

加圧器スプレイ配管内部の流況を可視化した実験と数値流体シミュレーション、 および配管内部の水面の変動により生じる熱応力の評価

The visualization and CFD analysis of the flow in pressurizer spray line piping and calculation of thermal stress fluctuation caused by the swaying of water surface in the pipe

大厩 徹 (Toru Oumaya)*¹ 中村 晶 (Akira Nakamura)*¹ 竹中 信幸 (Nobuyuki Takenaka)*²

要約 PWRプラントの加圧器スプレイ系統の加圧器直上部の水平部の配管においては、定格出力運転中の微少な連続通水のために管内が蒸気と水の2層状態になると考えられている。このような熱成層状態では管の外壁面の温度測定結果からは判別できない内部の水面の周期的な変動が持続することが懸念される。そこでスプレイ配管内部の流動状態を明らかにし、それが熱応力に及ぼす影響を解明するために、実機の微少注入状態を模擬したモックアップ試験を空気-水条件にて実施した。実物大の亚克力製の試験体で流況を可視化した結果、周期的な水面の変動が見られる部位を明らかにし、その周期、変動幅についても概算の数値を把握した。また、この可視化実験を数値流体シミュレーションで再現することを試みた。その結果、可視化実験結果と定性的に一致する水面の形状が得られると共にそれを最もよく再現する濡れ角の大きさを推定することができた。これら2つの結果から、水面の変動の動きを3パターンに分類し、その変動がステップ状に生じることによって実機の定格出力運転条件下で加圧器スプレイ配管に生じる熱応力の変動量を推定した。その結果、可視化実験に基づいて仮定した3パターンの変動ではいずれも設計疲れ線図の疲労限は超えないことが明らかになった。

キーワード 加圧水型原子炉, 加圧器, 加圧器スプレイ配管, 熱疲労, 数値流体シミュレーション, モックアップ試験, 熱応力評価, 熱成層

Abstract In a PWR plant, on top of the pressurizer, there's spray line that cools the reactor coolant. The amount of minimum flow rate is considered to be insufficient to fulfill the pipe completely during commercial operation of the plant, so it is concerned that there is a surface of water in the pipe and it may periodically sway due to condensation of the steam from the pressurizer during commercial operation. In order to identify the flow conditions in the spray line piping and assess its impact on thermal stress, flow visualization experiment were conducted. In the experiment, air is used in substitute of steam to simulate the gas phase of the plant. With a full scale mock-up made of acrylic, flow under room temperature and atmospheric pressure condition was visualized and the locations where periodical swaying of water surface may be observed were identified. The period of swaying and its extent is roughly estimated based on the experiment also. CFD analysis was also conducted to simulate the experiment. Geometrical configuration of the water surface obtained from the CFD analysis matched qualitatively with the experiment and the contact angle that simulates the experiment result well was determined. Based on the visualization experiment and the CFD analysis, 3 patterns of swaying of water surface were assumed and the amplitude of thermal stress fluctuation when the layer swayed instantaneously was calculated. Thus, with the assumed 3 patterns of swaying based on the visualization experiment, it was found that the amplitude of thermal stress would not exceed the fatigue limit defined in design and construction code.

Key Words Pressurized water reactor, pressurizer, pressurizer spray line, thermal fatigue, CFD analysis, mock-up experiment, thermal stress evaluation, thermal stratification

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 神戸大学 工学部

1. はじめに

加圧水型原子炉（PWR）プラントの一次冷却材系統は図1のようになっており、一次冷却水の圧力を制御するため、加圧器が設置されている。この加圧器の直上部には、その中の温度調節のためにスプレイ注水ができるように配管が接続されている。この水は、定格出力運転中には主冷却材管の低温側（コールドレグ）から得ており、加圧器スプレイバイパス弁を経て加圧器内に連続注水される。主冷却材管低温側にあるノズルを起点とし、加圧器に至る系統は加圧器スプレイ系統と呼ばれる。

定格出力運転中には、主冷却材系統の圧力・温度は一定に保たれるため、本来ならば圧力・温度調節のための注水は不要であるが、加圧器スプレイ系統の加圧器直上部の管が空になり、放熱により過度に冷却されると、本系統が作動する際に配管に、過剰な熱衝撃を生じることが懸念された。そのため、約 290℃の水を主弁に比べて小径のバイパス弁を通して連続通水しておくことにより、主弁が開放されたときの温度差を少なくするという運用がなされている。

通常運転中に連続通水される際のスプレイ配管内部の状態を図2に示す。スプレイ水が少ないため配管内部は満水にならず下層部を這うように水が流れていると考えられる。一方、加圧器の気層部からは、約 344℃の飽和蒸気がその流れに対向して上層に流れ込んでいると考えられる。常時このような流況で運転されることから、加圧器スプレイ系統のうち加圧器直上部においては以下の2点が懸念されている。

(1)配管の上層部に蒸気が入り込んでいることから、そこは高温に保たれており、プラントの起動・停止時のように配管が満水となるようなスプレイ流量に変化する際に、急冷されて熱衝撃を受けることがある。この変化を図2の(a)→(b)→(c)に示す。

(2)定格出力運転中に、図2に示す水平部で蒸気が冷却されて凝縮し、新たな蒸気が流入するという変化を繰り返すことにより、水面の周期的な変動が生じることがある。

このうち、(1)については、加圧器サージ配管の熱成層現象と併せて、熱疲労き裂の発生が懸念されており、従来から様々な研究が行なわれている。加圧器サージ管の熱成層現象については、1988年に米国原子力規制委員会（NRC: Nuclear Regulatory Commission）が Bulletin 88-11⁽¹⁾を発行し、プラン

ト設計時の想定とは異なる配管変位が生じた事例を示して注意喚起した。またそれ以前のNRCによる他の Bulletin⁽²⁾⁽³⁾で指摘されたような熱疲労き裂発生の懸念も生じたことから内部の流動についての研究^{(4)~(7)}が実施され、それらを考慮した応力解析なども行なわれた⁽⁸⁾。また、実機の運転時の配管外面の温度変動を連続測定⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾し、そこから有意な温度分布が生じるたびに疲労累積損傷係数を増やして余寿命を診断する疲労モニタリングに関する研究⁽¹²⁾⁽¹³⁾も試みられている。これらの研究は、プラントの起動・停止時のように比較的溫度変動が大きく、そのため必然的に熱応力変動も大きいものの、発生回数は少ない過渡を対象としており、低サイクル疲労き裂の発生を防止する観点から行なわれたものである。

一方、美浜2号機における閉塞分岐配管曲がり部からの漏洩事例⁽¹⁴⁾のように、プラントの定格出力運転中に温度ゆらぎが常に生じ、その熱応力変動により貫通き裂が発生し漏洩に至ることがあることが明らかになった。この場合、温度変動幅は比較的小さいものの、プラントの運転時間の8割以上を占める定格出力運転中に常時変動し続けることから、著しい繰り返し数となり、高サイクル疲労き裂が発生する。前に示した(2)の現象に対しても、同種の懸念が抽出された。この懸念については、実機の管外壁面の温度履歴の測定結果から、温度差が定格出力運転中に常時存在して管内部が満水でない部位があることが確認されており、水面の変動が生じている可能性があることを示唆している。

このような要因による高サイクル熱疲労き裂を防止するためには、まず熱応力変動の発生が疑われる部位の内部流動を明らかにする必要がある。このような観点からは、既存の研究で多く採用されている実機の配管外壁面の温度測定からおおまかな水面の変動を推定するという手法では十分ではない。たとえ配管の内部で温度変動が生じていたとしても、それが著しいものでなければ配管外壁へ熱伝導する際に変動が鈍化して外壁面からは変動が観測できない可能性があるためである。そこで本研究では、加圧器スプレイ配管内部の流動を明らかにし、それにより生じる熱応力の変動を詳細解析により推定することを目的とした。従来の加圧器サージ管を対象とした研究が前に示した(1)の現象に着目しているのに対して、本研究では特に(2)の現象に着目し、定格出力運転中における周期的な水面の変動の詳細を明

らかにする。

そのため、まず非凝縮性ガスである大気に開放された条件のもとで、気液2層状態となっている部分の水面の形状および変動を把握するため、透明アクリル材の試験体で可視化実験を行なう。それからその次に、凝縮を伴う際の水面の変動を把握するため100℃程度の飽和蒸気と70℃程度の水を用いて実機と同材料のステンレス鋼製の試験体で温度計測実験を行なう予定である。

また、これらの実験と平行して流動解析により水面の形状および挙動を再現することを試みる。今回対象とする水面の挙動は2相流現象であり、非線形性が強い。このため、実験室で行なえる実験条件の限界である大気圧、100℃前後の蒸気-水条件の実験結果から、PWRプラントの運転条件である15.4MPa、290℃における流動状態を単に温度差で線形外挿して推定すると誤った予測となる可能性がある。そのため実験結果を再現し、かつ実機条件における流動状態を推定するためには、流動解析技術の確立が必要となる。今回対象とするような水面の変動を流動解析により再現するためには、大きく3つの技術課題を解決する必要がある。それは、配管の壁面と接触する水面の縁の形状を決定する濡れ角の特定、蒸気-配管壁間と蒸気-水面間の適切な凝縮モデルの決定および流体(蒸気および水)-配管壁間と蒸気-水面間の熱伝達率の特定である。

最後にこの水面の変動によって配管壁にどの程度の熱応力の変動が生じるかを推定するために3次元詳細モデルを用いた構造解析を実施する。

本報告では、まずアクリル製の実物大の試験体を用いて行なった大気圧常温下での空気-水条件の可視化実験の結果を示す。この実験は、加圧器スプレイ系統の加圧器直上部分のうち、どの位置に水面がありどこで変動が生じているかを抽出するために行なった。

さらに水面の形状および挙動を再現するために必要な流動解析技術のうち、上の可視化実験結果を基準にして濡れ角の特定を行なった結果を示す。濡れ角は、液体の粘性と接する固体の表面粗さに影響を受けるパラメータで物性値のように汎用的に利用できる数値が与えられていないため、実験体系ごとに決定する必要がある。また濡れ角は、水面と配管内壁面の境界の形状を定めるパラメータであり、濡れ角の値によって水面の形状が変化するため今回対象とするような水面の変動による配管への影響という

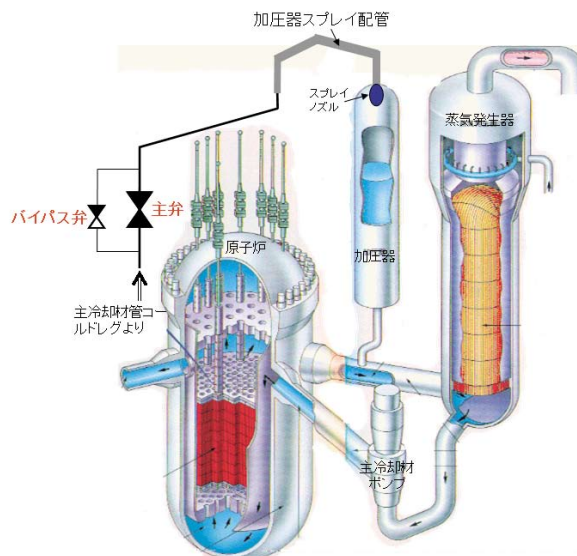


図1 PWRプラントにおける1次冷却材系統および加圧器スプレイ系統の概要

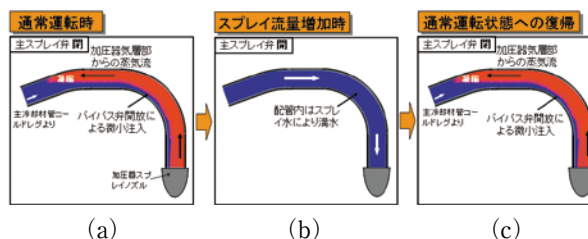


図2 加圧器スプレイ配管内の流動状態の模式図

観点からは特に重要なパラメータである。本報告では、大気圧常温の空気-水条件でアクリル材の試験体を用いた実験に対して濡れ角を決定した結果を示す。

最後に可視化実験結果から抽出された水面の変動によってどの程度の熱応力の変動が生じるかを試算した。その際には水面が変動した部位および変動幅は、可視化実験結果に基づき決定し、水面の詳細な形状および水面の変動の具体的な仕様は流動解析結果から求めた。また、流体(蒸気および水)と配管壁間の熱伝達率は、流動解析結果に基づき決定した。一方、温度及び圧力条件はPWRの定格出力運転条件に基づいて決定した。

2. 空気-水条件における可視化実験

2.1 実験装置と条件

空気-水条件下で、管内が2層状態となった場合の、内部の流動状態を可視化するための実験ループ

を神戸大学に設置した。本可視化実験で使用した実験ループの概要を図3に示す。また図4に試験部の概要を示す。同図には、試験部の各部の名称も併せて表記した。試験部は、実機での加圧器スプレイ系統のうち、加圧器直上部の配管を1/1スケールで模倣し、可視化できるよう透明アクリル材で製作した。また試験部先端にあるスプレイ部には、実機で使用されているスプレイノズルと同等の形状のものを取り付けて、実機の流路の形状を再現した。

試験部の液層部は大気解放された常温の水道水、気層部は室温の空気とし、実験ループに設置された流量計により配管断面平均の流量を測定した。ポンプを一定の回転数として、ポンプ出口の弁開度を調節して所定の流量に設定した。流量を設定した後は15分間これを保持して、水面の変動を調べた。

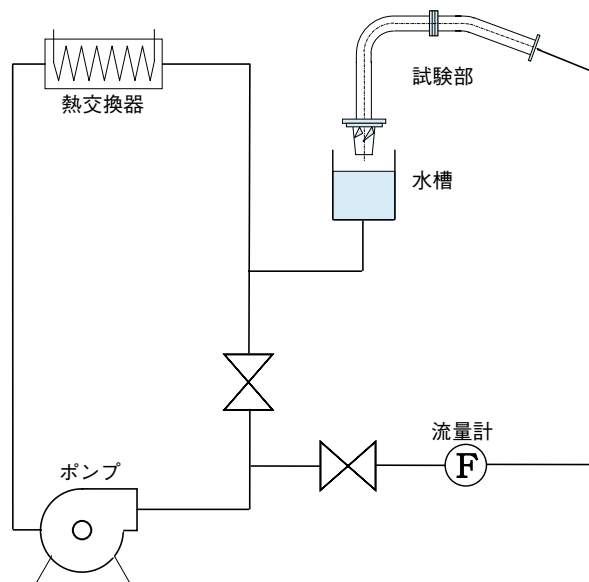


図3 実験ループの概要

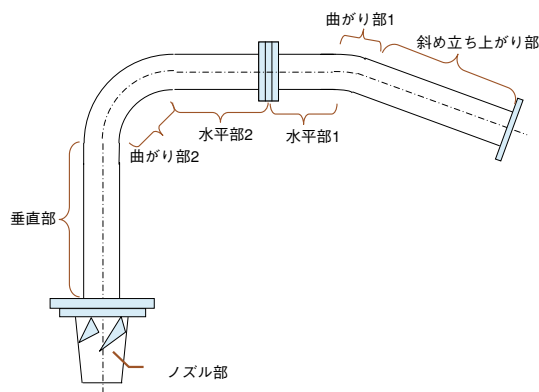


図4 試験部の概要

表1 試験条件

実験番号	スプレイ流量 [m ³ /min]	実機のバイパススプレイ流量との関係	測定項目
(1)	0.004	0.5倍	ビデオ撮影による水面の変動幅及び変動周期の把握
(2)	0.008	等倍	
(3)	0.016	2倍	
(4)	0.04	5倍	
(5)	0.08	10倍	
(6)	0.16	20倍	
(7)	0.24	30倍	
(8)	0.32	40倍	
(9)	0.4	50倍	

さらに、試験部を2分間連続してビデオ撮影することにより水面の位置とその変動を記録し、その画素数の変化から水面の変動幅と周期を算出した。ただし水面の微小な変動については考慮せず、熱応力の変動に影響を及ぼす顕著な変動のみに着目した。また、流量を段階的に増加させた場合と減少させた場合の両方を実施して、両者の差の有無も調べた。

表1に今回の実験条件を示す。本実験では管内部が満水とならない範囲の流量を中心に条件を設定したが、管内が完全に満水となる流量を把握するためにバイパススプレイ流量の50倍までスプレイ流量を増やして実験を行なった。

2.2 各流量における実験結果

(a) バイパススプレイ流量の0.5～5倍のケース

スプレイ流量をバイパス流量の0.5～5倍に設定した場合における可視化実験の結果をまとめて図5に示す。これらの実験条件では、曲がり部1と水平部では水面の変動が生じなかったため、曲がり部2と垂直部の流況のみ示した。また、同図中には水面の変動が見られた位置を赤丸で囲って表示した。いずれのスプレイ流量でも、水面の変動は曲がり部2から垂直部に至る境界付近で生じた。ただスプレイ流量が等倍のケースのみ垂直部全体で流れが左右に蛇行し、垂直部の広い範囲で水面の変動が見られた。また、スプレイ流量が0.5倍と2倍のケースでは垂直部で流れが2つに分岐し、一部が反対側の内壁面にまで到達してそこを下に伝って流れるという現象が見られた。5倍のケースでは、流れは分岐するものの反対側までは到達せず管中央部を落下した。一方、流量を増やして目的とするスプレイ流量に設定

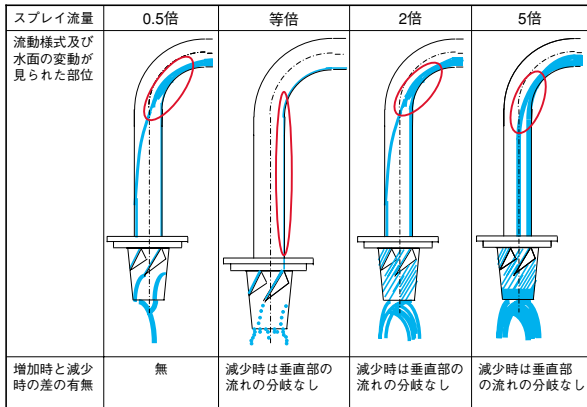


図5 流動状態図 (スプレィ流量 : 0.5 ~ 5倍)

した場合と減らして設定した場合では、等倍以上の流量で流況に変化が生じた。その差は垂直部で特に顕著で、増加させた場合は、曲がり部2から垂直部に至る位置で流れが2つに分岐するのに対して、減少させた場合はそのような分岐はせずに全て管の内側を伝って流れ落ちた。

(b) バイパススプレィ流量の10倍と20倍のケース

スプレィ流量をバイパス流量の10倍と20倍に設定したときの可視化実験の結果をまとめて図6に示す。これらの流量では、水が垂直部の全周を伝って流れ落ちるために管内壁は全て水で覆われて、管中

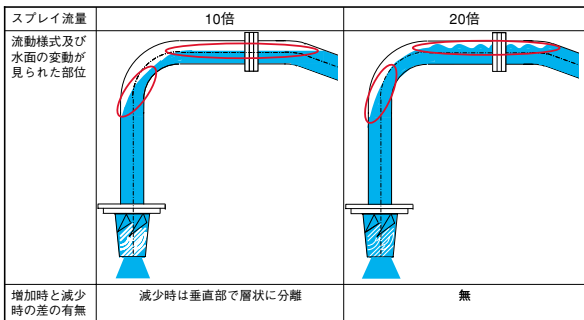


図6 流動状態図 (スプレィ流量 : 10倍と20倍)

中央のみ空気層が存在した。ただし、10倍のケースで流量を減少させていった場合は、垂直部で層状に空気と水が分離して、水は管の全周を覆うことなく流れ落ちた。また、特に20倍のケースにおいて水平部の全域で水面の波立ちが観測された。

(c) バイパススプレィ流量の30倍のケース

図7に、スプレィ流量をバイパス流量の30倍に設定したときの可視化実験の結果を、流量を増加させていった場合と減少させた場合についてそれぞれ示

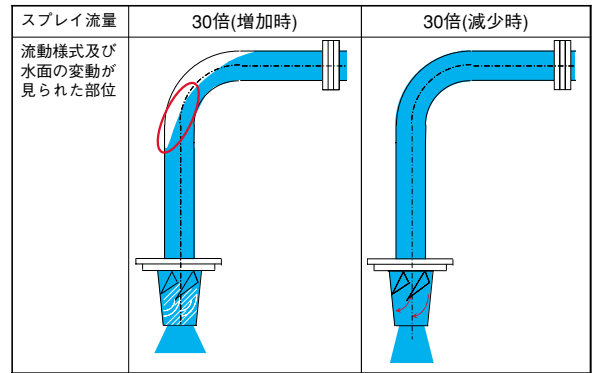


図7 流動状態図 (スプレィ流量 : 30倍)

す。これらの実験条件では、曲がり部1では完全に満水であったため、水平部2から垂直部にかけての流況のみを図示した。流量を減少させた場合については試験部全域で満水であった。一方流量を増加させた場合については、曲がり部2の一部分に水面が生じており、その先端部において上下の変動が見られた。

(d) バイパススプレィ流量の40倍と50倍のケース

管内はいずれの部位でも満水の状態で水面は生じなかった。スプレィノズル内部の旋回羽根により試験部出口で旋回状の流れが生じ、釣鐘状になって放出されたがその広がり是非満水時の20倍と30倍のケースよりも小さかった。

(e) 全体のまとめ

以上、各流量における流動状態を整理して述べた。バイパススプレィ流量における可視化実験で見られ

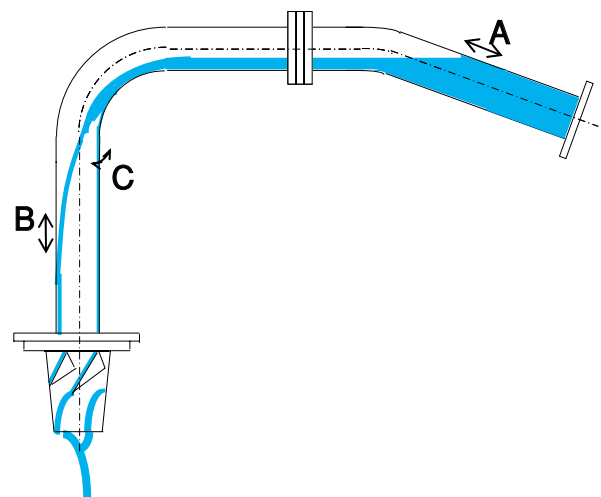


図8 各水面変動パターンとその発生位置)

た水面の変動を抽出して A, B, C の 3 パターンに分類した結果を図 8 に示す。変動パターン A は、曲がり部 1 の端部における軸方向の水面の揺れ、変動パターン B は、垂直部において分岐した流れが上下にふれて反対側の配管壁に接する位置が変化する現象、そして変動パターン C は、垂直部を伝う流れが左右に蛇行する流れである。この 3 種類のパターンの変動によって生じる熱応力の変動を推定し、その結果を第 4 章で述べる。一方、水面の周期的な変動が最も著しかったのは、バイパススプレイ流量の 20 倍と 30 倍の場合の水平部においてであった。

2.3 各流量における水面の変動幅と周期

各流量における水面位置の概算値を、流量を増加させた場合と減少させた場合について、それぞれ表 2 と表 3 に示す。また、各流量における変動幅と周期の算出結果を、流量を増加させた場合と減少させた場合について、それぞれ表 4 と表 5 に示す。なお流量が 30 倍以上のケースについてはいずれの場合も全ての部位で満水であったため、表示していない。これらの概算値は第 2.1 節でも述べたように流況を撮影したビデオ映像を目視にて確認しながら、水面の変動の山と谷を探索してその時点間の変化から周

期を、またそのときの画素数の変化から振幅を求めた。水面の位置および水面の変動の振幅は、被写体とビデオ映像との縮尺比を乗じて算出した。表 2 ～ 5 に記載した数値は、全て目視で変動の山と谷を判

表 2 水面の高さ (流量を増加させた場合) 単位[mm] (管内底基準)

実験番号	スプレイ流量 [m ³ /min]	倍率	水面高さ [mm]			
			水平部 1	水平部 2	曲がり部 2	垂直部
(1)	0.004	0.5 倍	10.7	9.7	19.2	13.7
(2)	0.008	等倍	10.7	11.1	16.6	/
(3)	0.016	2 倍	29.8	18.2	24.4	/
(4)	0.04	5 倍	29.8	15.9	24.4	37.3
(5)	0.08	10 倍	71.4	28.7	15.9	15.5
(6)	0.16	20 倍	71.4	44.5	23.8	/

表 3 水面の高さ (流量を減少させた場合) 単位[mm] (管内底基準)

実験番号	スプレイ流量 [m ³ /min]	倍率	水面高さ [mm]			
			水平部 1	水平部 2	曲がり部 2	垂直部
(1)	0.004	0.5 倍	30.1	25.8	21.8	21.0
(2)	0.008	等倍	30.1	29.4	19.8	21.0
(3)	0.016	2 倍	31.9	20.4	30.4	17.8
(4)	0.04	5 倍	31.9	21.7	28.5	15.5
(5)	0.08	10 倍	72.9	45.4	29.7	/
(6)	0.16	20 倍	72.9	43.7	28.5	/

表 4 水面の変動幅と周期 (流量を増加させた場合)

実験番号	スプレイ流量 [m ³ /min]	倍率	曲がり部 1		水平部 1		水平部 2		曲がり部 2		垂直部	
			変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]
(1)	0.004	0.5 倍	/	/	/	/	/	/	3.3	47.0	/	/
(2)	0.008	等倍	/	/	/	/	/	/	4.9	13.2	/	/
(3)	0.016	2 倍	/	/	/	/	/	/	9.9	46.9	/	/
(4)	0.04	5 倍	/	/	/	/	/	/	1.6	0.2	1.6	0.2
(5)	0.08	10 倍	5.1	37.9	4.3	9.1	/	/	4.9	0.1	1.6	0.1
(6)	0.16	20 倍	6.0	26.6	6.9	32.2	3.3	0.2	16.4	35.7	77.2	35.7

表 5 水面の変動幅と周期 (流量を減少させた場合)

実験番号	スプレイ流量 [m ³ /min]	倍率	曲がり部 1		水平部 1		水平部 2		曲がり部 2		垂直部	
			変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]	変動幅 [mm]	周期 [s]
(1)	0.004	0.5 倍	/	/	/	/	/	/	1.6	0.3	/	/
(2)	0.008	等倍	/	/	/	/	/	/	3.3	0.3	4.926	0.27
(3)	0.016	2 倍	/	/	/	/	/	/	1.6	0.2	3.284	0.2
(4)	0.04	5 倍	/	/	/	/	/	/	6.6	0.2	3.3	0.2
(5)	0.08	10 倍	10.3	1.7	4.3	0.3	3.284	0.47	4.9	1.9	50.9	1.9
(6)	0.16	20 倍	13.7	1.2	3.4	0.9	1.6	0.3	6.6	1.9	87.0	1.9

断して、その結果に基づいて算出したものであるため、スプレイ流量がバイパススプレイ流量の5倍以下のケースでは、変動の振幅が小さく読み取り誤差が大きい可能性が高い。

水面の変動は、いずれの流量でも図4に示した曲がり部1と2および垂直部で生じており、水平部ではバイパススプレイ流量の20倍のケースのみ水面の変動が生じていた。

水面位置については、バイパススプレイ流量の0.5倍と等倍において、流量を増加させた場合と減少させた場合で位置が大きく異なる結果となった。このことは、微少注入状態では、流量が増加したかあるいは減少したかの履歴にも影響を受けることを示唆している。

変動周期・幅については、流量の大きさとの相関関係は特に見られなかったが、流量がバイパススプレイ流量の10倍と20倍のときに、全ての部位において、5～10mm程度の振幅で、周期が5秒未満の比較的短周期の変動が見られた。一方、バイパススプレイ流量では曲がり部2で5mm以下の振幅の変動が0.3～15秒の周期で生じていた。また、そのときの水面の位置は管内の底から11～30mmであった。

以上、水面の変動幅と周期について目視に基づき概算値を算出したが、より正確な測定のためには超音波による水位変化の連続測定など機械的な手法の導入を図る必要がある。

3. 空気 - 水条件を再現した流動解析

3.1 解析モデル及び流動解析条件

第2章で実施した大気圧下での空気 - 水条件の可視化実験結果について、汎用の流動解析コードCFX-10⁽¹⁵⁾を用いて流動解析を実施した。ここでは試験部に用いたアクリル材の濡れ角 θ を60°、90°、120°及び150°の4通りに変化させて図9に示すように設定し、可視化実験結果と最も一致する濡れ角条件を推定した。解析モデルは以下の事項を考慮して作成した。

(1)配管内の流体は、空気 - 水の2相流状態とし、VOF法 (Volume of Fluid)⁽¹⁶⁾をもとにしたモデル化を行なった。VOF法とは、各計算格子を液体充填率F (0から1の間の値をとる) 及び周囲の格子の状況により、気体、共存、液体、境界格子の4種類にそれぞれ分類して、各格子の流体の体

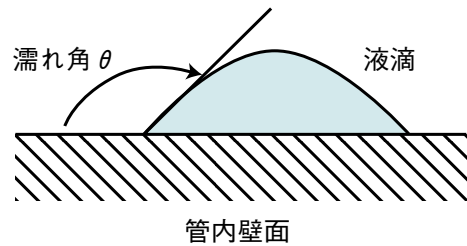


図9 濡れ角の設定方法

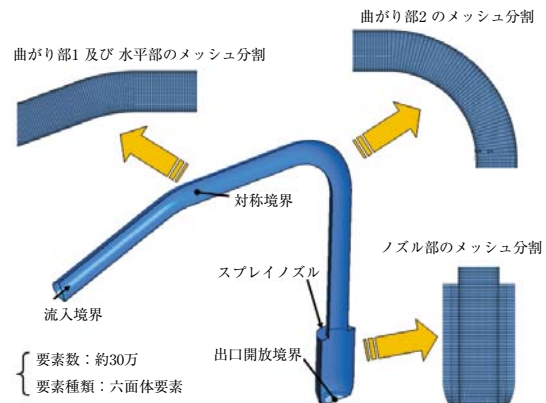


図10 解析領域の形状 (対称面側から見た図)

表6 空気 - 水条件の解析における物性値

物性値	空気	水
密度 [kg/m ³]	1.203	998.92
粘性係数 [Pa·s]	1.793×10^{-5}	1.203×10^{-3}
表面張力 [N/m]	0.07	

表7 空気 - 水条件の解析における境界条件

物性値		空気	水
流入境界	流速[m/s]	0.021	0.021
	体積割合	0	1
出口境界 (開放境界)	圧力	大気圧	
	体積割合	1	0

積率を運動方程式等で計算された流速場に従って移流させて解析する方法である。

- (2)加圧器スプレイ配管の斜め立ち上がり部からスプレイノズル出口までを、配管長手方向の垂直断面を対称面として片側半分について3次元モデルを作成した。
- (3)スプレイノズルについては、絞り効果のみを考慮することとして旋回羽根はないものとしてモデル

化した。

(4) 周期的な変動を得るには非定常解析が必要となるが、今回は全体的な流動状態を再現するパラメータを決定することが目的のため、定常解析を行った。

(5) 解析で再現した流況はバイパススプレイ流量時の挙動のみとした

(6) 乱流モデルは、SST モデル (Shear Stress Transport $k-\omega$ model) ⁽¹⁵⁾ を用いた。SST モデルとは、壁面近傍では $k-\omega$ モデルが使用され、バルク流では $k-\epsilon$ モデルが使用される乱流モデルの一つである。

図 10 にモデル化した範囲の形状を示す。また、表 6 に本解析で使用した物性値をまとめて示す。物性値は、伝熱工学資料⁽¹⁷⁾から得た。さらに、表 7 に本解析の境界条件をまとめて示す。

3.2 流動解析結果

配管内の水面の形状を濡れ角条件毎に示し、それ

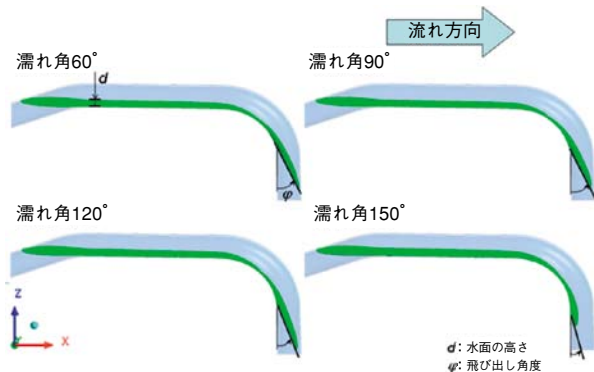


図 11 自由界面の形状 (側面図)

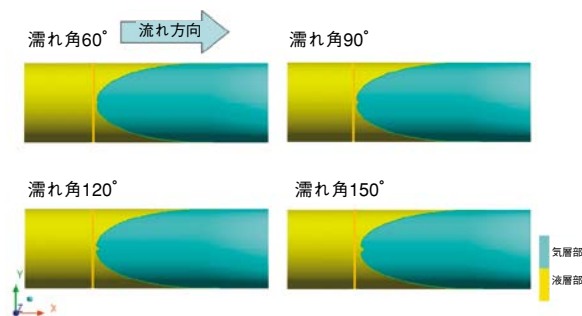


図 12 界面の形状 (上面図)

を側面および上面から見たものをそれぞれ図 11 と図 12 に示す。いずれの図においても 3000 回目の計算ステップの時点で定常状態に達したと判断して表示した。水面は、自由界面であり、同一要素内に空気と水が半分ずつ含まれる要素の集合であると定義して、それを表示した。図 11 からわかるように、自由界面の形状は、いずれの濡れ角条件においても曲がり部 1 と水平部ではほとんど変化がなかった。また、図 12 に示すように、その同じ位置を上面から見た場合でも形状にほとんど変化が見られなかった。一方、曲がり部 2 と垂直部では、管腹側を伝った流れが分離して一部が管中央部に飛び出しているが、この飛び出し角度 φ (図 11 参照) が濡れ角条件により異なった。濡れ角が小さいほど φ は大きく、例えば濡れ角が 60° のケースでは反対側の壁面にまで到達した。一方、濡れ角が大きい場合には、 φ は小さく、例えば濡れ角が 150° のケースでは管腹側からわずかに浮いた程度であった。図 11 とバイパススプレイ流量における可視化実験結果を示した写真である図 13

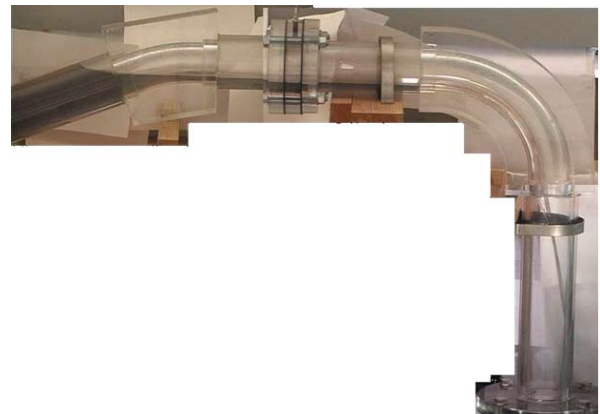


図 13 可視化実験結果 (バイパススプレイ流量の場合)

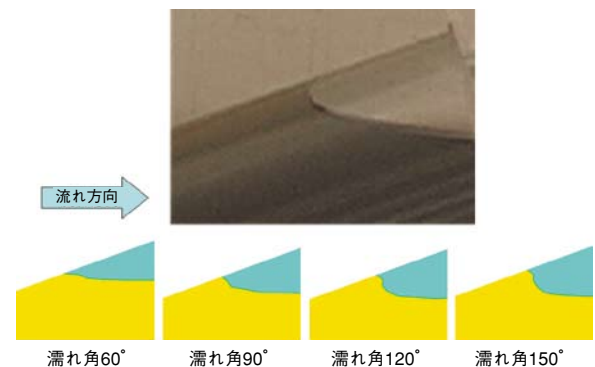


図 14 曲がり部 1 の端面における濡れ角条件を変えた解析結果と可視化実験結果 (バイパススプレイ流量) の比較

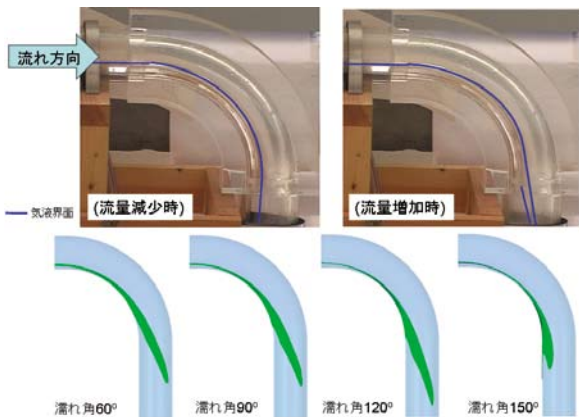


図 15 曲がり部 2 および垂直部における濡れ角条件を変えた解析結果と可視化実験結果（バイパスブレイ流量）の比較

を比較すると、自由界面の全体的な形状については空気-水条件の可視化実験結果と定性的に似ている。曲がり部 1 と水平部の境界線での水面の高さ d (図 11 参照) も管内面底から、実験では約 11mm、解析結果では約 14mm となり、定量的にも近い形状であると言える。

また、曲がり部 1 と 2 および垂直部において可視化実験結果と流動解析結果を比較して示す。まず図 14 は曲がり部 1 における比較、図 15 は曲がり部 2 および垂直部における比較である。曲がり部 1 については濡れ角 120° と 150° のケースが実験結果の写真に比較的近い形状を示している。曲がり部 2 から垂直部にかけては、流量を少ないほうから次第に上げていった場合は濡れ角 120° の結果に近く、多いほうから下げていった場合は小川状の流れとなり 150° の結果に近い。両者から判断すると、アクリル管における大気圧下での室温の水と空気との 2 層状態の流動解析において、可視化実験結果を最もよく再現する濡れ角条件は 120° から 150° の間にあると推定される。また実機の配管は、ステンレス鋼製の汎用製品であり内壁面に特別の研磨加工などを施していないため、アクリル材よりも表面が粗いため濡れ性がよく、濡れ角はアクリル材よりも大きくなると考えられる。

以上、流動解析から空気-水条件の可視化実験結果の水面の形状を再現した。今後はステンレス鋼における濡れ角を特定し、蒸気の凝縮と熱伝達率を考慮した流動解析を行なう必要がある。

4. 水面の変動によって生じる熱応力の変動

4.1 解析モデルおよび熱応力解析条件

第 2 章及び 3 章で述べた空気-水条件の可視化実験結果及びその流動解析結果から、変動部位、水面の位置およびその幅を仮定して、PWR プラントの定格出力運転条件における水面の変動による熱応力の変動量を解析により推定した。なお、この解析では汎用の構造解析用コード ABAQUS⁽¹⁸⁾を用いた。

(1) 熱伝導解析条件

図 8 に示した 3 種類の水面の変動を対象に解析を行なった。仮定したそれらの変動の具体的な仕様を表 8 に示す。今回の解析にあたっては、水面の変動により生じる最大の熱応力の変動が得られるよう、水面がステップ状に変動する直前と変動した後で十分な時間が経過して管全体の温度分布が定常状態となった時点との差から、熱応力の変動量を求めた。

それぞれの水面の変動パターン毎に実際の解析に使用した解析モデルを図 16 ~ 18 に示す。なお、これらの図では管内面の流体に接する第 1 層の要素のみを表示して水面の位置が分かりやすいようにしてある。

また管内壁面に付与した熱伝達率は、流動解析結果から得られた概算値を適用した。流動解析は、第 3 章に示した結果以外に PWR プラントの定格出力運転条件における蒸気-水条件での定常解析も実施しており、その結果を用いて図 19 に示す領域毎に液層部と気相部それぞれについて平均熱伝達率を推定した。

その具体的な推定方法を述べる。まず、管壁面での熱流束分布を求めてから、内壁面温度 T_{wall} と流体の平均温度 T_{bulk} の差より次式を用いて熱伝達率 h を算出した。

$$q_{wall} = h(T_{wall} - T_{bulk})$$

表 8 水面変動パターンの詳細 (図 8 参照)

パターン	水面の変動形態	変動の詳細
A	水平部水面端部の変動	管軸方向に水面が 4mm 上昇
B	垂直部上下の変動	鉛直方向に接液部が 50mm 上昇
C	垂直部左右の変動	水流の幅が周方向左右にそれぞれ 10mm 広がる

このとき流体の平均温度として、蒸気と接する界面の場合は圧力 15.4MPa における飽和温度である

$$T_{bulk} = 344 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

を用い、水と接する界面の場合は主冷却材管のコールドレグ側の温度でスプレイ水の注入温度である

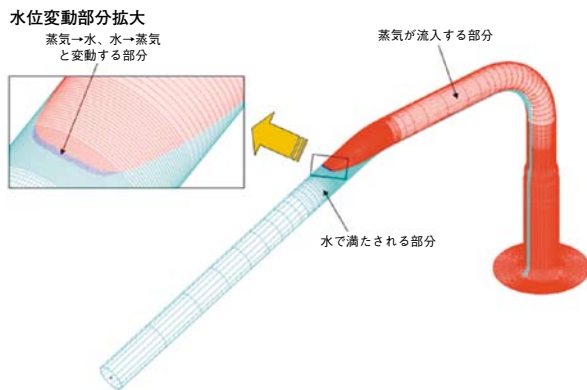


図 16 変動パターン A の解析モデル

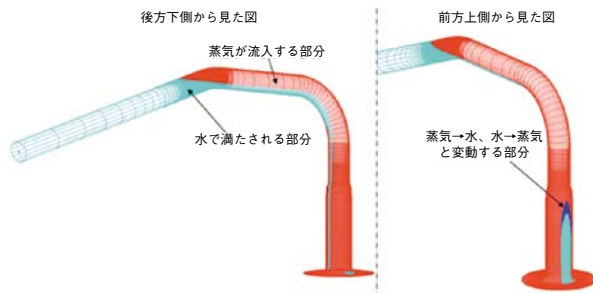


図 17 変動パターン B の解析モデル

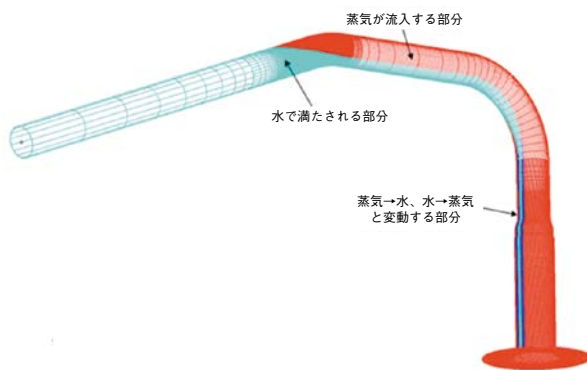
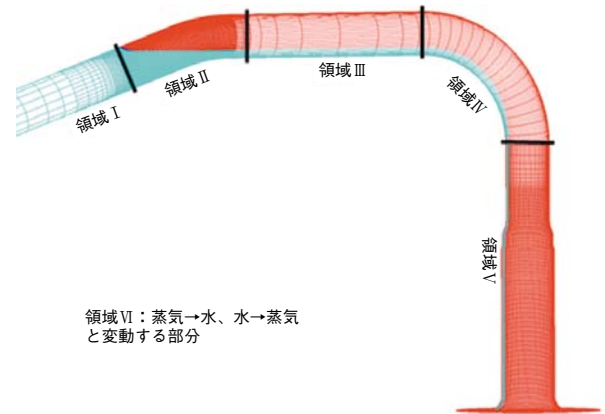


図 18 変動パターン C の解析モデル



領域 VI：蒸気→水、水→蒸気と変動する部分

図 19 熱伝達率算出に用いた領域区分

表 9 付与した熱伝達率[W/(mm²·K)]

領域名	液層部分	気層部分
I	0.00055	0.002
II	0.00075	
III	0.0024	
IV	0.003	
V	0.0033	
VI	0.003[変動パターン A]* 0.018[変動パターン B,C]**	
外壁面	0.0000045	

*：領域 I 基準
**：領域 V 基準

$$T_{bulk} = 290 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

を用いて、熱伝達率 h を算出した。

なお、図 19 に示した領域 VI については、蒸気→水、水→蒸気と急変する部位のため本来ならば非定常熱伝達率を適用すべきであることを考慮して「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」(19)に示された増倍係数の最大値である 6 を急変する部分の近傍の領域の熱伝達率の値に乘じることとした。

また、管外壁面については、実機では保温施工されていることを考慮して、保温材の厚み及びその熱伝導率を用いて補正した等価熱伝達率を付与した。

(2) 熱応力解析条件

熱応力解析にあたっては、加圧器直上部分にスプレイ系統全体の管と弁の自重や熱膨張が外力として作用する影響を考慮するために、系統全体をはりモデルで再現し、直上部分をソリッドモデルにて再現したはり+ソリッド連成モデルを用いた。また、境界条件として一方を主冷却材管低温側管台、もう一方を加圧器上部鏡中心とし、そこでは管軸中心が完

表 10 解析条件一覧

配管仕様	2B 及び 4B Sch.160
材料	SUS316
比熱[W/kgf・℃]	温度依存性考慮
熱伝導率[W/mm・℃]	温度依存性考慮
密度[kgf/mm ³]	7.98 × 10 ⁻⁶
ヤング率[N/mm]	温度依存性考慮
ポアソン比	0.3
線膨張係数[mm/mm・℃]	温度依存性考慮
液層部温度[℃]	291.7
気層部温度[℃]	344
周囲(格納容器内)温度[℃]	49
管内圧[MPa]	15.4

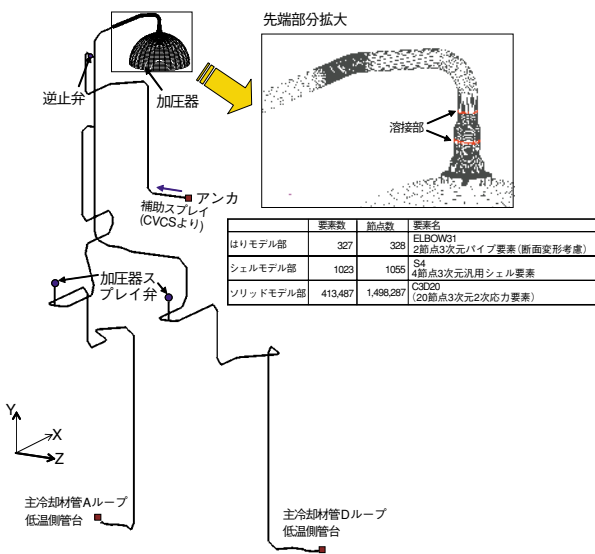


図 20 解析モデルの概要および仕様

全に固定されると仮定した。表 10 に解析条件一覧を、図 20 に解析モデルの概要および仕様を示す。

上に示した解析モデルに、(1)に示した熱伝導解析結果であるソリッドモデル部の温度分布の時刻歴変化を外荷重として与え、熱応力の時刻歴変化を求めた。はりモデル部については表 10 に示した解析条件のまま一定に保たれるとした。表 10 に示した物性値のうち、熱伝導率、ヤング率、線膨張係数については設計・建設規格⁽²⁰⁾より、熱伝導率と比熱については ASME Sec II⁽²¹⁾より得た。

4.2 熱応力解析結果および検討

パターン A,B,C において配管に接する流体が、蒸気→水と変化した場合の温度変動の分布を図 21 に示す。また、全変動パターンにおける最大の温度変

動量の一覧を、水面が変動した部位の熱伝達率として、増倍係数を乗じなかったケースと併せて表 11 に示す。温度変動量は、水面が変動する直前と変動後十分に時間が経過して定常状態に達した時点の差から算出した。図 21 より、最大の温度変動が発生した位置は、全て変動する水面が接する管の内表面上にあることが分かる。また、表 11 より最も大きな温度変動が生じたのは変動パターン B であることが分かる。他の場合、特に変動パターン A では、接する流体の温度が 52.3℃ 変動したのに対して、最大でも 23℃ ほどの温度変動に留まり、同じ温度変動でも変動する部位の面積、内壁面に付与した熱伝達率の影響等により温度変動の大きさは異なることが分かる。また、水面が変動した部位の熱伝達率として増倍係数を乗じない値を与えた場合は、温度変動は最大でも増倍係数を乗じた場合の 8 割ほどに留まり、特に変動パターン A では 1/4 にまで減少した。変動パターン A は、3 パターンのうちで最も水面が変動する部位の面積が小さく、このことが熱伝達率の大小の影響をより著しくする方向に働いたものと考えられる。

次に上記の温度変動が生じたときの熱応力の変動を表 12 に示す。この表には、水面の変動前後の時点間の各方向の応力成分の差を用いてミーゼス応力を算出したものを熱応力の変動として記載した。なお、表 11 の下段に示した増倍係数を乗じなかったケース

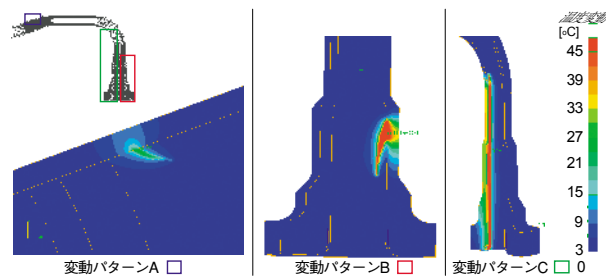


図 21 各変動パターンにおける温度変動の分布[1/2 断面] (蒸気→水変化)

表 11 管内表面の最大の温度変動一覧[℃]

	蒸気→水	水→蒸気
変動パターン A	-19.7	22.4
変動パターン A (増倍係数なし)	-10.3	5.12
変動パターン B	-48.9	50.5
変動パターン B (増倍係数なし)	-39.8	40.5
変動パターン C	-43.5	49.1
変動パターン C (増倍係数なし)	-31.9	33.7

については、いずれも増倍係数を乗じたケースよりも温度変動幅が小さかったため、最大の応力変動を生じさせるケースを得るという観点からここでは実施しなかった。

この表より変動パターン C の場合に最も大きな応力変動が生じたことがわかる。変動パターン C では最大の温度変動とはならなかったが、応力変動が最大となった理由は、変動領域の位置にあると考えられる。変動パターン C では、応力変動が最大となった位置は加圧器スプレイ配管の垂直部の内壁面のテーパ部分である。ここは形状不連続部でテーパ線と直交する方向である周方向に低温領域が広がったり（水→蒸気変動）、狭まったり（蒸気-水変動）することになるため、この部位で大きな応力変動が生じたと考えられる。

また、この応力変動が疲労き裂発生の要因となりうるかについて検討した。設計・建設規格⁽²⁰⁾に掲載されている設計用疲れ線図を用いると、まず変動パターン C の範囲には図 20 に示すように 2 つの溶接線が含まれており今回の解析結果での 1 次+2 次応力の最大の変動は 187MPa 以下のため、この場合には B 線図が適用されることになり、疲労限は 114MPa となる。今回解析した水面のステップ状の変動が周期的に繰り返されると仮定すると、最大で全振幅 173.7MPa の変動が繰り返されると考えられ、その値を設計用疲れ線図の縦軸となるピーク応力に変換すると、片振幅の変動で 86.9MPa となる。この値を最高使用温度におけるヤング率で補正すると 97.9MPa となる。これは疲労限 114MPa よりも小さく、設計用疲れ線図には安全率が包含されていることも加味すると、水面が変動することによって生じる熱応力の変動は、疲労限に対して十分に小さいと言える。このため PWR プラントにおいて定格出力運転中に、これら変動パターン A, B および C の変動が周期的に繰り返されたとしても疲労き裂が発生する可能性はないと考えられる。

本報告では、空気-水条件の可視化実験結果に基づいて熱応力の変動量を試算したが、加圧器スプレイ配管の内部は実際には蒸気-水条件であり、蒸気

の凝縮に伴って図 8 に示した変動パターン A, B, C 以外に内部流体の周期的な変動が存在する可能性がある。また、今回の解析では熱伝達率として流動解析結果から得られた概算値を使用した。より正確な評価のためには内部流体の温度測定と管内壁面の温度測定結果を反映した詳細な熱伝達率の分布を得る必要がある。

5. まとめ

PWR プラントの加圧器スプレイ配管を模擬したモックアップ試験体をアクリル材にて製作し、空気-水条件における可視化実験を行なった。また、同実験結果を再現する流動解析を行なった。さらにこれらの結果から、おおよその水面の変動パターンを仮定し、その変動によって生じる熱応力の変動量を定格出力の運転条件で試算した。得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) バイパススプレイ流量の 0.5 ~ 50 倍まで流量を変化させて可視化実験を行なった結果、最も大きな水面の変動は 20 倍のときに見られた。一方バイパススプレイ流量での水面の変動は、全振幅が 5mm 程度、周期が 0.3 ~ 15 秒程度の変動であった。
- (2) 可視化実験のうち、バイパススプレイ流量における流動状態を解析で再現した。その結果水面の形状が定性的に一致すると共に、アクリル材に対して実験結果を最もよく再現する濡れ角が 120 ~ 150° の範囲にあることがわかった。
- (3) 可視化実験結果と流動解析結果から、生じうる水面の変動を 3 パターン仮定してそれにより生じる熱応力の変動量を解析により求めた。その結果、内壁面に接する流体が蒸気⇄水とステップ状に変化することにより発生する最大の応力変動は片振幅で 97.9MPa となり、設計・建設規格に掲載されたオーステナイト系ステンレス鋼の設計用疲れ線図の B 線の疲労限 114MPa よりも小さかった。

6. 今後の課題

空気-水条件の可視化実験は、非凝縮性の気体を用いた実験であるため、実機で想定される蒸気の凝縮に伴う流動現象を模擬できていないという課題がある。また流動解析については、汎用のステンレス

表 12 管内表面の最大の応力変動一覧 [MPa]

	蒸気→水	水→蒸気
変動パターン A	56.8	65.1
変動パターン B	138.9	140.7
変動パターン C	150.2	173.7

鋼製の配管の濡れ角を特定すること、蒸気 - 配管壁間と蒸気 - 水面間の適切な凝縮モデルの決定、および流体（蒸気および水） - 配管壁間と蒸気 - 水面間の熱伝達率の特定が課題となっている。さらに構造解析の面では、流動解析により流体 - 配管壁間の熱伝達率を適切に決定できれば、本報告に示した結果のように概算値に基づいた熱伝達率を用いることなく、より正確な熱応力の変動を得ることができると考えられる。

謝辞

管内部の2層状態の流動解析を実施するにあたり、千代田アドバンスト・ソリューションズ(株)の小林治樹氏をはじめ関係者の方々の協力をいただきました。ここに謝意を表します。

文献

- (1) USNRC, NRC Bulletin 88-11, Pressurizer Surge Line Thermal Stratification (1988).
- (2) USNRC, NRC Bulletin 79-13, Cracking in Feedwater System Piping (1979).
- (3) USNRC, NRC Bulletin 88-08, Thermal Stresses in Piping Connected to Reactor Coolant Systems (1988).
- (4) A. Talja, and E. Hansjosten, Results of Thermal Stratification Tests in a Horizontal Pipe Line at the HDR-Facility, Nuclear Engineering and Design, 118, p.29 (1990).
- (5) L. Wolf et al., Results of HDR-Experiments for Pipe Loads under Thermally Stratified Flow Conditions, Nuclear Engineering and Design, 137, p.387 (1992).
- (6) W.R. Smith, D.S. Cassell, and E.P. Schlereth, A Solution for the Temperature Distribution in a Pipe Wall Subjected to Internally Stratified Flow, Joint ASME/ANS Nuclear Power Conference, p.45 (1988).
- (7) F. Baron, M. Gabillard, and C. Lacroix, Experimental Study and Three-Dimensional Prediction of Recirculating and Stratified Pipe Flow in PWR, International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 4), p.1354 (1989).
- (8) J.C. Jo, Y.H. Choi, and S.K. Choi, Numerical Analysis of Unsteady Conjugate Heat Transfer and Thermal Stress for a Curved Piping System Subjected to Thermal Stratification, Journal of Pressure Vessel Technology, 125, p.467 (2003).
- (9) Y.J. Yu, T.H. Lee, Y.S. Sohn, and S.H. Park, Thermal Stratification of Surge Line in PWR Nuclear Power Plant, Fatigue and Fracture Mechanics in Pressure Vessels and Piping, 304, p.67 (1995).
- (10) J. Bartonicek, W. Zaiss, and F. Shockle, Fatigue Degradation in Piping Systems of German Nuclear Power Plants, 3rd International Conference on Reactor Components, Session 1-1 (2004).
- (11) L. Junek, I. Safar, and J. Zima, Fatigue Damage Analysis of Unexpected Thermal Transients in Mixing Zone of T-Junction on Surge Piping System, 3rd International Conference on Reactor Components, Session 2a-6 (2004).
- (12) K. Sakai, K. Hojo, A. Kato, and R. Umehara, On-line fatigue monitoring system for nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, 153, p.19 (1994).
- (13) S. Dittmar and C. Huttner, Fatigue analyses as aid for the in-service monitoring, possibilities and limitations, 3rd International Conference on Reactor Components, Session 5-4 (2004).
- (14) 通商産業省資源エネルギー庁編, 平成12年版原子力発電所運転管理年報, 火力原子力発電技術協会, p.204 (2000).
- (15) ANSYS Inc., CFX-10 Users Manual (2005).
- (16) 日本機械学会, 改訂 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, p.321 (2006).
- (17) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第4版 (1986)
- (18) ABAQUS Inc., ABAQUS ver. 6.5 Users Manual (2004).
- (19) 日本機械学会, JSME S 017, 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針 (2003).
- (20) 日本機械学会, JSME S NC1-2005, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005).
- (21) ASME, 2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. II Part D (Metric) (2004).