

フィルタベント設備における混相流動に関する基礎研究

Basic research on multiphase flow in filter vent equipment.

実機状態を模擬した基礎実験を通じた蒸気凝縮振動に関する知見拡充

原子力発電所に関する新規規制基準適合のため、詳細検討中のフィルタベント設備に関して、格納容器から圧力を逃すベント操作時に、設備内で蒸気凝縮が発生するため、蒸気凝縮による振動等の影響に関する知見拡充を目的とした基礎研究を東京工業大学と共同で実施した。



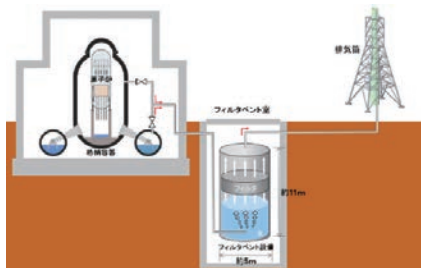
執筆者
原子力本部 原子力部
設備設計グループ
太田 充洋

1 研究の背景と目的

フィルタベント設備^{*1}内の低温水中に蒸気を含むガスが流入する際に蒸気凝縮による動荷重が発生し、フィルタ容器及び内部構造物へ影響を及ぼす可能性がある。本件に関し、過去、先行他社の安全審査において、既往の研究結果^{*2} (Ayaら [1]、以下「既往研究」という。)を元に内部構造物へ影響を及ぼす動荷重は発生しないことを説明している。

しかしながら、既往研究で用いた実験装置と当社が検討中のフィルタベント設備では、水中へのガス放出ノズルの向きが異なる (既往研究：下向き、実機：斜め下向き)。そのため、知見拡充に向けた基礎研究として、実機に近い形状を模擬した実験装置を構築し、基礎実験を通じたデータ収集・既往研究との比較等の分析を実施した。

※1 万一炉心損傷が発生し、格納容器が過圧される状況になった場合においても、格納容器内の気体をフィルタベント設備内の水及びフィルタを通じて外部へ放出することにより、格納容器を減圧して格納容器の破損を防止するとともに、粒子状放射性物質 (セシウム等) の放出量を1/1000以下に低減 (99.9%以上を除去) するための設備 (第1図参照)。



第1図 フィルタベント設備 概要図

※2 ベント管を通じて蒸気が水中に放出され凝縮する際、蒸気流束や水中温度をパラメータにした一定の条件下で、チャタリング現象と呼ばれる、液体と蒸気との界面変動 (ベント管内への逆流) を伴う不規則でかつパルス状の大きな圧力変動現象が発生することが確認されている。

2 基礎研究の内容

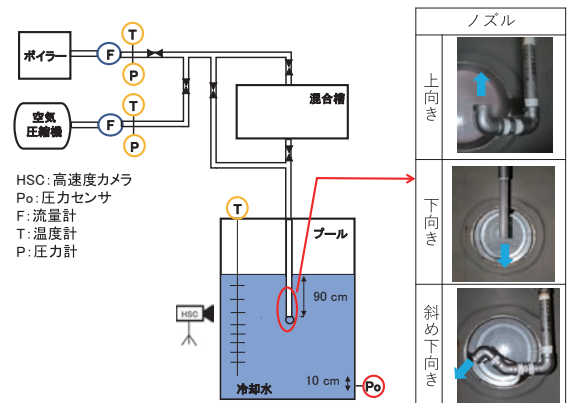
基礎研究の項目、および概要を以下に示す。

(1) 実験装置の構築

蒸気凝縮振動に関する既往研究を分析したところ、蒸気

凝縮による振動状態を把握するためには、ガス放出ノズル出口の気体界面の挙動、圧力変化を観察する必要があることから、それらを観察・データ収集可能な実験装置を構築した。

実験装置の概要を第2図に示す。ボイラーで発生させた水蒸気をプール水中に放出し、水蒸気凝縮の挙動を、高速度カメラ、圧力センサにて観察・データ収集する。また、非凝縮性ガスを含んだ蒸気による観察を実施するため、空気圧縮機から送風した非凝縮性ガス (空気) を混合槽にて水蒸気と混合する。なお、低温水中でのガス放出ノズルの形状は、第2図に示すとおり、上向き、下向き、斜め下向きの3種類を制作した。



第2図 実験装置 概要図

(2) 基礎実験によるデータ収集・分析

a. 実験装置の妥当性確認のための基礎実験

今回構築した実験装置の妥当性を確認するため、上向きノズルを用いた基礎実験を実施し、データを収集した。既往研究を参考に蒸気流束 ($4 \sim 45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)、プール水温度 ($20 \sim 95^\circ \text{C}$) をパラメータとし複数の条件下で実験を行い、蒸気凝縮挙動とプール水温度・流束との関係性を状態図にまとめ、既往研究との比較を実施した。

b. ノズルの向きによる蒸気凝縮挙動への影響確認

低温水中へのガス放出ノズルの向きによる蒸気凝縮挙動への影響の有無を確認するため、上向き、下向き、斜め下向きの3種類のノズルを用いた実験を実施した。

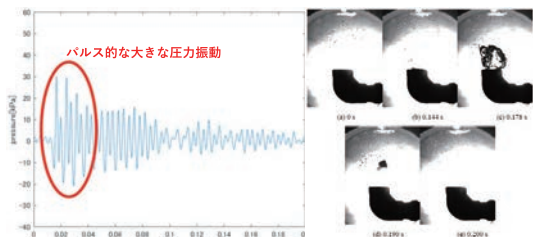
c. 非凝縮性ガス混合による蒸気凝縮挙動への影響確認

フィルタベント設備では、蒸気内に初期充填されている窒素、水の放射線分解により発生する水素・酸素が含まれることを踏まえ、非凝縮性ガスの混合の有無が蒸気凝縮挙動へ与える影響を確認するため、非凝縮性ガスを混合した蒸気による実験を実施した。

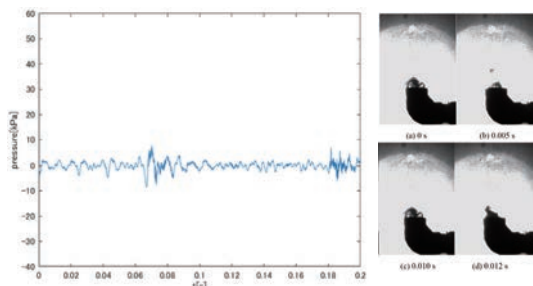
3 実験結果のまとめ・考察

(1) 実験装置の妥当性確認のための基礎実験

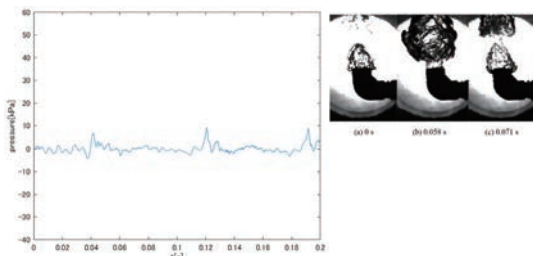
高速度カメラによる蒸気凝縮挙動の観察、及び圧力センサによる蒸気凝縮時の圧力振動の観察から、プール水温度、蒸気流束を変化させることで蒸気凝縮の挙動がチャギング^{※3}状態（第3図）、凝縮振動^{※4}状態（第4図）、パブリング^{※5}状態（第5図）へと変化することを確認し、圧力振動のデータを収集した。



第3図 観察結果（チャギング状態）

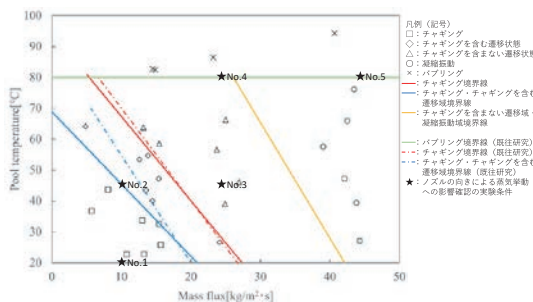


第4図 観測結果（凝縮振動状態）



第5図 観測結果（パブリング状態）

また、実験結果を横軸に蒸気流束、縦軸にプール水温度とした状態図にまとめた結果を第6図に示す。



第6図 実験で得られた蒸気凝縮の状態図

第3図～第5図に示す通り、蒸気凝縮の状態変化を適切に観察できたこと、及び第6図のとおり、状態変化について既往研究と同様な傾向を示していることから、今回構築した実験装置の妥当性を確認できた。

※3 液体と蒸気との界面変動を伴う不規則でかつパルス状の大きな圧力振動が発生する状態。

※4 気泡の成長と消滅を繰り返し、振幅の小さい高振動数の圧力振動が発生する状態。

※5 大気泡を伴うゆっくりとした膨張と収縮を繰り返し、小さな圧力振動が発生する状態。

(2) ノズルの向きによる蒸気凝縮挙動への影響確認

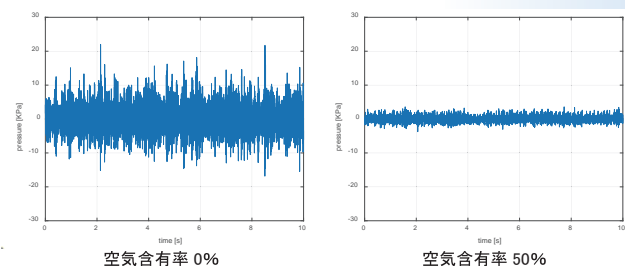
第6図の実験条件（★1～5）の観察結果から、第1表に示すとおりノズルの向きによる蒸気凝縮挙動の状態変化への影響は確認されなかった。これは、同じ径の気泡は、同じ時間で消滅すること、およびその際に発生する圧力波が球面上に伝達することが要因であると推察した。

第1表 各試験条件での蒸気凝縮挙動の観察結果

No.	上向きノズル	下向きノズル	斜め下向きノズル	プール水温 (°C)	蒸気流束 (kg/m ² ·s)
1	チャギング	チャギング	チャギング	20	10
2	チャギング	チャギング	チャギング	45	10
3	遷移域	遷移域	遷移域	45	25
4	パブリング	パブリング	パブリング	80	25
5	凝縮振動	凝縮振動	凝縮振動	80	45

(3) 非凝縮性ガス混合による蒸気凝縮挙動への影響確認

非凝縮性ガスの混合割合以外は同条件（ノズル向き、流束、プール水温度）で実験を行った際の圧力振動の違いについて第7図に示す。非凝縮性ガスを混合した蒸気の方が、圧力振動が小さくなる傾向を確認した。これは、非凝縮性ガスが混合することで蒸気と水との接触確率が減ったことから圧力振動が減少したものと推察した。



第7図 非凝縮性ガスの含有の有無（0%、50%）の比較結果

4 まとめ

低温水中での蒸気凝縮時の挙動について、ガス放出ノズルの向きの影響はなく、既往研究の知見を実機の影響評価に活用可能なこと、及び非凝縮性ガスを含んだ蒸気凝縮による凝縮振動が小さくなる傾向を得たこと等、今回の基礎研究を通し、フィルタベント設備の信頼性向上に資する知見を得た。

参考文献

[1] I. Aya, H. Nariai and M. Kobayashi, Pressure and Fluid Oscillations in Vent System due to Steam Condensation, (I), (II)