

加圧水型原子力発電所安全注入系配管内のガス蓄積防止策と気泡検知法

Corrective Actions to Gas Accumulation in Safety Injection System Pipings of PWRs and Gas Void Detection Method

牧 信男 (Nobuo Maki)*

要約 米国では加圧水型原子炉 1 次系の安全注入系配管における発電所運転中のガス蓄積事象が継続的に報告されている。これらの事象は安全機能の喪失につながる可能性があることから、原子力規制委員会 (NRC) の Information Notice により注意喚起が行われている。これらの原因は、低圧系配管に漏出した冷却水からガスが分離したり、1 次冷却水中に溶存しているガスが局所的な系統圧力の低下により分離したりすることによるものである。

本研究では、これらの米国の原子力発電所における事象の発生原因を評価した結果、国内の加圧水型原子炉においては蓄圧タンクと余熱除去系統の接続配管についてガス蓄積量の定量的な把握が必要であることを明らかにした。またガス蓄積検査法としては、米国では月例で行われている超音波による検査が有効であることを模擬配管システムを用いて検証した。さらにこの超音波による検査手法が、配管系統内のキャビテーション気泡の検知に対しても適用可能であることを実験により確認した。

キーワード ガス蓄積, ガスバインディング, 水撃, キャビテーション

Abstract In the US, gas accumulation events of safety injection systems of PWRs during plant operation are continuously reported. As the events may result in loss of safety function, the USNRC is alerting licensees by Information Notices. The cause of the events is coolant leakage to interfacing systems with lower pressure, or gas dissolution of primary coolant by partial pressure drop.

In this study, it was clarified by the evaluation of the cause of the events of US plants, gas accumulation in piping between an accumulator and Residual Heat Removal System should be quantitatively investigated regarding Japanese plants. Also, effectiveness of ultrasonic testing which is used for monthly gas accumulation surveillance in US plants was demonstrated using a model loop. In addition, the method was confirmed applicable by an experiment carried out at INSS to detect cavitation voids in piping systems.

Keywords Gas accumulation, gas binding, water hammer, cavitation.

1. はじめに

米国においては、1988年に原子力規制委員会 (NRC) が IN88-23 により加圧水型原子炉の高圧安全注入ポンプにおけるガスバインディング (gas binding) の可能性を指摘し、安全注入系統におけるガスの蓄積が注目された⁽¹⁾。その後、発電所運転中のガス蓄積事象の報告が相次いだことから類似事象の防止について IN88-23 補遺 1 (1989年) から補

遺 5 (1999年) により引き続いて NRC により注意喚起が行われた。⁽²⁾⁻⁽⁶⁾

我が国の加圧水型原子炉では、米国における高圧安全注入ポンプにおけるガス蓄積事象の反映として、1991年に充てん/高圧注入ポンプへのガスバインディング対策の検討が実施され、ベントラインの追設等の対策がとられた。また我が国においては 1 年毎の定期検査が義務づけられており、その際に隔離弁の漏洩検査、系統のベンディングを確実に実施

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

するために、米国のように発電所運転中にガスが蓄積するという事象は1980年以降報告されていない。しかし今後、定期検査間隔の延長等により系統のペンティング周期が延びると、米国のようにガスが系統に蓄積する可能性が生じるため、ガス蓄積の有無を検知し、またガス蓄積量を精度良く測定する技術を確立しておく必要がある。

本研究は、米国を主とする海外の原子力発電所において発生した不具合事象に関する調査分析の一環として実施したもので、米国の加圧水型原子炉の1次系安全注入系統内でのガス発生原因の把握および我が国の加圧水型原子炉においてガス蓄積調査が必要となる個所の抽出、さらにガス蓄積量を定量的に把握するための提言を行うことを目的としている。なお、米国におけるガス蓄積事象の調査に当たっては、1991年に我が国で実施された検討以降に米国で発生した事象を対象とした。またガス蓄積量を定量的に把握するため、米国で用いられている超音波法の有効性を検証した。

2. 米国の加圧水型原子力発電所におけるガス蓄積事象

米国の加圧水型原子力発電所において1991年以降発生したガス蓄積事象としては、蓄圧タンクから飽和窒素を含有した高圧水が漏洩した事象と高圧安全

注入ポンプミニマムフローライン減圧用オリフィス部でガスが発生した事象があった。

蓄圧タンクからの飽和窒素を含有した高圧水の漏洩

蓄圧タンクの原子炉冷却系低温側出口配管に余熱除去系からの注入配管(図1矢印)が接続されている加圧水型原子力発電所で、蓄圧タンクの飽和窒素を含有した高圧水が逆止弁、止め弁から長期にわたって少しずつ漏洩し、蓄圧タンクと余熱除去系統の圧力の差から溶解していた窒素が分離し余熱除去ポンプまたは安全注入ポンプでガスバインディングが発生した事象で、次のような発電所で発生している。

1999年1月	Turkey Point発電所 ⁽⁶⁾
1999年5月	Braidwood発電所 ⁽⁷⁾
1997年10月	Byron発電所 ⁽⁸⁾
1996年11月	Waterford発電所 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾
1995年1月	Sequoyah発電所 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

高圧安全注入ポンプミニマムフローライン減圧用オリフィス部でのガス発生

遠心式高圧安全注入ポンプのミニマムフローラインに取り付けられている減圧用オリフィス(図1矢印)で局所圧力降下が生じ、溶存していたガスが分離して高圧安全注入ポンプに吸い込まれガスバインディングが生じた結果、ポンプ軸が損傷した事象

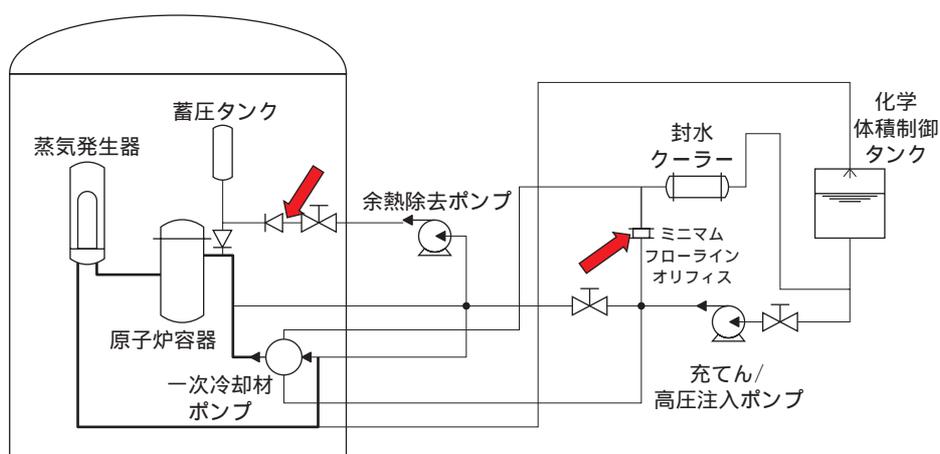


図1 米国の加圧水型原子力発電所におけるガス発生個所(1991年以降)

である。

1997年9月 Beaver Valley発電所⁽¹¹⁾

3. 国内の加圧水型原子力発電所におけるガス蓄積発生の可能性

米国の加圧水型原子力発電所におけるガス蓄積事象から、国内の同型炉の安全注入系の配管に関してガス蓄積が生じる可能性について検討した。検討対象は、系統中にガスが溶解しているまたは混入する可能性のあるタンクが接続されている系統とした。

蓄圧タンク

蓄圧タンクには窒素ガスが41～53kg/cm²gの圧力で封入されており、蓄圧タンク内水中には窒素ガスが溶解している。蓄圧タンクの原子炉冷却系統低圧側出口配管に余熱除去系からの注入配管が接続されている加圧水型原子力発電所では、余熱除去系統側は燃料取替用水タンクを水源とする低圧系(約2kg/cm²g)であるため、逆止弁、止め弁に漏洩が発生すると蓄圧タンクの高圧水が長期にわたって少しずつ漏洩し、圧力の差から溶解していた窒素が分離し配管内に蓄積する可能性がある。(図2矢印)

蓄圧タンクと余熱除去系統の温度を40℃、蓄圧タンクの圧力を50kg/cm²gと仮定する。窒素の40℃、

50kg/cm²gの溶解度は613 Ncc/kgH₂O、40℃、2kg/cm²gの溶解度は36 Ncc/kgH₂Oで、その差は577 Ncc/kgH₂Oである。15cmの逆止弁の場合を例にとると、系統水の漏洩判定基準は我が国では0.012kg H₂O/hであるので、2kg/cm²gの余熱除去系統における窒素ガスの蓄積量は約1730cc/月(2.4cc/h)となり、逆止弁が漏洩判定基準内でも余熱除去系統側に年間最大約0.02m³(圧力2kg/cm²gの時)の窒素ガスが蓄積する可能性がある。

化学体積制御タンク

化学体積制御タンクには、原子炉冷却系統水中の水素濃度を約25～35cc/kgH₂Oに保持するため、気相部に水素ガスが約1.4kg/cm²の圧力で封入されている。タンク内部では、タンク上部の水素溶解用スプレーの作用によりタンク水面に気泡が生じたり、水面に旋回流が生じ気泡が水中に巻き込まれる可能性がある。また、高圧注入ポンプミニマムフローラインに取付けられている減圧用オリフィス下流では圧力が減少し、その圧力が化学体積制御タンクの圧力よりも低下する場合溶存していた水素が分離する可能性がある。さらに、封水クーラー出口配管が化学体積制御タンクの水面より高い位置にある発電所では、圧力の減少により水素ガスが分離する可能性がある。

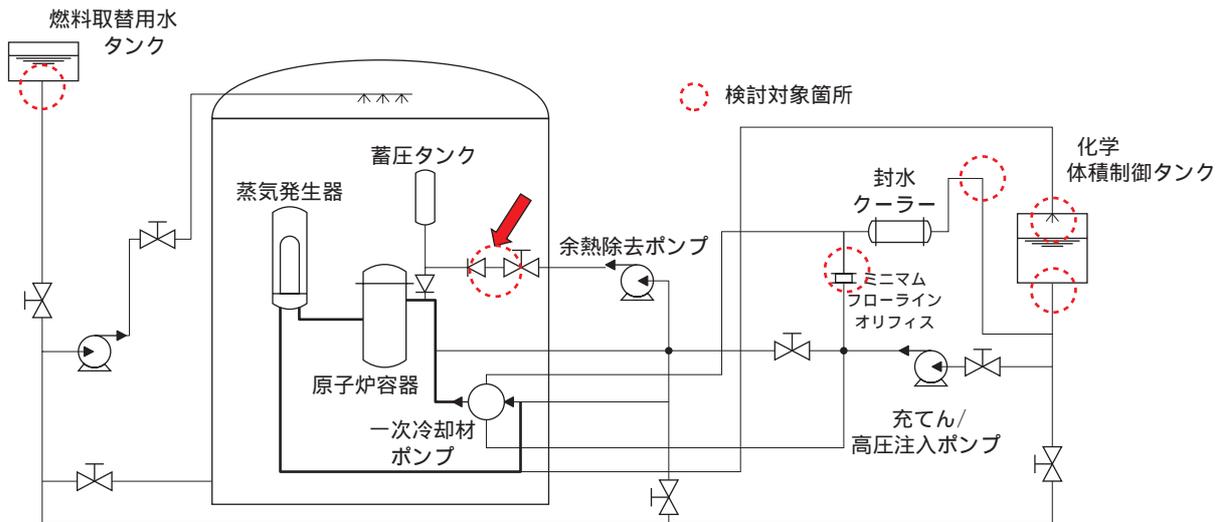


図2 国内の加圧水型原子力発電所においてガス蓄積の可能性のある箇所

我が国の加圧水型原子炉の充てん/高圧安全注入ポンプに関しては、1991年にガスバインディング対策の検討が実施されており、その結果充てん/高圧安全注入ポンプ吸込側配管へのベントライン追設等の対策がとられている。従って、化学体積制御タンク内部やオリフィス部等で発生したガスはベントラインから排出され、充てん/高圧安全注入ポンプ吸込配管におけるガス蓄積の可能性は低いと考えられる。

燃料取替用水タンク

燃料取替用水タンクは大気開放型タンクであるが、水面が低下した際、化学体積制御タンクと同様水面に旋回流が生じ、空気が水中に巻き込まれる可能性がある。しかしながら、燃料取替用水タンクに関しては、空気の巻き込みが発生しないように水位を確保する、吸込配管の形状を旋回流が発生しにくい形状にする等の対策がとられており、燃料取替用水タンクから巻き込まれた空気が安全注入系ポンプ吸込配管に蓄積する可能性は低いと考えられる。

4. 国内の加圧水型原子力発電所におけるガス蓄積対策

蓄圧タンクの原子炉冷却系統低温側出口配管と余熱除去系からの注入配管の接続部にガスが蓄積していた場合、安全注入信号により余熱除去ポンプが自動起動した際、水撃が発生し配管が破損する可能性がある。水撃の発生は蓄積したガス量、ポンプの仕様、配管系統の配置に左右される。従って、当該箇所におけるガス蓄積の有無を確認し、ガス蓄積が認められた場合は蓄積量を定量的に把握し、水撃発生の可能性を検討した上でガス蓄積量の許容値、ベントリング周期の設定を行う必要がある。

5. 超音波によるガス蓄積量の測定

ガス蓄積の有無を確認し、またガス蓄積量を定量的に把握するため、米国で用いられている超音波法の有効性を検証した。

5.1 原理

超音波が伝わる物質の境界面に垂直に超音波が当たった時に、超音波はそこで反射する成分と通過する成分に分かれる。この2つに分かれる割合は境界面で接する2つの物質の音響インピーダンスによって決まる⁽¹²⁾。

$$Z_i = \rho_i \cdot C_i$$

$$\rho_i: \text{物質の密度}, C_i: \text{音速} (i=1,2) \quad (5.1.1)$$

また物質1, 2間の音圧反射率 r_{12} と音圧通過率 t_{12} はそれぞれ

$$r_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (5.1.2)$$

$$t_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

いまステンレス鋼を物質1, 水を物質2とする。ステンレス鋼中の音速(縦波) C_1 と水中の音速 C_2 に対する比を $k (= C_1 / C_2)$ 、配管の肉厚を t 、内径を d とする。配管中に気泡がある場合、ステンレス鋼と空気の音響反射率は1で全反射するので深さ t の位置にエコーが現れる。この時の音圧通過率は約0.94である。一方配管がすべて水で満たされている時は超音波が水中を透過するため、 $t+kd$ の位置に配管対面からの最初のエコーが現れる。この時の音圧通過率は

$$t_{12} \cdot r_{21} \cdot t_{21} \cong 0.12$$

である。エコーの高さは音圧に比例するので、 t および $t+kd$ の深さに生じるこれらの2つのエコーに注目し、気泡の有無を判別することが可能である。なお、エコーはステンレス鋼と水の境界面における反射、透過の組み合わせで $mt+nkd$ ($m=1,2,3,\dots$, $n=0,1,2,3,\dots$)の位置に現れそれぞれの音圧通過率が算出できる。

気泡量を測定する場合は配管底面より測定を行う。2番目のエコーは気泡の厚さを b とすると $t+k(d-b)$ の位置に現れるのでこの時の値から b を求め気泡量を推定する。

またガスの占める断面積を S' 、配管断面積を S とくと、気液体積流量比は流速が v のとき、次式で求められる。

$$\alpha = \frac{S'v}{Sv} = \frac{4S'}{\pi d^2} \quad (5.1.3)$$

ただし、

$$S' = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \left[\cos^{-1}\left(1 - \frac{2b}{d}\right) - \left(1 - \frac{2b}{d}\right) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{2b}{d}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5.1.4)$$

この を気泡吸込みの判定基準として用いることができる。

5.2 試験

超音波を用いたガス蓄積量測定法の有効性を検証するために試験を行った。超音波振動子としては垂直探触子（株検査技術研究所製 型式1C30N-F、周波数1.1MHz）を用いた。模擬配管システムを図3に示す。

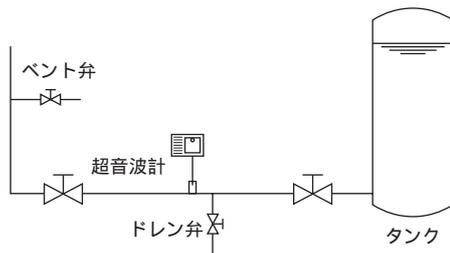


図3 ガス蓄積量測定用模擬配管系統

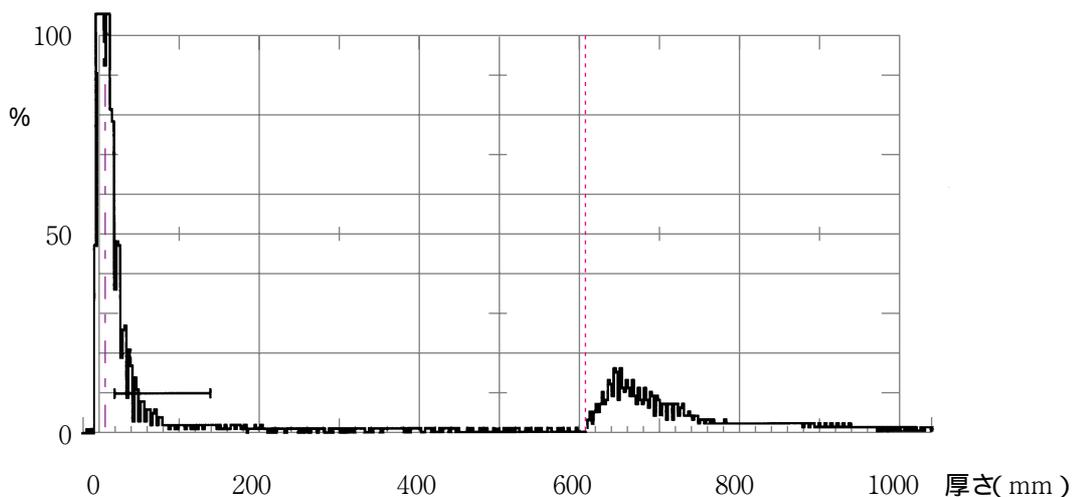


図4 配管満水時に上部から測定したエコー波形

5.2.1 実験方法

(1) ガスの有無の検出

配管システムを満水状態とし、配管上部に探触子を置きエコー波形を記録した。次に配管上部に薄い気層部が形成されるまで排水し、再びエコー波形を記録した。

(2) ガス蓄積量の測定

配管上部に薄い気層部が形成された状態に水位を維持し、探触子を配管下部に置きエコー波形を記録した。次に配管内の水をすべて排水し、配管下部からエコー波形を記録した。

5.2.2 試験結果と考察

(1) ガスの有無の検出

図4に配管満水時のエコー波形を、図5に配管上部に薄い気層部があるときのエコー波形を示す。縦軸はエコーの強度（%）、横軸はステンレス鋼に換算した厚さ（mm）である。配管表面（厚さ t ）からのエコーが約7.5mmのところ、配管中の水を透過し底面（厚さ $t+kd$ ）から反射したエコーが約605.7mmのところ、生じている。従って、ステンレス鋼と水の場合の k の値3.98を用いて d の値150.1mmが求まる。配管上部に薄い気層部があるときは、配管と気層部との境界で超音波が全反射されてしまうために配管底面からのエコーは消失している（図5）。

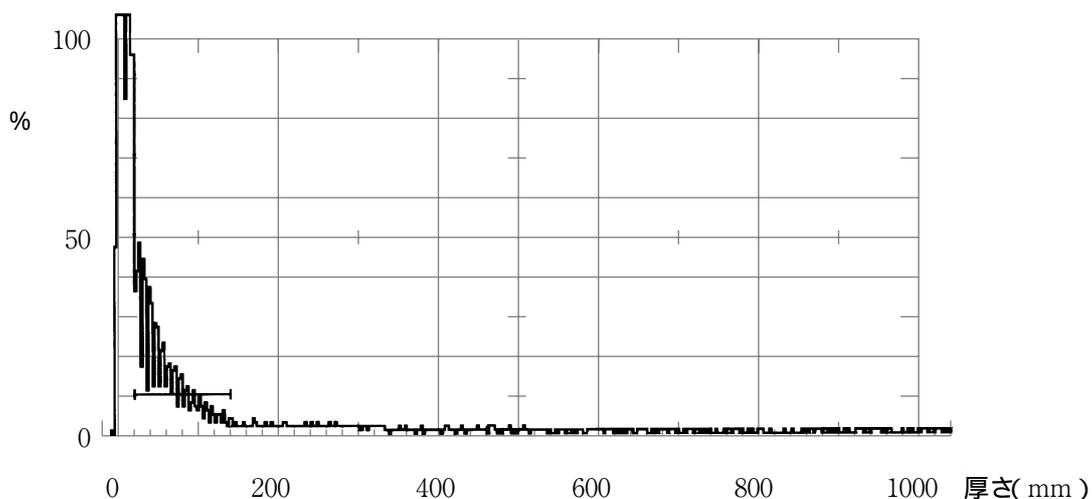


図5 配管上部に薄い気層部があるときに上部から測定したエコー波形

(2) ガス蓄積量の測定

図6に配管上部に薄い気層部があるときに下部から測定したエコー波形を、図7に配管に水がないときに下部から測定したエコー波形を示す。縦軸はエコーの強度(%), 横軸はステンレス鋼に換算した厚さ(mm)である。配管表面(深さ t)からのエコーが約7.5mmのところ、配管中の水を透過し水面から反射したエコーが約600.8mmのところを生じて

いる。しかし、配管の水をすべて排水した場合は、配管表面(深さ t)からのエコーのみが現れている(図7)。

(3) 気液体積流量比

(1) および(2)より気層の厚さ b は1.27mmとなる。(5.1.4)式よりガスの占める断面積 S は 23.4mm^2 , (5.1.3)式より気液体積流量比は0.13%となる。

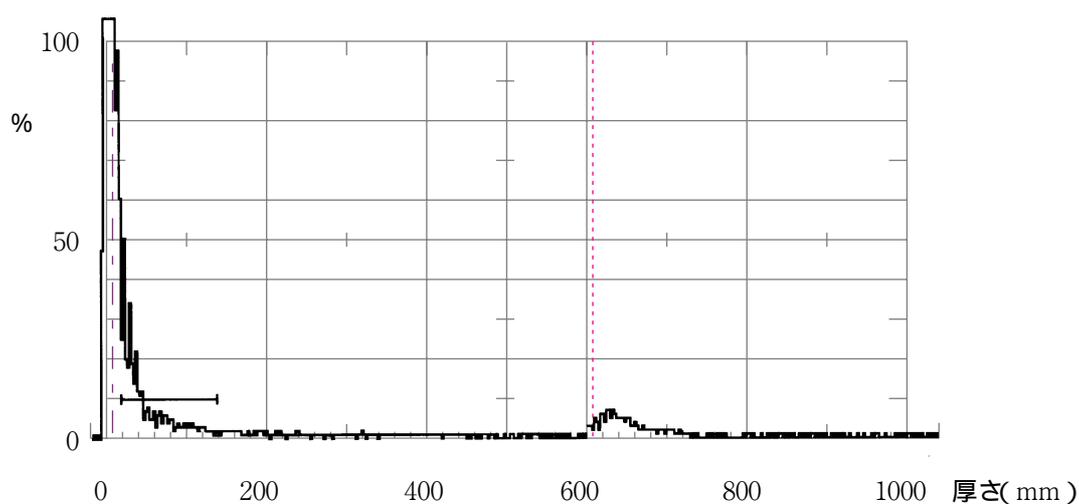


図6 配管上部に薄い気層部があるときに下部から測定したエコー波形

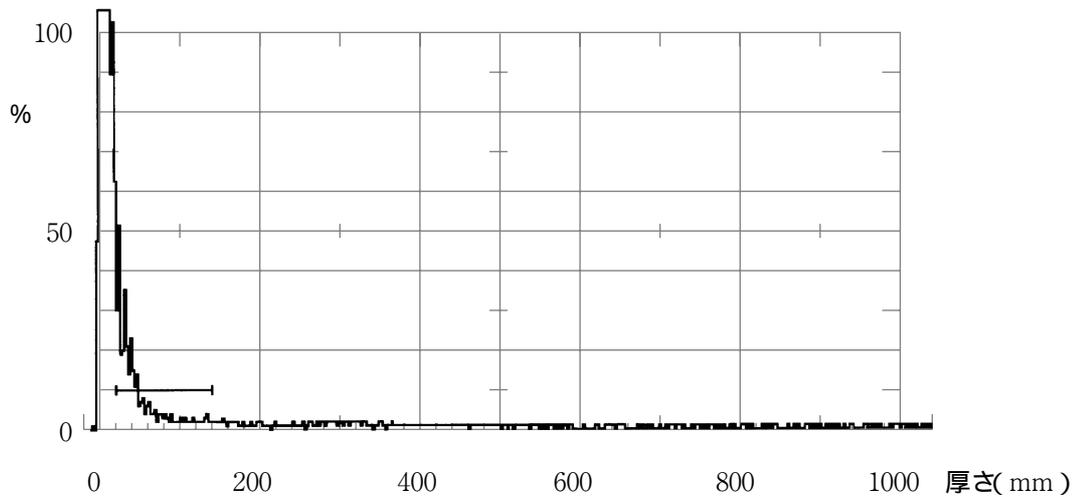


図7 配管に水がないときに下部から測定したエコー波形

6. 超音波によるキャビテーション気泡の検出

従来原子力発電所の配管系統におけるキャビテーション発生の有無は、キャビテーション気泡の崩壊時に発生する衝撃波や音波を加速度計やマイクロフォン等のセンサーで収集することにより判断していた。このセンサーによる方法ではセンサー近傍のキャビテーションの発生を検知できるものの配管中のキャビテーションを検知するためには複数のセンサーの取付けが必要であった。今回実施した超音波による方法では、単一の超音波発振子により配管の超音波の路程上のキャビテーション気泡を検知することが可能である。またキャビテーション気泡により超音波が散乱され配管反対面からの反射波が減衰することからその減衰の程度によりキャビテーシ

ン気泡発生量を推定することが可能である。そこで実際に実験によりそれを確かめた。

6.1 実験方法

超音波振動子としては垂直探触子（㈱検査技術研究所製 型式1C30N-F, 周波数1.1MHz）を用いた。図8にキャビテーション気泡の実験装置の系統図を、図9に試験流路を示す。試験流路上流側にはオリフィス部を配置し、ポンプで装置内の水を4m/s（オリフィス部）で循環させることによりキャビテーション気泡を発生させた。流体としては水を用いた。Re数は約 10^5 であった。まず、流体が静止しているときにエコー波形を記録し、次にポンプを起動し試験流路内の上流と下流でエコー波形を記録した。

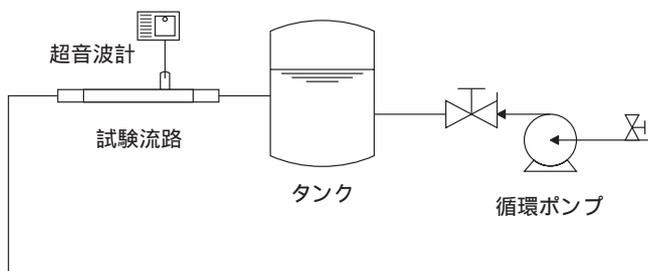


図8 キャビテーション気泡の実験装置の系統図

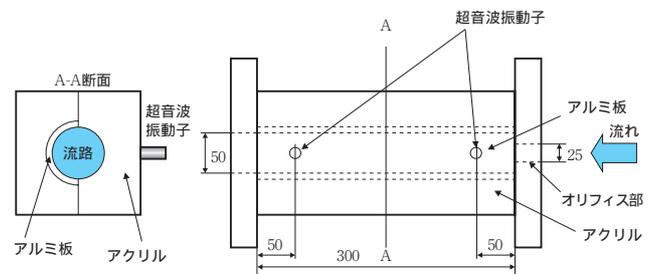


図9 キャビテーション気泡の実験装置の試験流路

6.2 試験結果と考察

図10に流体静止時のエコー波形を、図11と図12にそれぞれ流体が流動しているときの試験流路上流と下流におけるエコー波形を示す。縦軸はエコーの強度（%）、横軸は水に換算した厚さ（mm）である。流動時は静止時に高いピークを示していた77mmの位置の配管反対側のアルミ板からのエコーが減衰している。この減衰の程度は上流側（図11）の方が下流側（図12）より大きく、配管反対側からの反射波がキャビテーション気泡による散乱の影響をより多く受けていることが分かる。

7. あとがき

米国の原子力発電所におけるガスバインディング事象の発生原因を評価し、国内の加圧水型原子力発電所における調査必要箇所を抽出した。また、ガス蓄積防止策としては米国で用いられている超音波による検査法が有効であることを模擬配管システムを用いて検証した。さらに、この超音波による検査法が配管システム内のキャビテーション気泡の検知に対しても適用可能であることを実験により確認した。

なお本研究の実施にあたり実験装置の提供等多大な協力をいただきました関西電力（株）原子力保修訓練センター津田 講師、INSS経年劣化研究プロジェクト黒住 主任研究員、同潜在事象研究プロジェクト八木 研究員に謝意を表します。

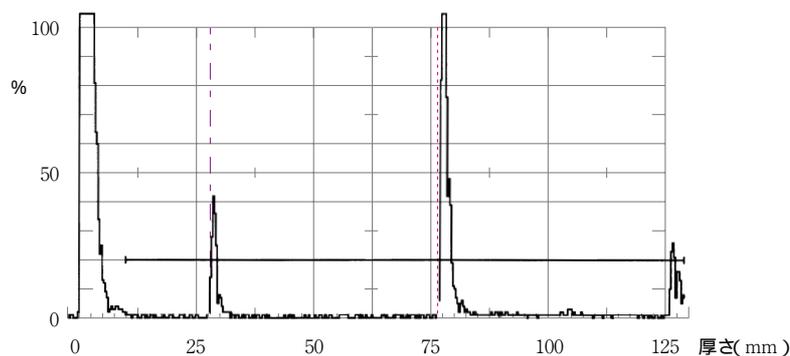


図10 流体静止時のエコー波形

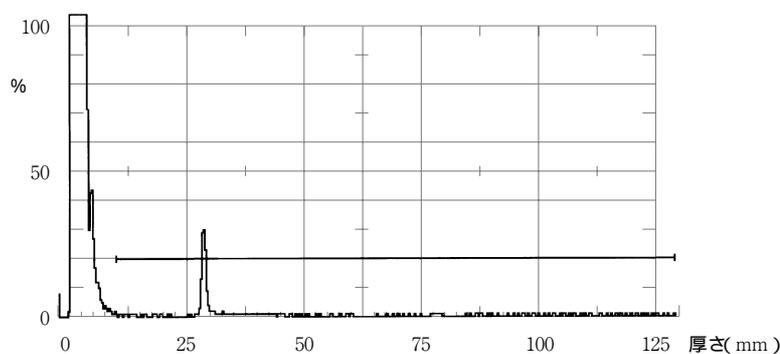


図11 流体流動時の上流側のエコー波形

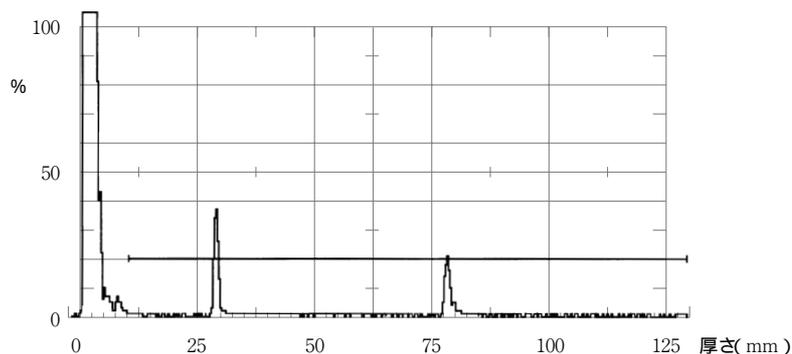


図12 流体流動時の下流側のエコー波形

文献

- (1) NRC Information Notice#:88-23,"Potential for Gas Biding of High Pressure Safety Injection Pumps during a Loss-of-Coolant Accident," USNRC (1988) .
- (2) NRC Information Notice#:88-23 supplement 1,"Potential for Gas Biding of High Pressure Safety Injection Pumps during a Loss-of-Coolant Accident," USNRC (1989) .
- (3) NRC Information Notice#:88-23 supplement 2,"Potential for Gas Biding of High Pressure Safety Injection Pumps during a Loss-of-Coolant Accident," USNRC (1990) .
- (4) NRC Information Notice#:88-23 supplement 3,"Potential for Gas Biding of High Pressure Safety Injection Pumps during a Loss-of-Coolant Accident," USNRC (1990) .
- (5) NRC Information Notice#:88-23 supplement 4,"Potential for Gas Biding of High Pressure Safety Injection Pumps during a Loss-of-Coolant Accident," USNRC (1992) .
- (6) NRC Information Notice#:88-23 supplement 5,"Potential for Gas Biding of High Pressure Safety Injection Pumps during a Loss-of-Coolant Accident," USNRC (1999) .
- (7) Licensee Event Report#:99 456/001-01, "Both Trains of Low Pressure Safety Injection Declared Inoperable Due to a Gas Pocket in the B/C Cold Leg Injection Piping," Commonwealth Edison Co. (1999) .
- (8) Licensee Event Report#:97 454/017-01, "Missed ECCS Venting Surveillance due to Ineffective Supervisory Methods," Commonwealth Edison Co. (1997) .
- (9) NRC Information Notice#:91-50 supplement 1,"Water Hammer Events since 1991," USNRC (1997) .
- (10) NRC Information Notice#:97-40,"Potential Nitrogen Accumulation Resulting from Backleakage from Safety Injection Tanks," USNRC (1997) .
- (11) Licensee Event Report#:97 334/039-00, "Gas Accumulation in Charging/High Head Safety Injection Pump Piping," Ohio Edison. (1997) .
- (12) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, 超音波技術便覧, pp.16-18, 日刊工業 (1971) .