたものである。以下に詳細を示す。

2. PSTF 試験

2.1 試験の概要

水平ベントを有するMark-III型格納容器のLOCA時の熱水力学の特性を知るために、米国カリフォルニア州サンノゼ市にあるGE社所有の試験装置（PSTF, Pressure Suppression Test Facility）を用いて試験が行われ、Mark-III型格納容器の設計に必要なデータベースが得られた。試験期間及び主要な目的は次のとおりである。

試験期間 1973年～1980年

主要目的

- ・水平ベント系のベントクリア特性の把握
- ・0.7m径の水平ベントを介しての定格蒸気質量流束時の凝縮の実証
- ・プールスウェル特性の把握
- ・ベント出口での蒸気凝縮によりプールとベント系のバウンダリに加わる動荷重の定量化

2.2 試験装置

PSTFは、3個の圧力容器〔それぞれ、炉心部（フラッシュ・ボイラー）、ドライウエル、サプレッションプールとウェットウエル空間部に相当する〕と配管系、ヒーター系、及びデータ集録システムからなる。PSTFの概略を図2-1、2-2に示す。

各圧力容器は、BWR-6のMark-III型格納容器1/135のスケール（Mark-IIIのベント1列分相当）を基本としているが、ベント及びプールについては、図2-2に示すように、full scale, 1/3 area scale, 1/9 area scaleのものが行われた。

2.3 試験結果

試験は、15シリーズ、213回のブローダウンテストが行われた。

試験ではプールスウェル、蒸気凝縮時荷重に関するデータが得られ、蒸気凝縮振動（以下「C0」という。）荷重については、スケール則の妥当性が確認された（3.4③）。また、1/9スケール試験において多ベント効果による荷重の低減が確認されている。

プールスウェルでは、蒸気流と空気流で各々試験を行い、蒸気の場合、プール水での凝縮があるため、図2-3に示すように、プールスウェルは緩和されることが確認された。図2-4～2-6は、プールスウェル解析モデルの検証として、PSTF装置で得られた試験結果との比較を行ったものであり、スウェル高さ、速度は保守的に評価されている。

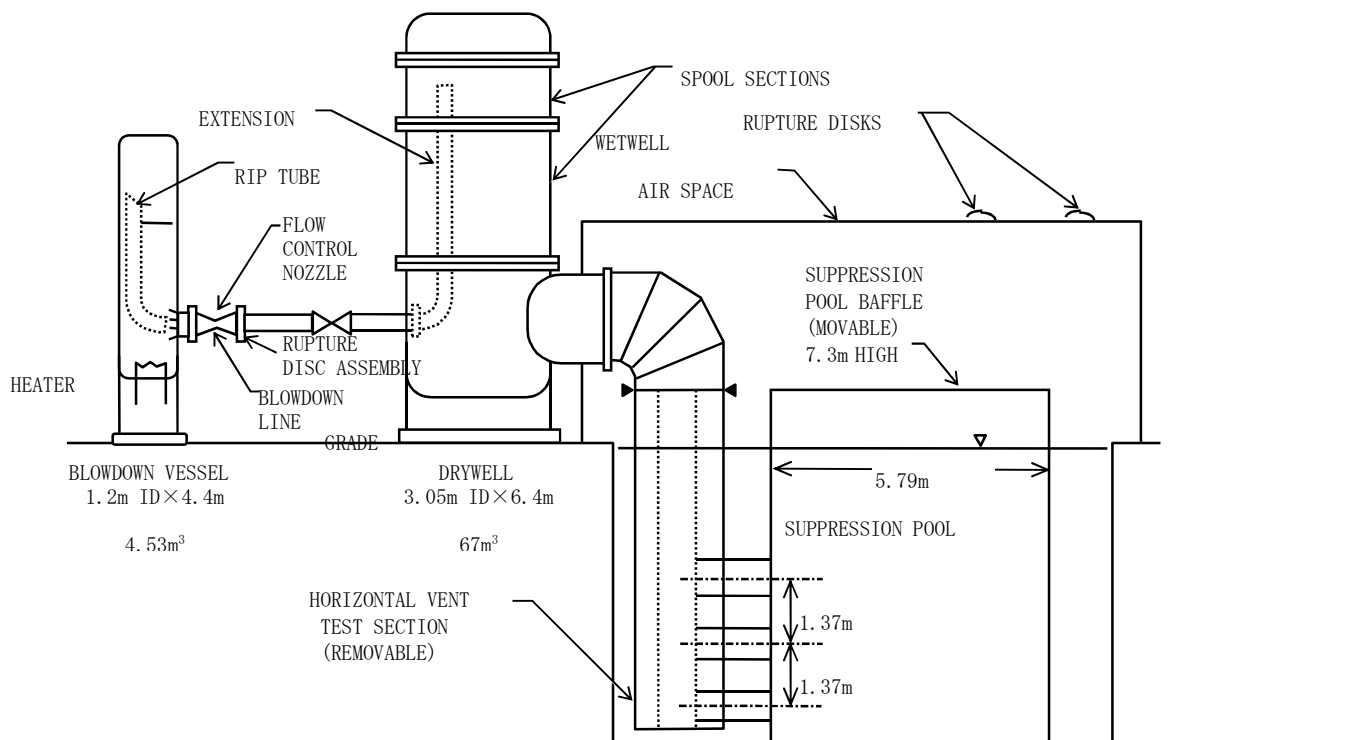


図 2-1 PSTF 試験装置 (立面図)

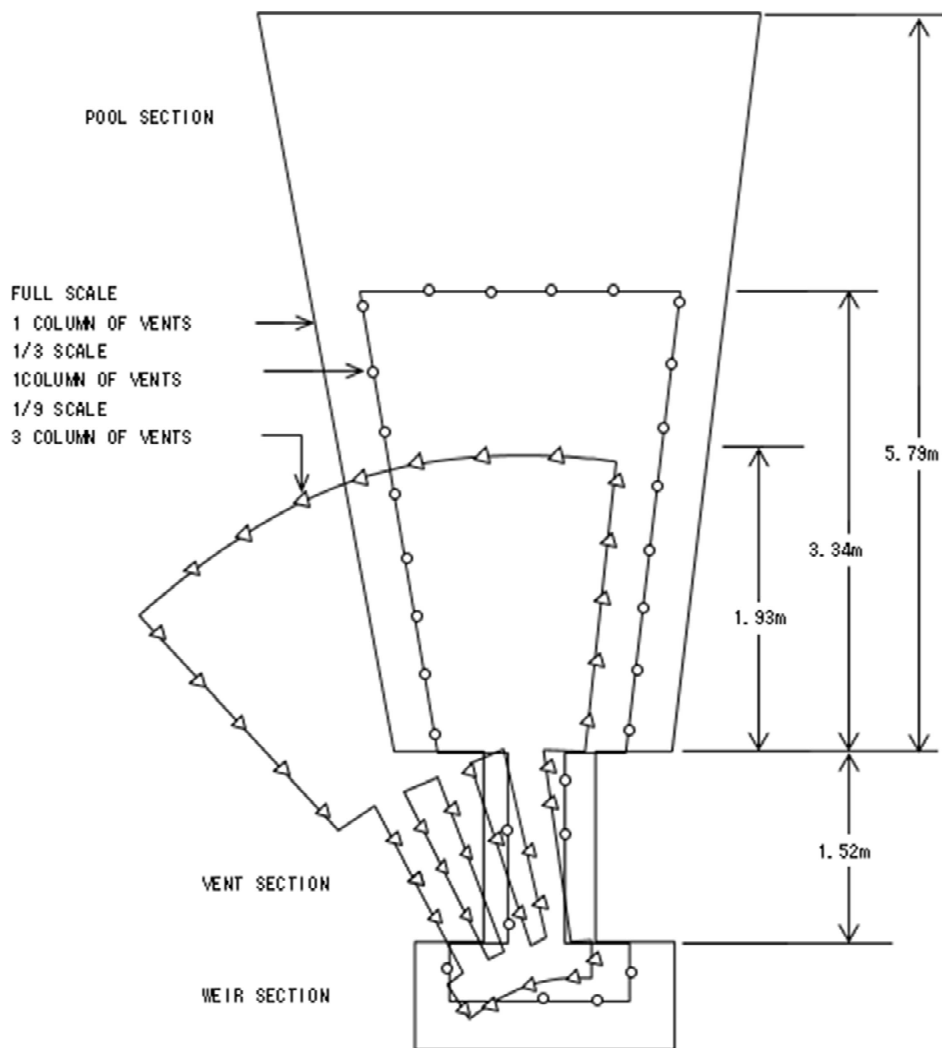


図 2-2 PSTF 試験装置 (平面図)

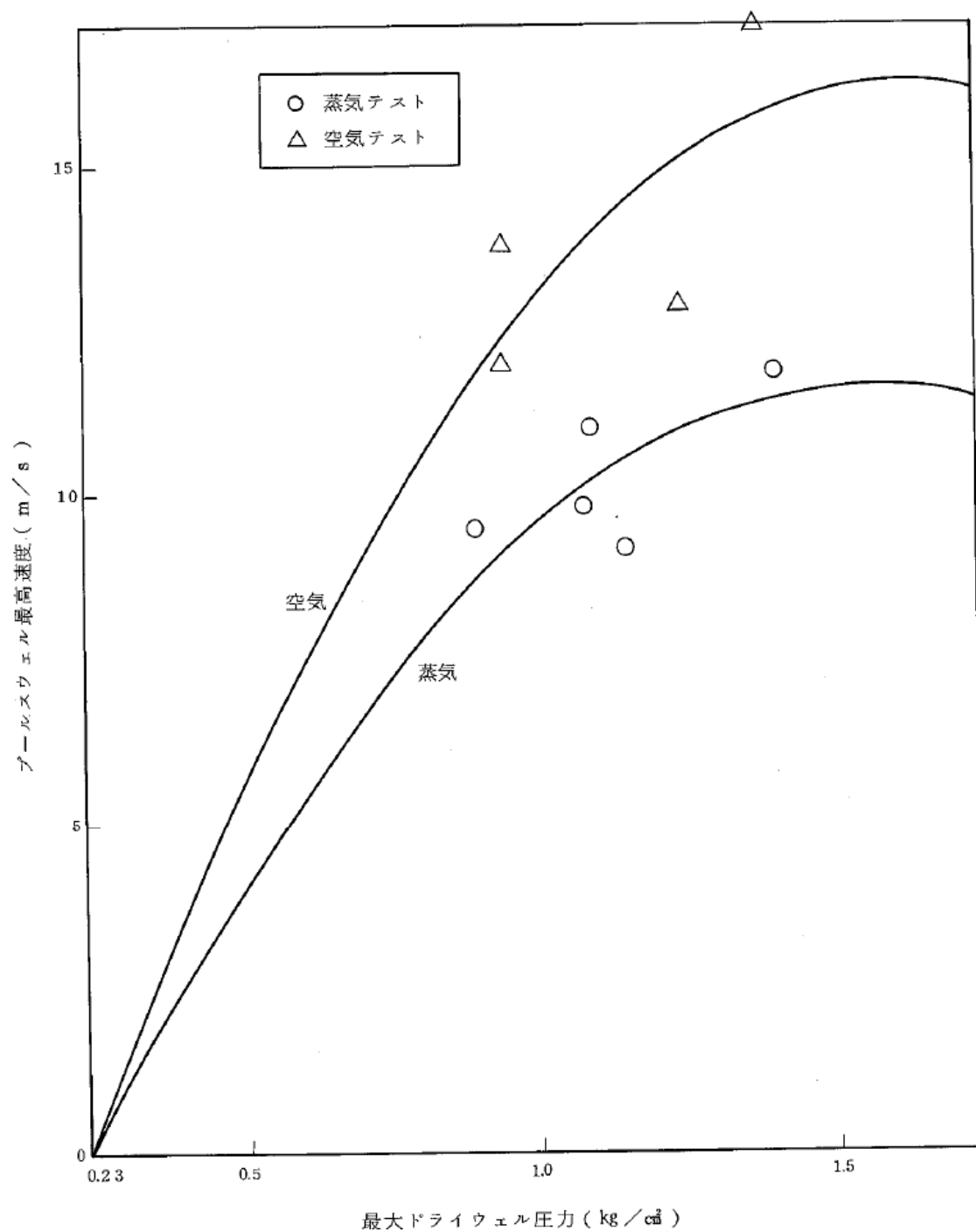


図 2-3 空気流によるテストと蒸気流によるテストの比較

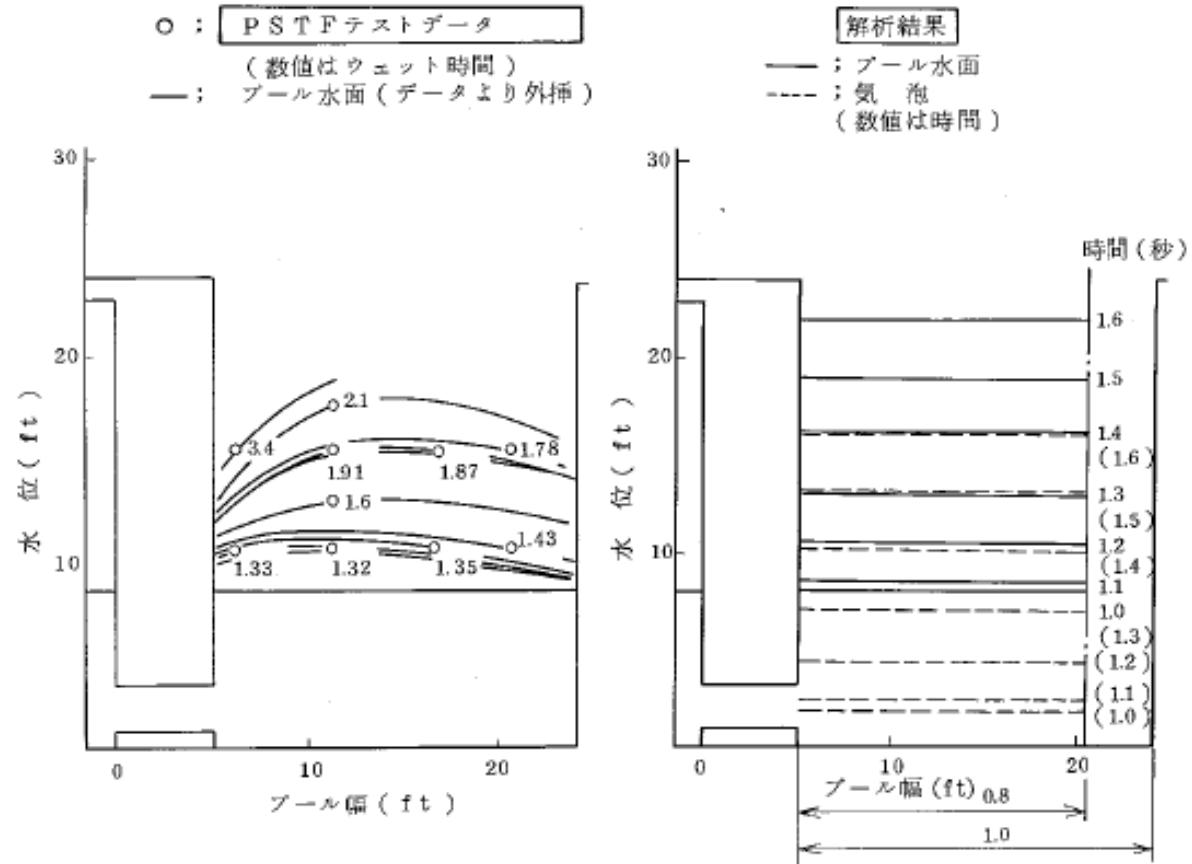


図 2-4 PSTF 実規模試験結果と解析結果の比較

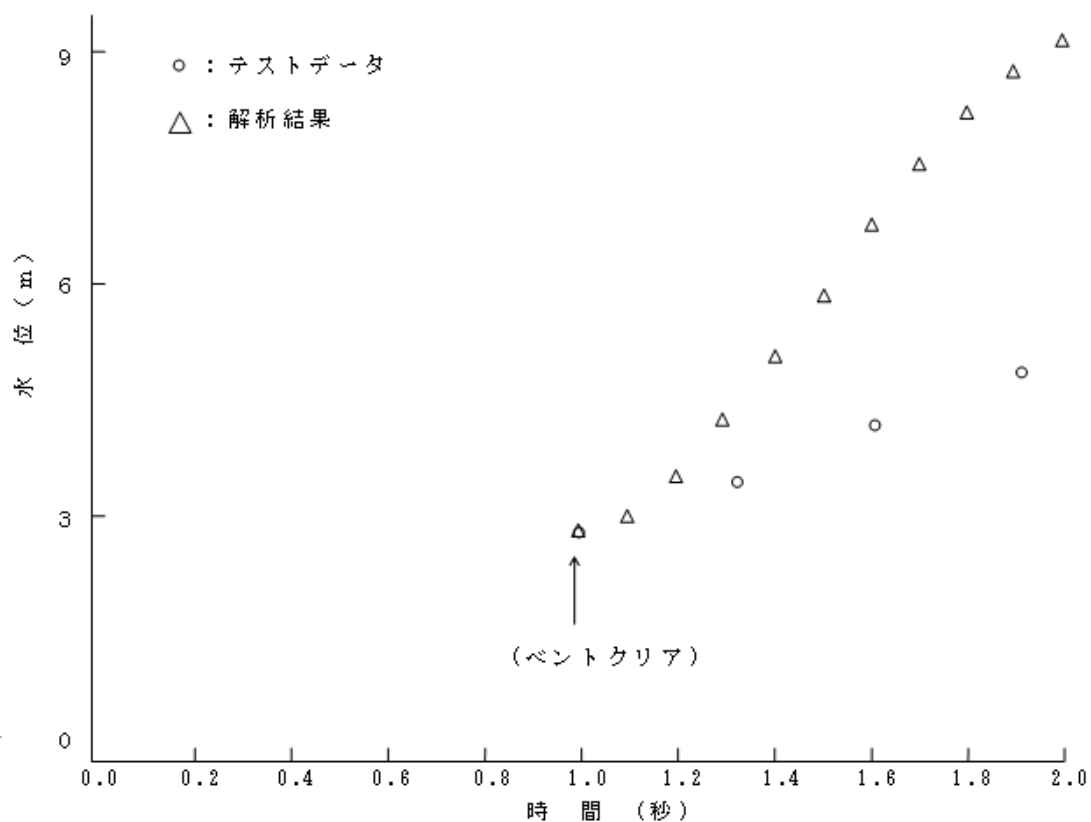


図 2-5 PSTF 実規模試験結果と解析結果の比較

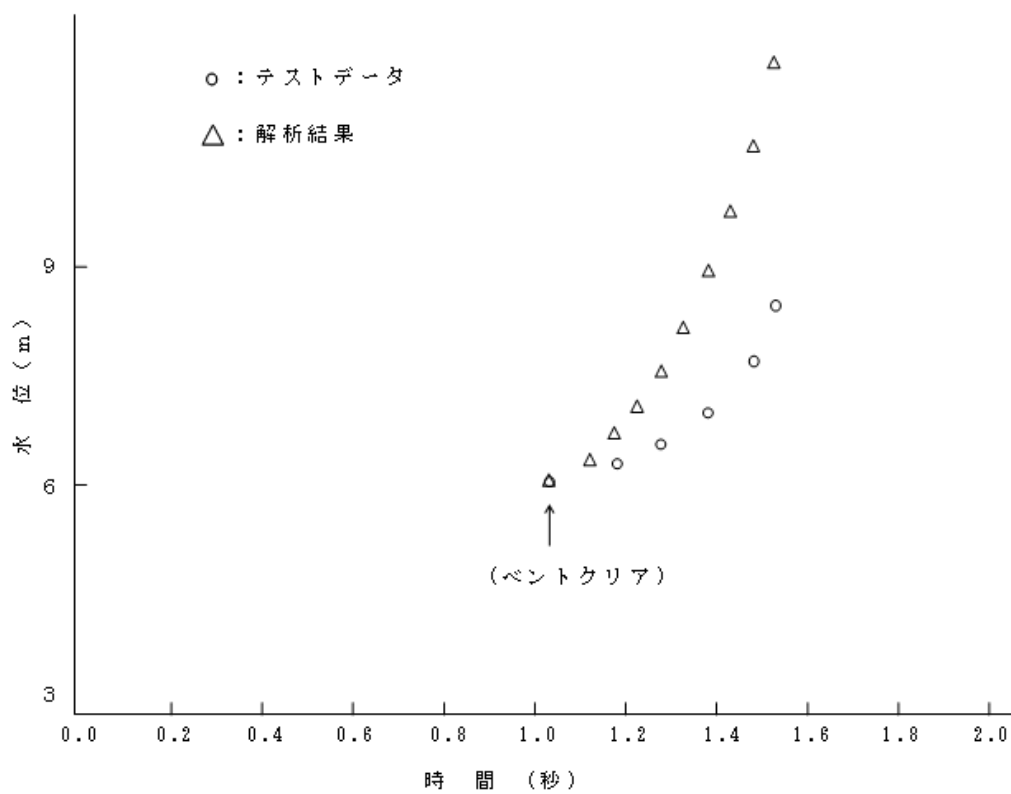


図 2-6 PSTF 1/3 規模試験結果と解析結果の比較

3. ABWRにおける水平ベント確証試験

3.1 試験の目的

ABWRで採用されている水平ベントは、米国GE社のMark-III型格納容器に採用されているベント方式と同様なものであり、Mark-III型格納容器の水平ベントでLOCA時に生じる水力学的動荷重の特性は、GE社が、水平ベントの性能とLOCA時の荷重を決定するために、PSTFで行った200回を超える確証試験によって把握されている。

しかしながら、Mark-III型格納容器とABWR格納容器ではベント系の寸法、圧力抑制室の背圧等が異なっていること、及び蒸気凝縮は非線形現象であることに鑑み、図3-1に示す構造上の相違の影響を定量的に把握するための確証試験を実施した。

3.2 試験装置

本確証試験は実機の1/10 (36°) セクタを模擬し、米国GE社がMark-IIIの開発において製作したPSTF試験装置を改造して行った。試験装置は実規模試験装置と1/2.5規模試験装置からなり、いずれも蒸気発生器、上部ドライウエル、下部ドライウエル、ベント管、サプレッションプール及び付属機器から構成される。これらは、蒸气流束の違いにより生ずる現象が異なるため、それぞれの現象毎に実機の熱水力条件を十分に包含できるようにしたものである。表3-1に試験装置計画の基本的な考え方を示す。図3-2および図3-3は、試験装置の概略図である。また、サプレッションプールは実機と同様にコンクリートで固定し、FSI (流体構造連成) が発生しないよう配慮した。

図3-4に容器内計装の位置と項目を示す。各部圧力、差圧、温度を測る計装の他にサプレッションプールの水位変動をみるためのコンダクティビティ (導電率) 計測系、サプレッションプール壁面の振動を測定するための加速度計等からなる。

図3-5はベント系の計装を示した図である。各部の動的圧力、温度、コンダクティビティ計測系の他に、チャギング (以下「CH」という。) 時に水平ベント部に衝撃荷重が加わる可能性があることから、これを測定するためのロードセルを設置した。

3.3 試験条件

試験条件は当時の知見を踏まえて、CO及びCHに関して十分に保守的なデータが取れるように設定した。すなわち、CHに対しては、プール水温度の低い領域、COに対してはプール水温が高く、ベント管内の蒸气流束の高い領域での試験を中心に行うこととした。

また、以上をベースケースとして、今までの知見との整合性、各熱水力条件の影響の度合を知るためにパラメータ試験を実施した。パラメータとして考慮したものは以下の項目である。

- (1) プール水温度
- (2) ベント流内の空気含有率
- (3) 圧力抑制室背圧
- (4) 破断相の効果

表3-2に試験マトリクスを示す。

なお、CHはCOを経て起こる現象であり、この時点では圧力抑制室内の空気含有率はほぼ零となっているが、本実験においてはCHに対するプール水温度の効果を評価する際、あらかじめドライウェル内をプリパージ*しておき空気含有率が低い状態で試験を行っている。このため、これらの試験条件の妥当性を確認するために、プリパージを行ったものと、行わなかったものとの初期のCH振動を比較し、結果に差異のないことを確認した。

注記*：プリパージとは試験装置（図3-2参照）の下部ドライウェル、ベント管等の空間部からあらかじめ空気を追い出し、蒸気雰囲気にしておくことである。

3.4 試験結果

試験ではCOおよびCHに関するデータが得られ、CO荷重については、ABWR体系でもスケール則が適用できることが確認された。

① CO荷重

図3-6は1/2.5規模試験で得られたCO時のプール壁圧力振動の典型例である。従来と同様に連続的な圧力振動が観測された。また、図3-7～図3-9はパラメータ試験の結果に基づいて熱水力のパラメータとCO荷重の振幅の関係を示したものである。図3-7と図3-8より破断面積が大きくプール水温が高い領域でCOは大きくなる。また、図3-9より圧力抑制室の背圧に対しては背圧の高い方が荷重が小さくなる。

図3-10は、全試験で得られたCO荷重のPower Spectrum Density（以下「PSD」という。）の包絡を示したものである。□ Hz, □ Hz, □ Hzに卓越した周波数が存在している。これらはCO時の凝縮振動の繰り返し周期に相当している。

図3-11は、試験の熱水力条件と実機の想定される事故時の熱水力条件を比較したものである。CO荷重の評価については、小規模試験の結果により評価を行うが、前述の結果により、CO荷重はベント管出口蒸気流速が高い方が*、また、プール水温が高い方が厳しくなることが判っているので、実機で想定される事故時の熱水力条件を十分に保守側に包絡している。

注記*：破断口径の異なる試験の比較においては、破断口径が大きく蒸気流束の大きい試験において荷重が大きくなる傾向がみられたが、大口径の破断を模擬した試験においては、試験開始後時間遅れを伴ってCO荷重の振幅が増大する現象がみられている。このため、CO荷重については、蒸気流束に単純に比例するのではなく、荷重の増大が頭打ちとなる蒸気流束の上限があると考えられ、試験における蒸気流束は、このCO荷重が最大となる蒸気流束を包絡する条件となっていると考えられる。

② CH荷重

図3-12は実規模試験で得られたCH時のプール壁圧力振動の典型例である。従来と同様に間欠的な圧力振動が見られた。圧力振動のPSDは□Hzに顕著なピークを示しているが、これはプール内の上下方向の圧力定在波（プールアコースティック）に相応している。また、プール壁圧力振動を示す図3-12では、ベント系での圧力振動が顕著に出ておらず、図3-13に示した日本原研のCRT試験装置（垂直ベントでの圧力抑制試験）と異なった特徴が見られる。ただし、この結果は同じ水平ベントのPSTFの試験でも観測されており、水平ベントの特徴である。

図3-14はCHのパラメータ試験の結果に基づいてプール水温依存性を示したものであるが、低プール水温で大きなCHが発生することがわかる。図3-11には、本実規模試験の熱水力条件と実機の想定される事故時の熱水力条件の比較を示したが、試験範囲は十分に実機条件を包含していることが分かる。

すなわち、実機のサプレッションプール水温の下限については、原子炉格納容器の最低使用温度10℃を考え、その後の蒸気凝縮でのプール水温の上昇を加えて、実験条件を設定しているものである。

③ スケール則

Mark-IIIで水平ベントを開発する際に、GE社はC0に関するスケール則を確立した。これは、蒸気の凝縮に係わるプール水のサブクール度と蒸気泡の大きさを表現されており、図3-15に示す関係式であらわされる。

図3-16は、本確認試験において、実規模試験と1/2.5規模試験のC0をほぼ同一熱水力条件で比較したものであるが、スケール則の予測通り圧力振幅はほぼ同じで、振動数が約2.5倍異なっていることがわかる。

したがって、C0のスケール則が成り立つことが、本確認試験でも確認された。

④ 設計評価荷重の設定

設計評価荷重の設定に当たっては、ソース荷重法を適用している。ソース荷重法の概要を図3-17に示す。

本手法では、まず、試験体系を模擬した解析モデルにおいてベント管出口にソースを与えた時の圧力振動が、試験における圧力振動をエネルギー特性（PSD）の観点で包絡するようにソースを設定する。試験における圧力振動については、周波数も考慮した振幅の大きな振動を代表圧力振動として選択して用いる。

次に、実機体系を模擬した解析モデルにおいて、試験結果に基づき設定したソースを入力条件として与え、実機プールバウンダリ上の圧力振動荷重(C0/CH)を評価する。この結果得られた荷重を設計評価荷重とする。

表 3-1 試験装置計画の基本的な考え方

- (1) 圧力抑制室は対称性を有しているのでセクターで模擬する。
(ベント系 1 本分)
- (2) ベント出口の蒸気流束に応じて 2 種類の試験装置を使い分ける。

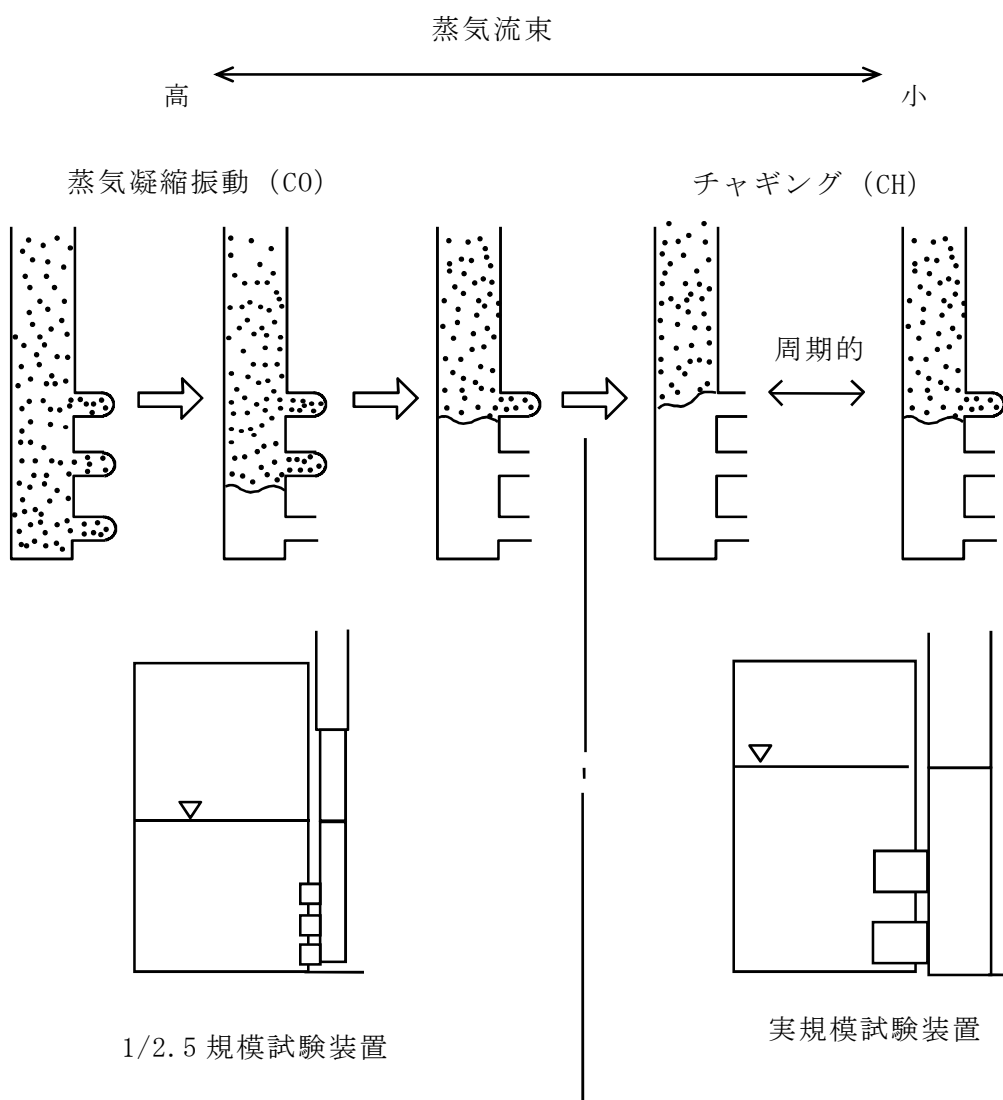


表 3-2 試験マトリクス

テストケース	スケール	破断直径 (mm)	初期プール水温度 (°C)	破断タイプ	プリパージ	圧力制御室初期圧力 (kg/cm ²)	試験実施数	試験目的
1	Full	54	21	Steam	Yes	1.4	2	} (CH のベースケース) CH に対する プール水温度の効果
2	"	"	49	"	"	"	"	
3	"	"	68	"	"	"	"	
4	"	97	"	Liquid	"	"	"	} CO スケール則確認 (等蒸気流速となる条件)
5	Sub	44	"	"	"	"	"	
6	"	64	49	"	No	0	2	} 最大破断事故模擬 (CO のベースケース) CO に対する 空気含有率の効果
7	"	"	"	"	Yes	0	1	
8	"	"	"	"	"	1.4	"	} CO に対する 圧力抑制室背圧の効果
9	"	"	"	"	"	2.8	"	
10	"	"	21	"	No	0	"	CO に対する プール水温度の効果
11	"	54	54	Steam	"	"	"	CO に対する 破断相の効果
12	"	64	49	Liquid	"	"	"	CO に対する 下部ドライウエルの効果 (下部ドライウエル無し)
13	"	44	54	"	"	"	"	CO に対する 破断面積の効果 (中破断模擬)



図 3-1 ABWR 格納容器の水平ベント確認試験の必要性について

注：プール奥行きは、1/2.5
規模試験装置と同じである。

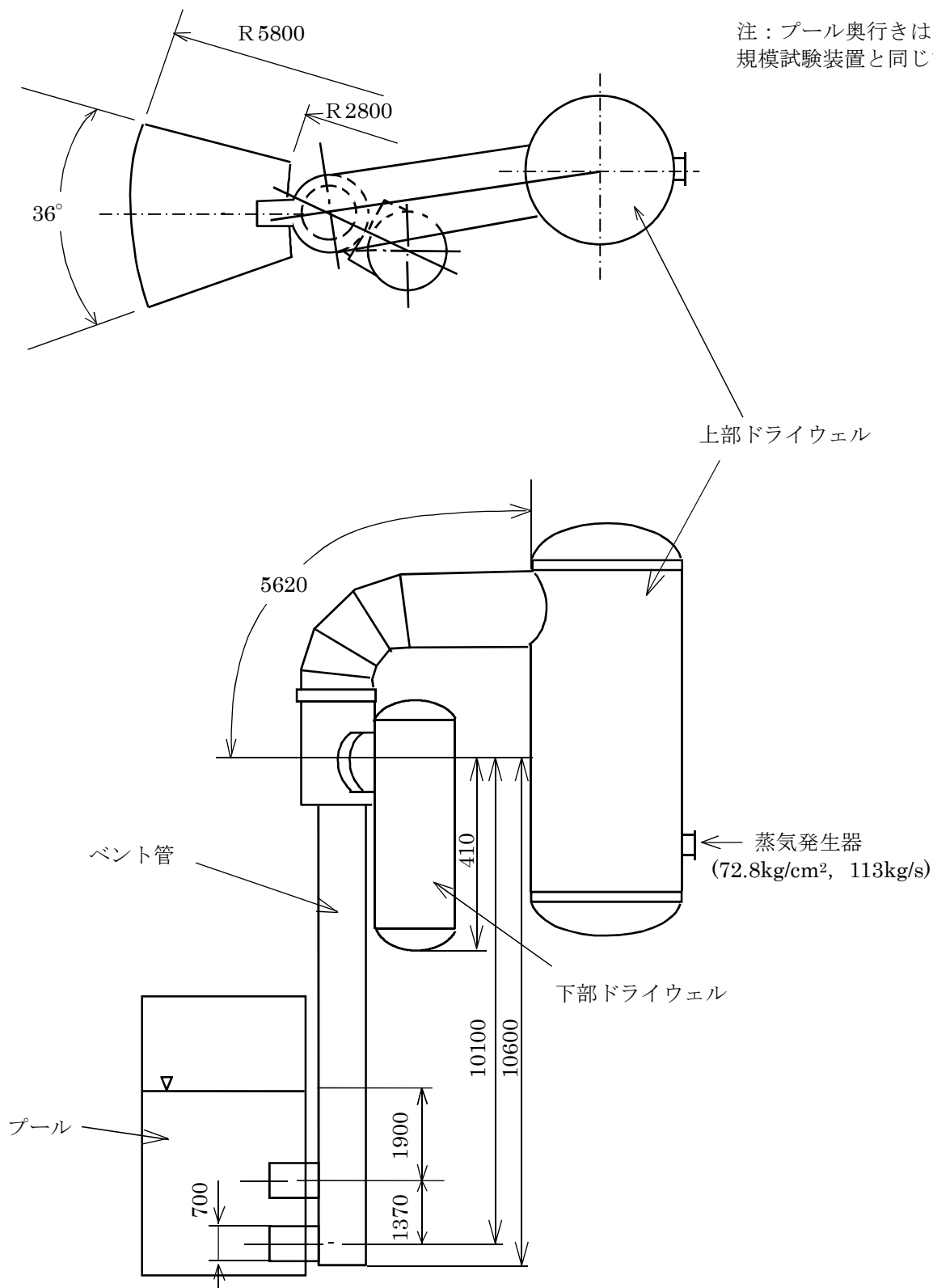


図 3-2 試験装置の概略図 (実規模試験装置)

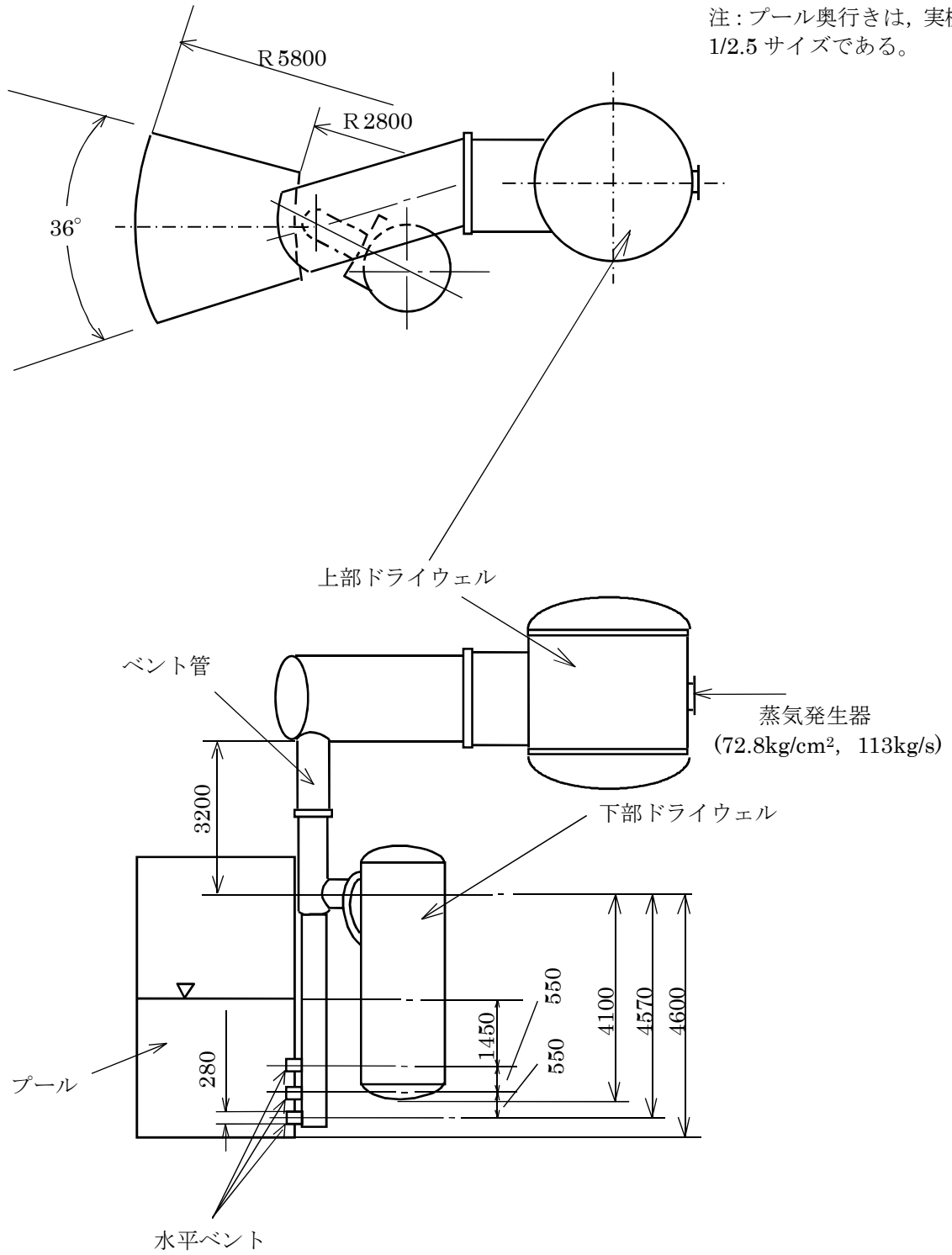
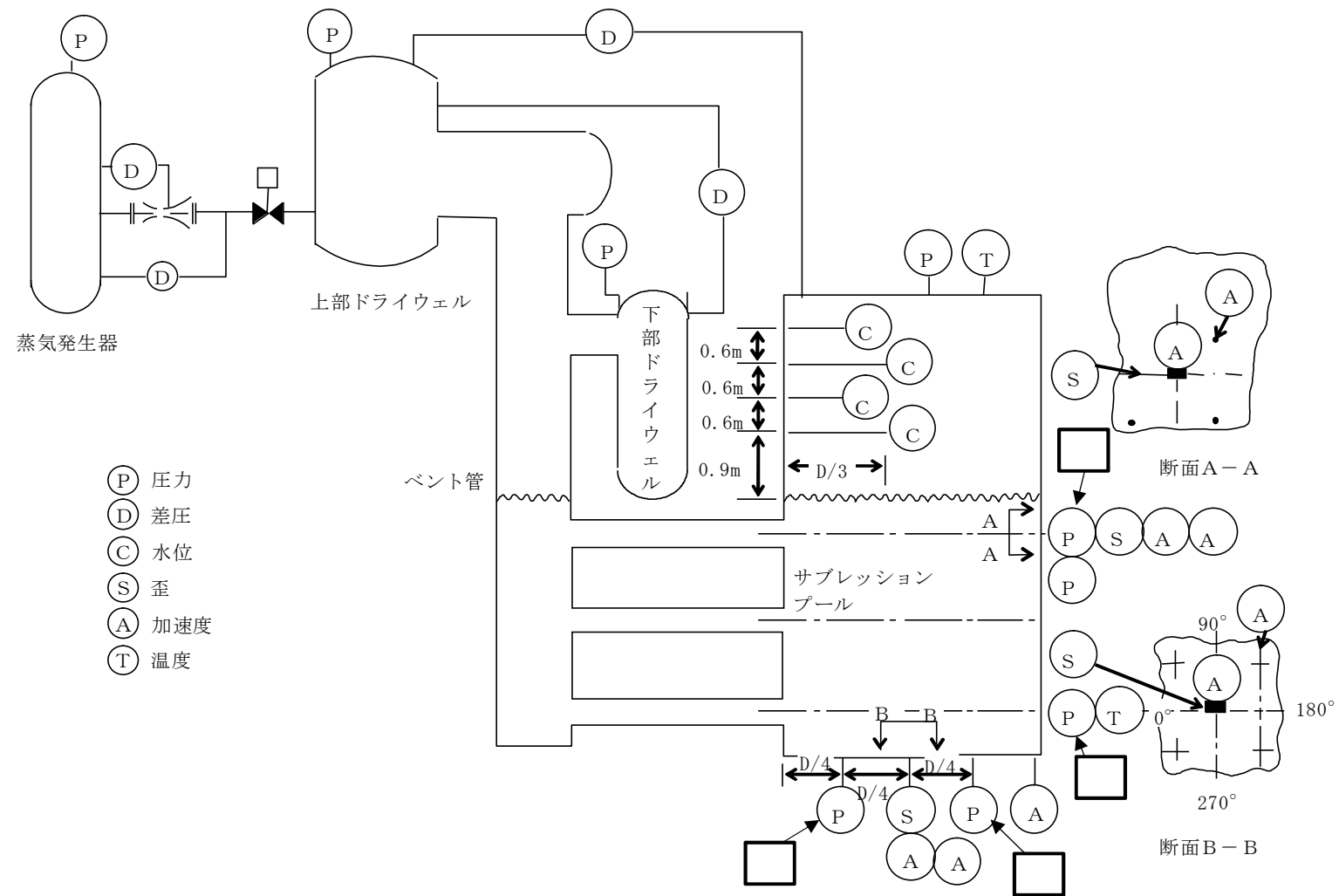


図 3-3 試験装置の概略図 (1/2.5 規模試験装置)



- Ⓟ 圧力
- Ⓧ 差圧
- Ⓒ 水位
- Ⓢ 歪
- Ⓐ 加速度
- Ⓣ 温度

図 3-4 試験装置のドライウエル及び圧力制御室の計装

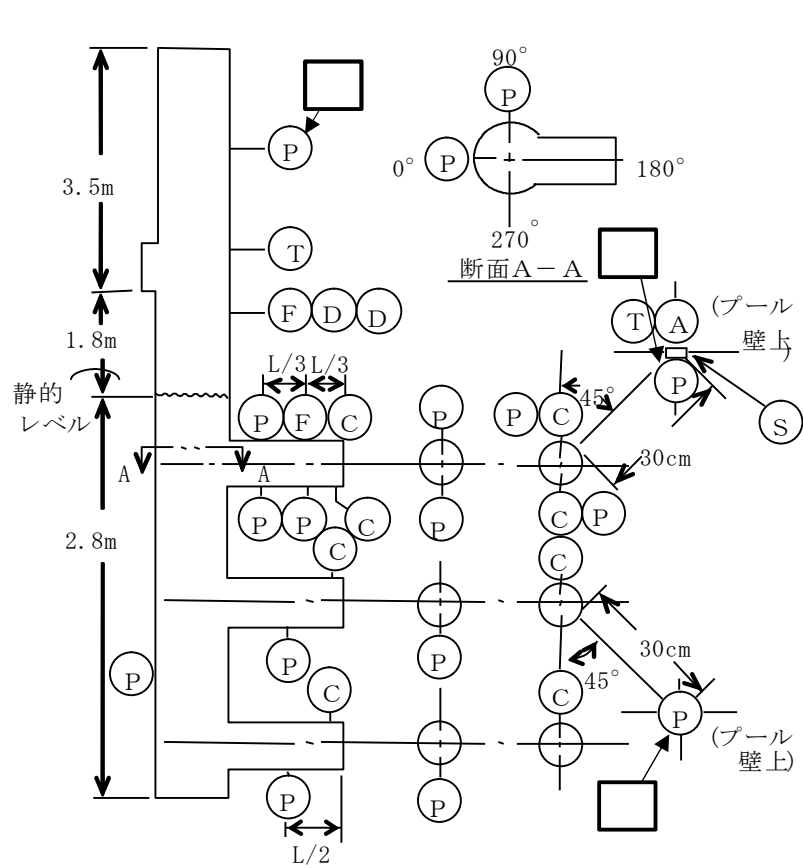


図 3-5 (a) 1/2.5 規模装置ベント系の計装

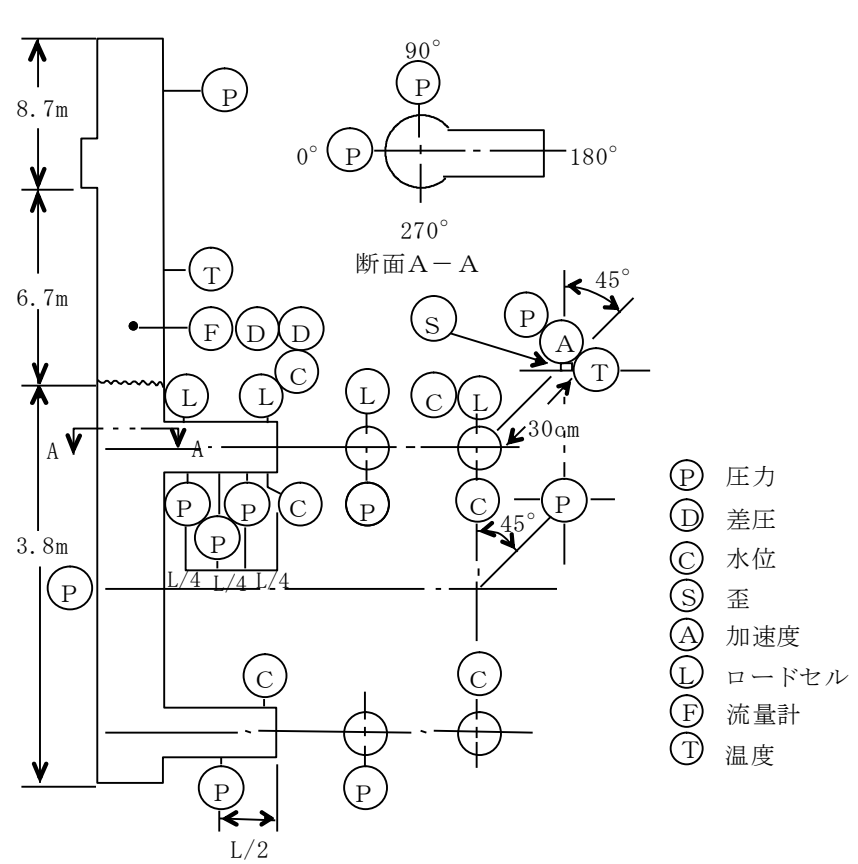


図 3-5 (b) 実規模装置ベント系の計装

- Ⓟ 圧力
- ⓓ 差圧
- Ⓒ 水位
- Ⓢ 歪
- Ⓐ 加速度
- Ⓛ ロードセル
- ⓕ 流量計
- Ⓣ 温度

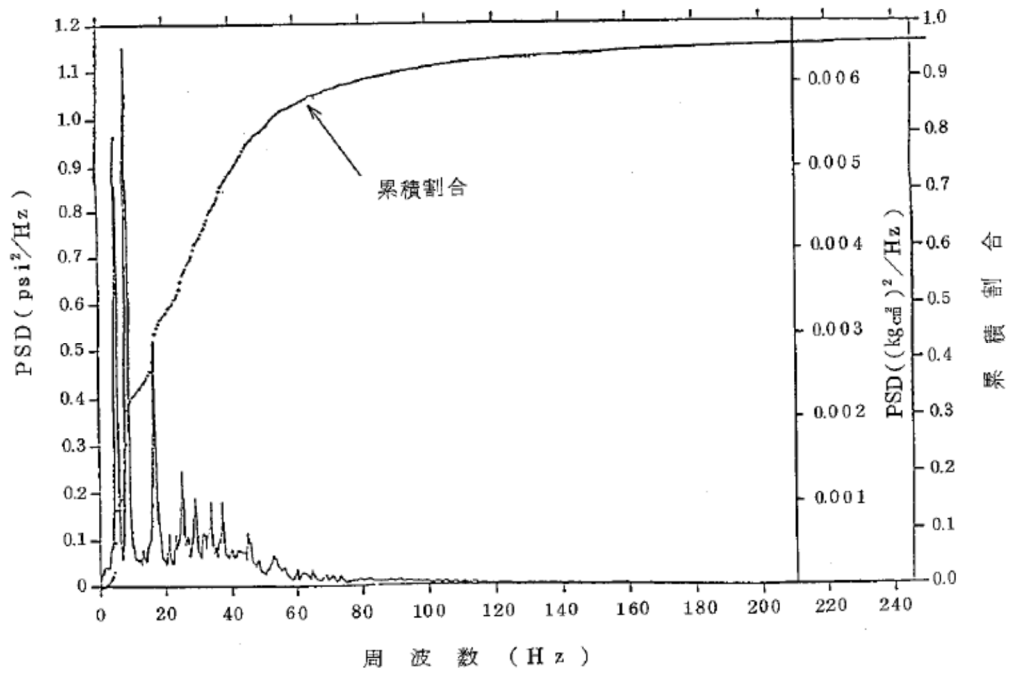
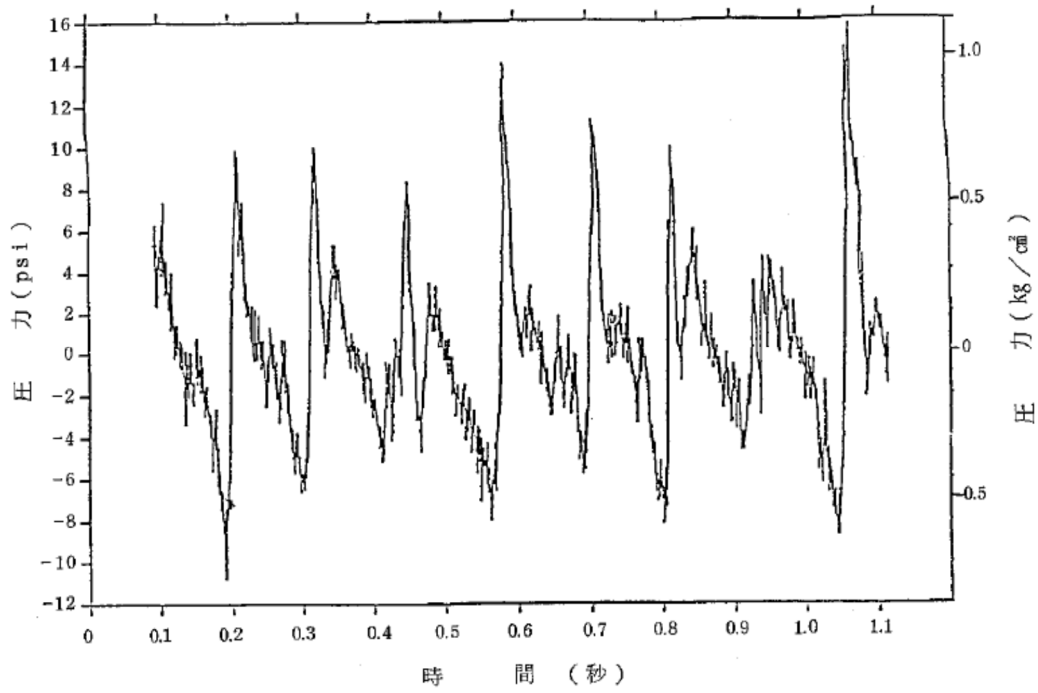


図 3-6 蒸気凝縮振動の一例

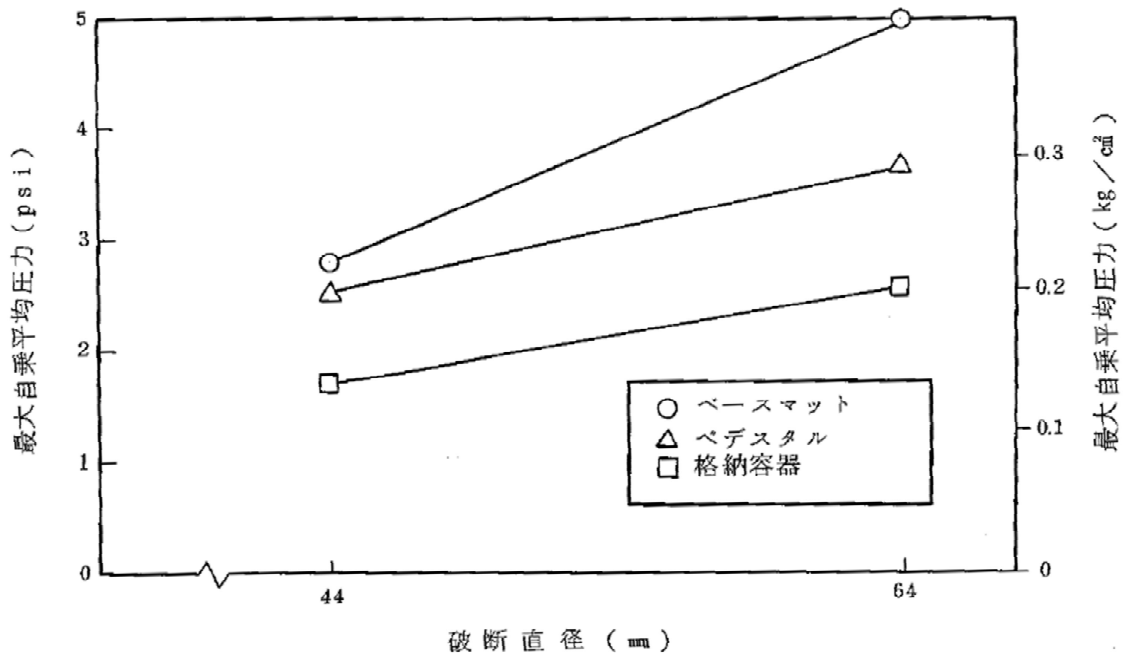


図 3-7 破断直径との C0 の振幅の関係

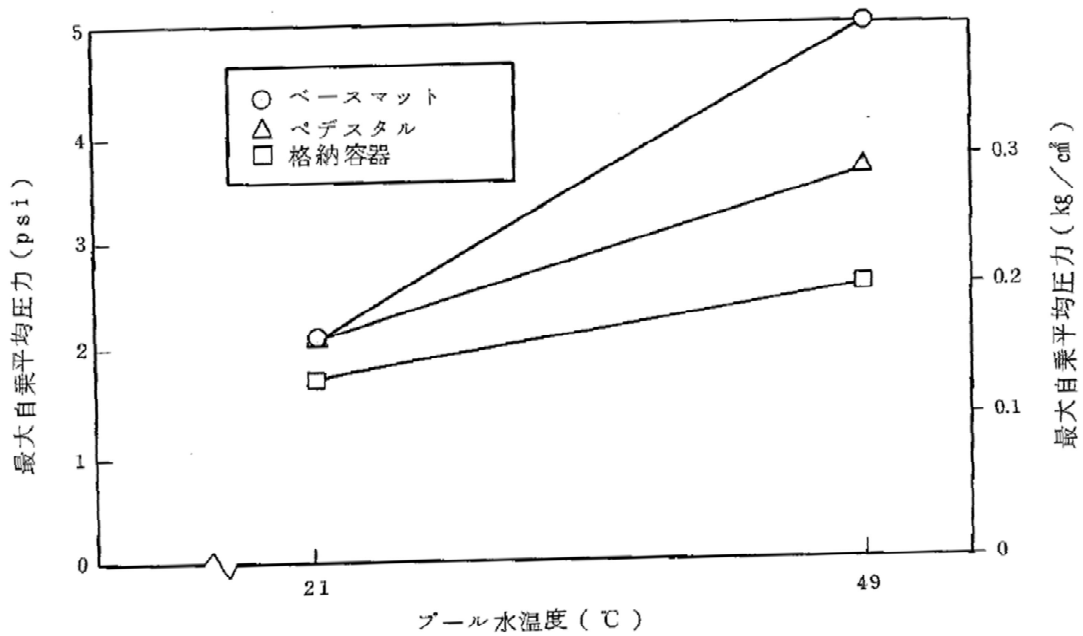


図 3-8 プール水温と C0 の振幅の関係

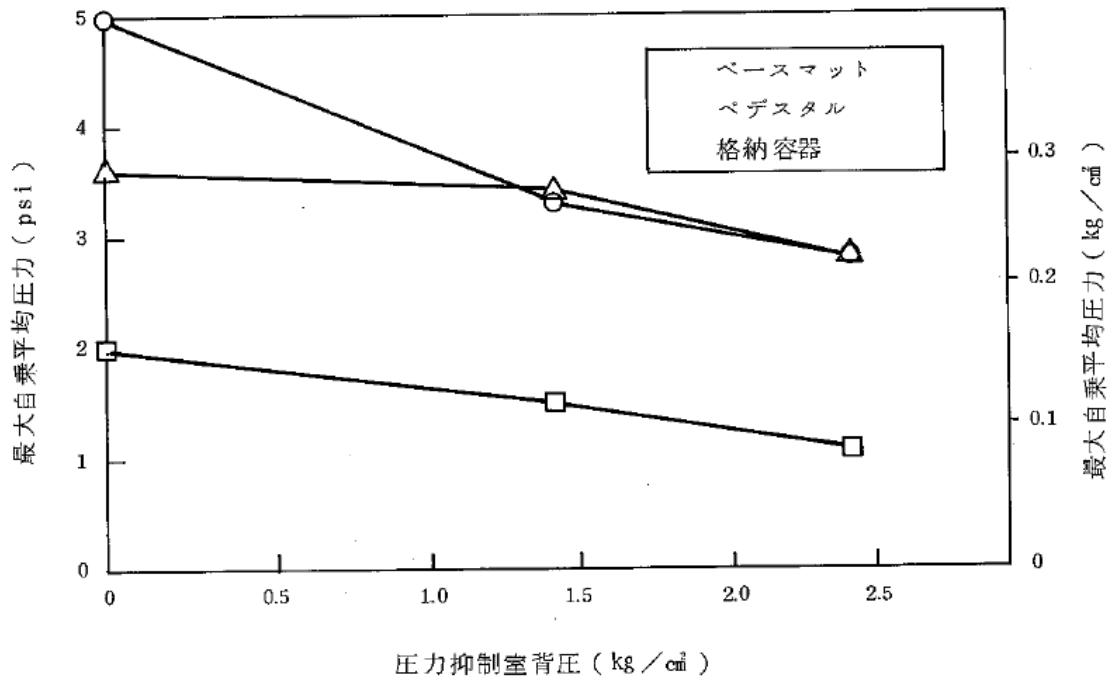


図 3-9 圧力抑制室の背圧と CO の振幅の関係

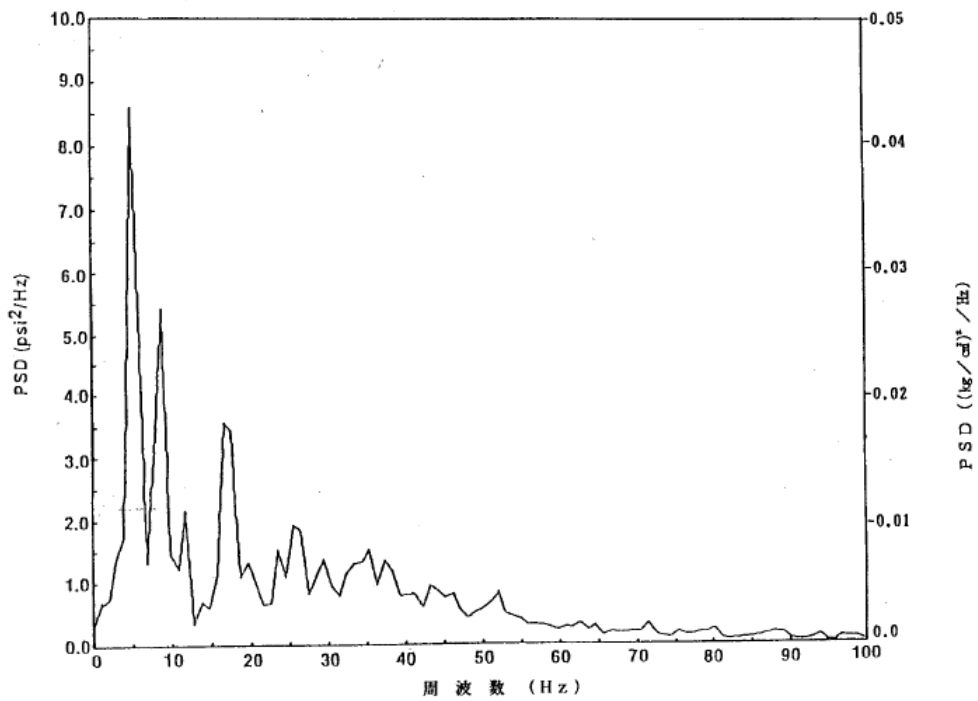


図 3-10 全 CO 荷重の PSD 包絡

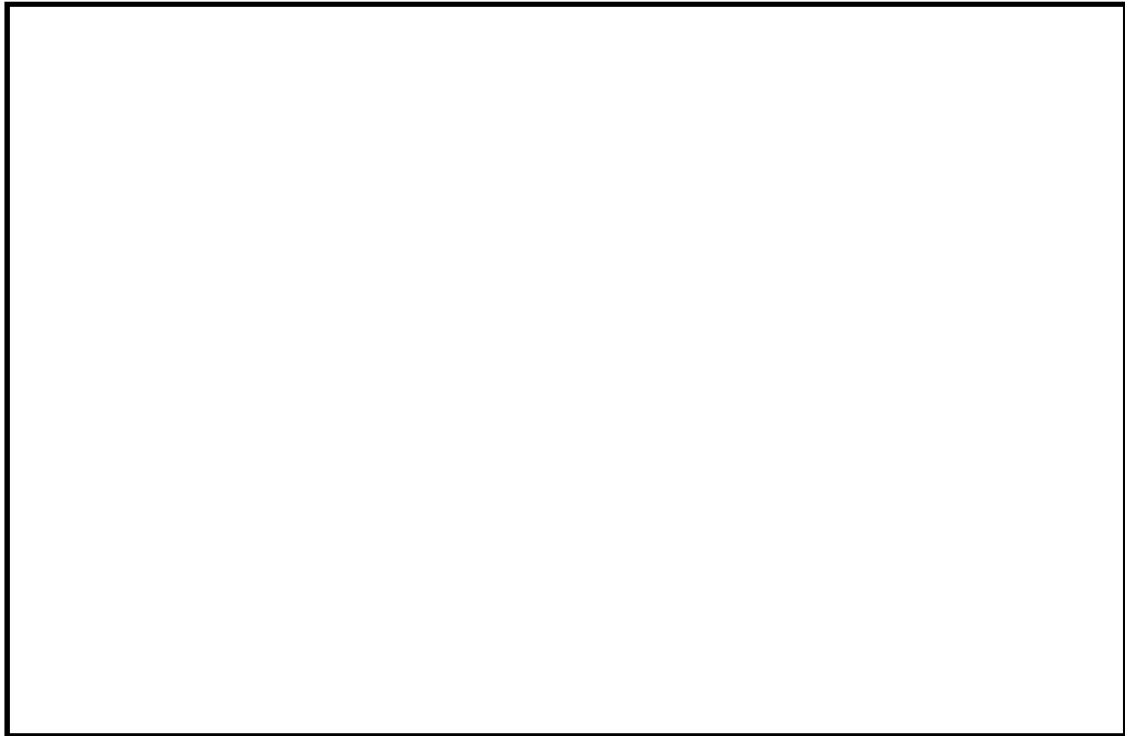


図 3-11 試験および実機の想定される熱水力条件の比較

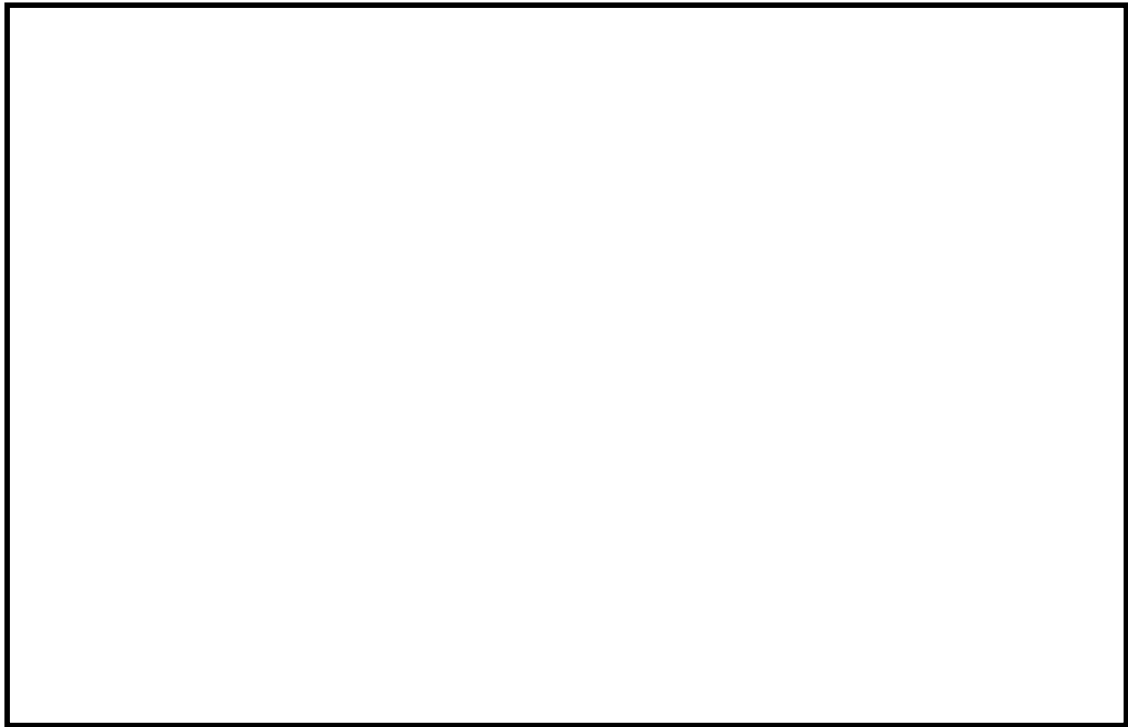


図 3-12 (a) 典型的チャギング

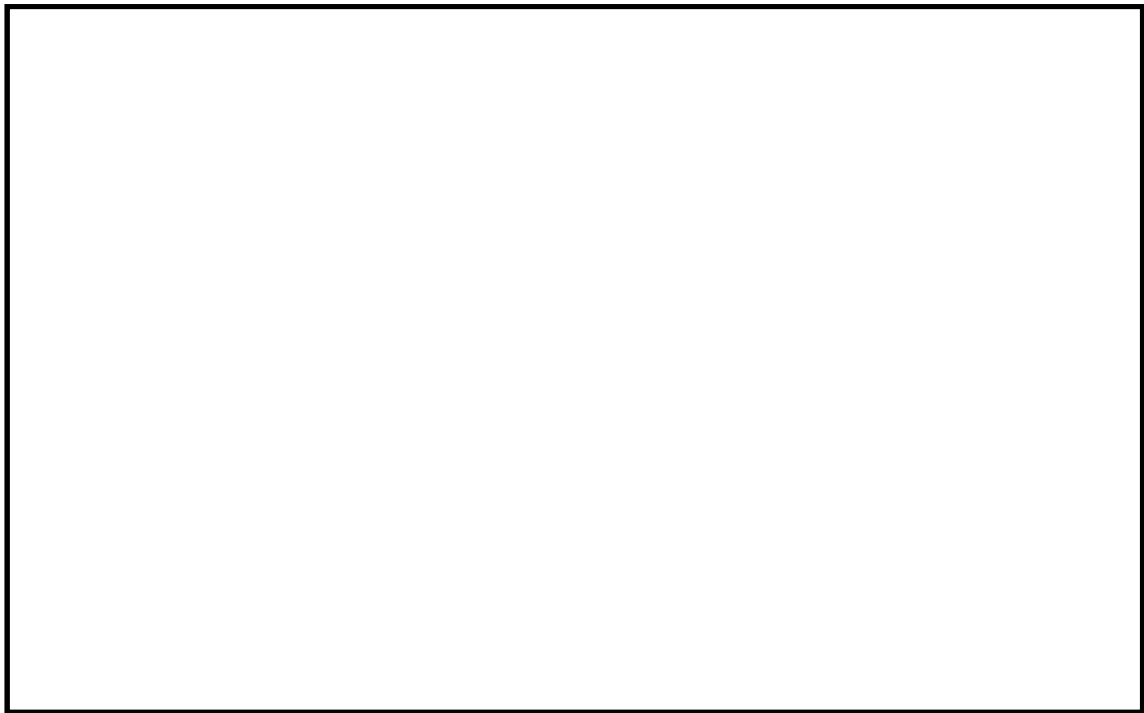
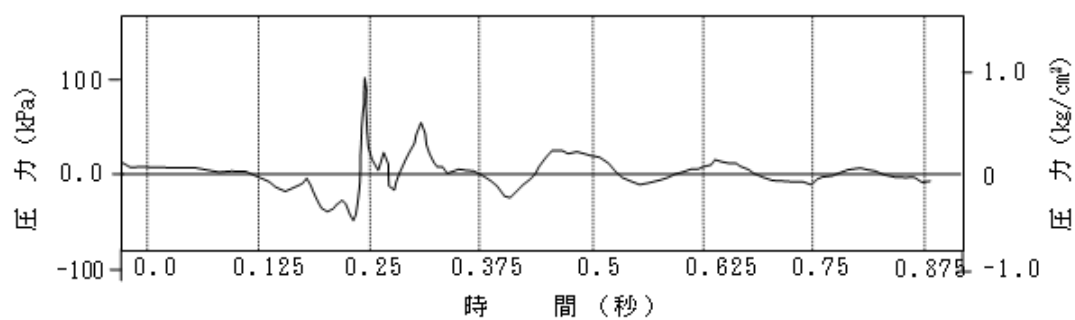
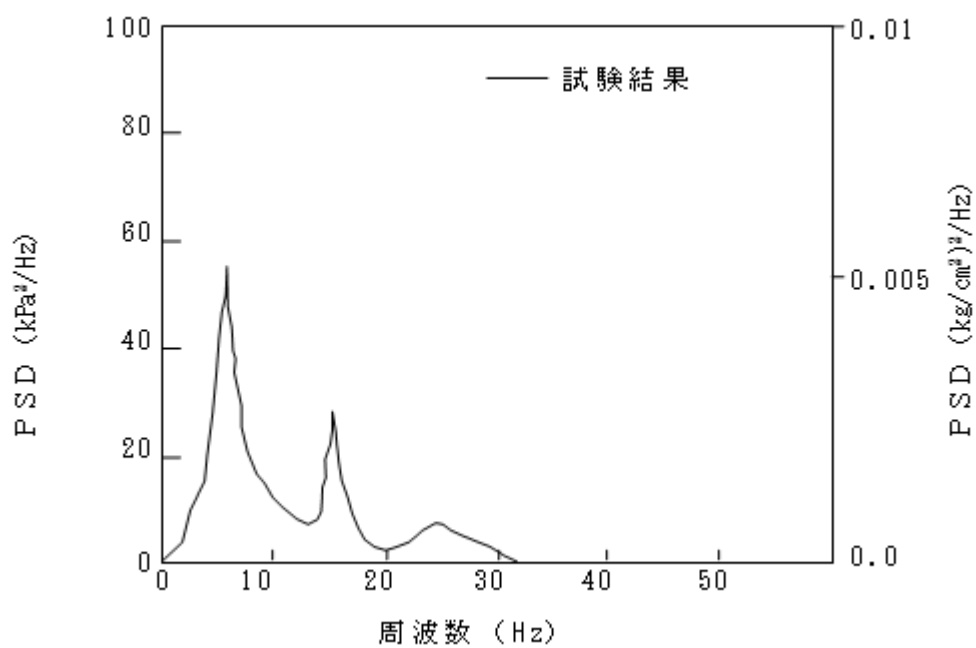


図 3-12 (b) チャギングの PSD



(a) 原研試験におけるチャギング時圧力波形



(b) 原研試験におけるチャギング時の PSD

図 3-13 Mark-II 型格納容器におけるチャギング荷重

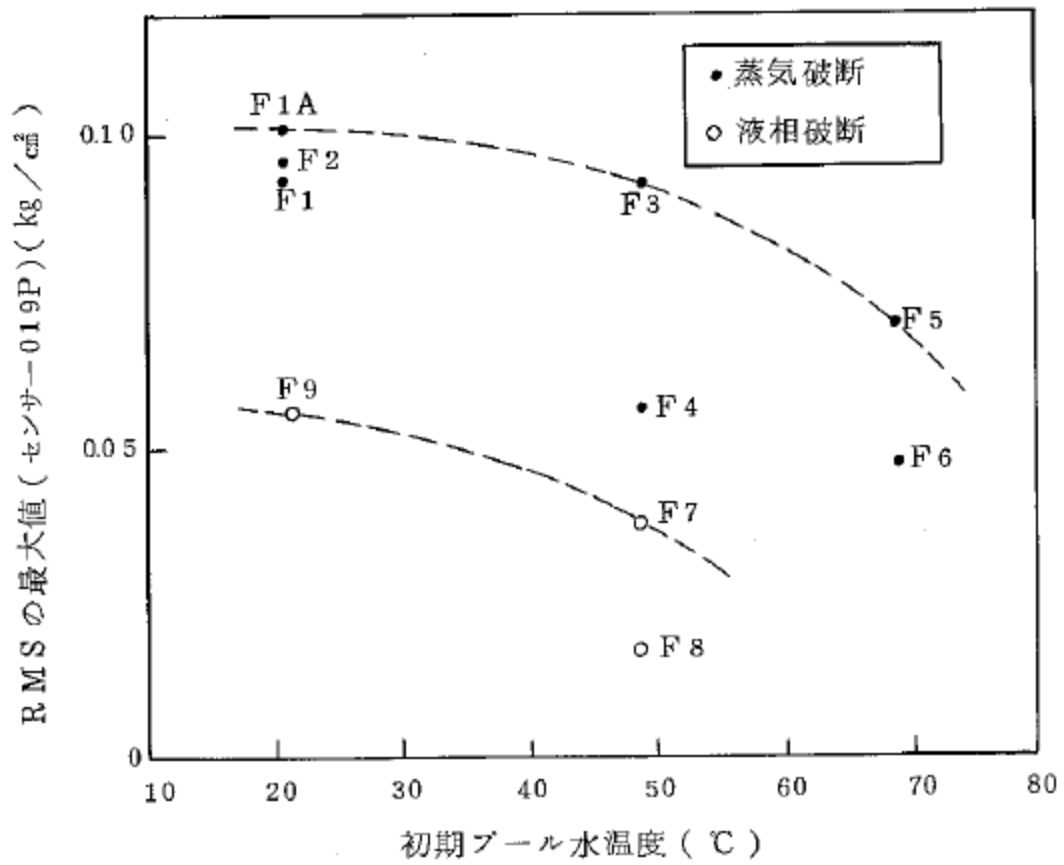
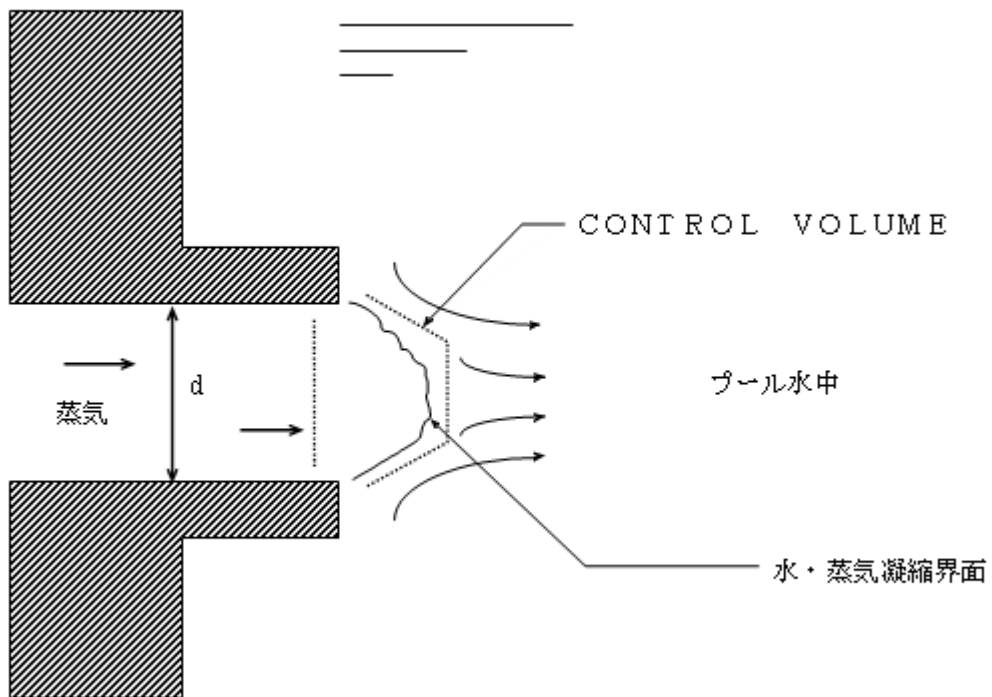


図 3-14 最大チャギングの発生とプール水温度の依存性



水・蒸気凝縮界面を含むCONTROL VOLUMEに対する運動量方程式より、

凝縮振動の周波数 f , 圧力の大きさ P は、

ベント管口径 d , サブクール温度 ΔT に対して

$$f \propto 1 / d$$

$$f \propto \Delta T^{0.75}$$

$$P \propto \Delta T^{-0.25}$$

図 3-15 Mark-III型格納容器で開発されたスケール則

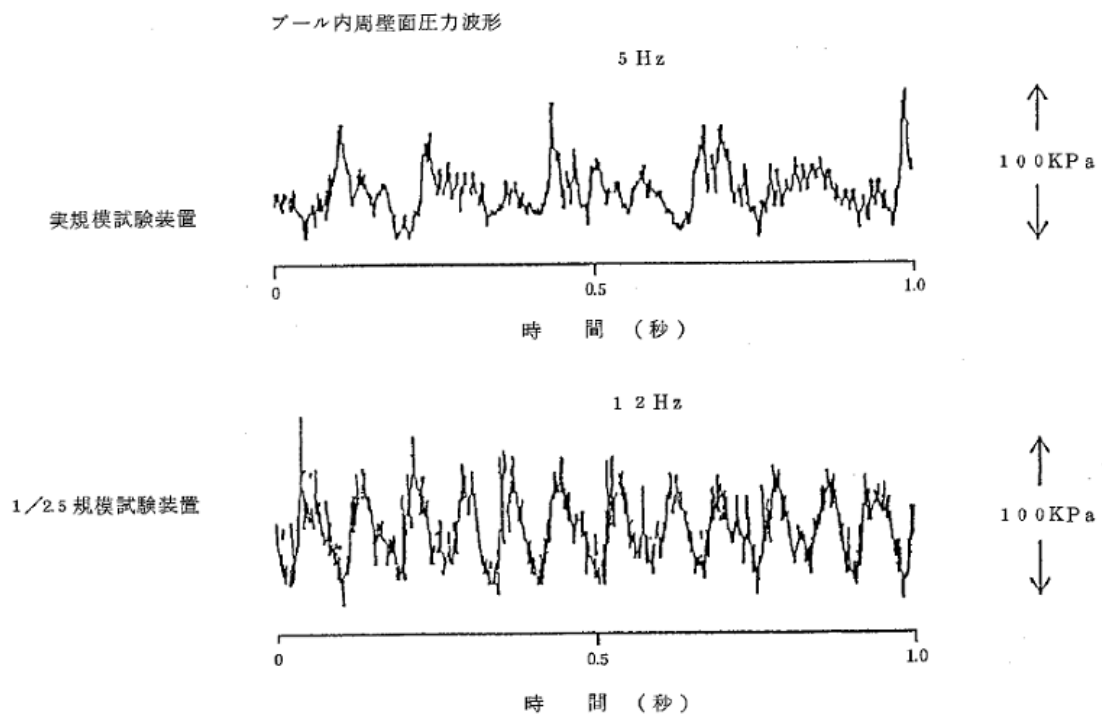


図 3-16 実規模試験装置と 1/2.5 規模試験装置における CO 圧力波形の比較

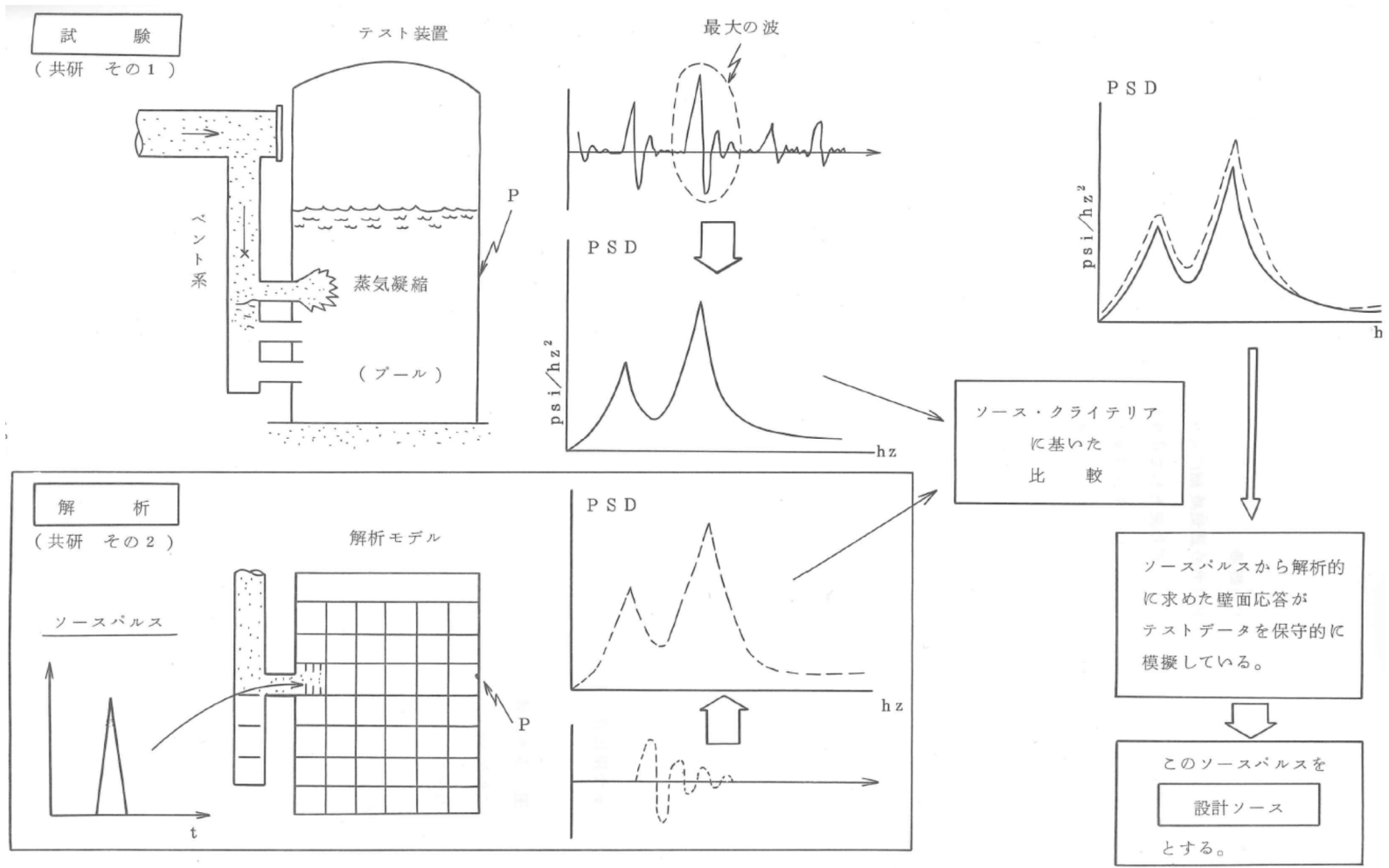


図 3-17 ソース荷重法の概要