

# 沸騰水型原子炉の蒸気乾燥器及び主蒸気系の流力音響共鳴振動

## Flow-induced Acoustic Resonance Vibration of Main Steam Lines and Dryer in Boiling Water Reactor

日立製作所・エネ研	高橋 志郎	Shiro TAKAHASHI	Member
日立製作所・エネ研	奥山 圭太	Keita OKUYAMA	Member
日立製作所・エネ研	田村 明紀	Akinori TAMURA	Member
日立製作所・エネ研	大塚 雅哉	Masaya OHTSUKA	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー	吉川 和宏	Kazuhiro YOSHIKAWA	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー	椿 正昭	Masaaki TSUBAKI	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー	馬淵 靖宏	Yasuhiro MABUCHI	Member

The BWR-3 steam dryer in the Quad Cities Unit 2 Nuclear Power Plant was damaged by high cycle fatigue due to acoustic-induced vibration under extended power up-rate conditions. The dryer failure was attributed to flow-induced acoustic resonance at the stub pipes of safety relief valves (SRVs) in the main steam lines (MSLs). The acoustic resonance was considered to be generated by interaction between the sound field and unstable shear layers across the closed side branches with SRV stub pipes. We have started a research program on evaluation of the acoustic source, sound propagation and dryer loading using 1/10-scale BWR-5 tests and analyses. We demonstrated that acoustic resonance did not occur under the BWR-5 power up-rate conditions. The amplitude of the fluctuating pressure in multiple SRV stub pipes became several times intense comparing with that in the single stub pipe.

**Keywords:** Boiling Water Reactor, Steam Dryer, Safety Relief Valve, Flow-Induced Acoustic Resonance

### 1. 緒言

米国沸騰水型原子力プラント (BWR-3) の Quad Cities 2号機では、拡張型出力向上時 (17.8%向上) において、蒸気乾燥器の高サイクル疲労を確認した[1]。これは、主蒸気系配管(MSL)に設置した蒸気逃し安全弁 (SRV) の管台において、音響共鳴による圧力変動が発生し、蒸気乾燥器まで伝播したためと報告されている。国内 BWR の定格運転においては、同様の事象は発生していないが、今後国内で実施される BWR の出力向上を見据えて、本研究では蒸気乾燥器の健全性を評価できる解析及び試験手法を開発、高度化中である[2][3][4][5][6]。その評価手順を図 1 に示す。音源(流動)解析により、SRV 管台において発生する圧力変動を計算し、音響解析により、蒸気乾燥器へ伝播する圧力変動を評価する。その荷重を入力として、構造解析を実施し、蒸気乾燥器に作用する変動応力を求め、蒸気乾燥器の健全性を評価する。これらの解析手法は、縮小試験、実機測定

結果と比較して高度化を図っている。これら解析及び試験技術は、プラント機器の振動による高サイクル疲労の予測に対しても適用することが可能である。一方、米国で既に実施されている、MS 配管表面のひずみゲージ測定をもとにしたドライヤ荷重評価も検討している。この場合、MSL の配管表面のひずみ変動から、SRV 管台で発生した MSL 内の圧力変動を評価する。ひずみゲージの実測値は出力向上運転時のモニタリングとしても利用できる。

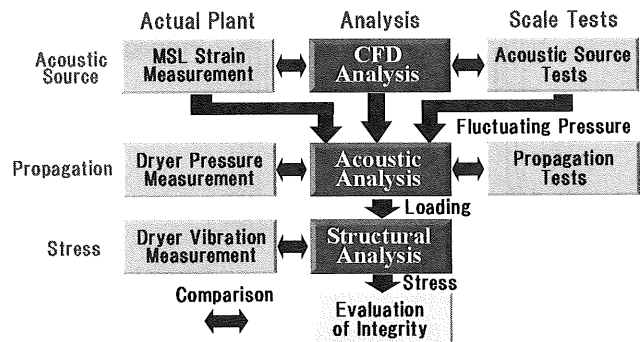


Fig. 1 Evaluation flow chart.

連絡先:高橋志郎、〒319-1221 茨城県日立市大みか町  
7-2-1 日立製作所エネルギー・環境システム研究所、  
電話:0294-55-8112、e-mail:shiro.takahashi.fu@hitachi.com

図2にSRV管台における音響共鳴現象の概要を示す。SRV管台では、蒸気流速を過度に増加すると、音場の共鳴周波数と、高速の蒸気流による渦放出の周波数が一致（ロックイン）して、フィードバック現象により渦放出を促進する自励的な音響共鳴が生じ、強い圧力変動が発生する。SRV管台のような単一の閉止分岐管におけるキャビティトーンの研究は幾つか実施されているが[7][8]、BWR主蒸気系のように、SRV管台が複数個並んで設置されている場合の音響特性に関して検討した結果は少ない。また、図3に示すように、SRV管台の音響共鳴により発生した圧力変動は、蒸気乾燥器まで伝播して、荷重として作用したと想定している。しかしながら、米国BWRで確認したSRVの流力音響共鳴現象及び蒸気乾燥器への圧力変動の伝播を試験等で再現した報告は無い。国内でも出力向上が計画されており、国内で最も多いBWR-5プラントの主蒸気系における音響振動特性の評価が望まれる。

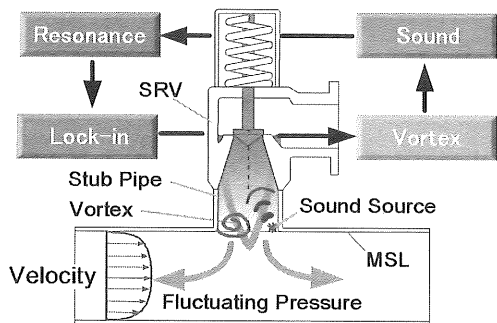


Fig. 2 Flow-induced acoustic resonance at the SRV stub pipe.

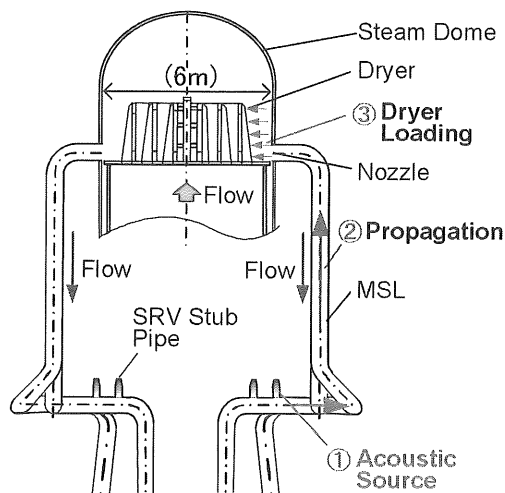


Fig. 3 BWR steam dome, dryer and MSLs.

本研究では、代表的な国内BWR-5の蒸気ドーム及び蒸気乾燥器を模擬した1/10縮小空気試験により、複数

設置されたSRV管台の流力音響共鳴現象及び蒸気乾燥器に発生する圧力変動を再現するとともに、BWR主蒸気系における音の伝播特性を検討した。特に、BWR-5の出力向上条件における音響共鳴発生の有無を確認した。また、1/10縮小空気試験結果と音響解析結果を比較して、音響解析手法の妥当性を確認した。

## 2. BWR主蒸気系

図4に国内の代表的なBWR-5主蒸気系を示す。BWR-5の主蒸気系は、蒸気ドームとMSLで主に構成され、MSLにはSRV管台が複数設置されている。BWR-5のMSLは、形状が相違する配管系が2系統有り、一方のライン（MSL1と呼ぶ）では、SRV管台が3個、他方のライン（MSL2と呼ぶ）ではSRV管台が7個設置されている。MSL2は複雑な構造をしており、MSLが分岐して閉止されたデッドレグと呼ばれる流れの静止した領域が存在する。そのため、MSL2では、主蒸気流れが横切るSRV管台4個と、流れが静止した部分に設置された管台3個が存在する。特に、主蒸気流れが横切る管台は、流れに励起されて、音源を発生させる。

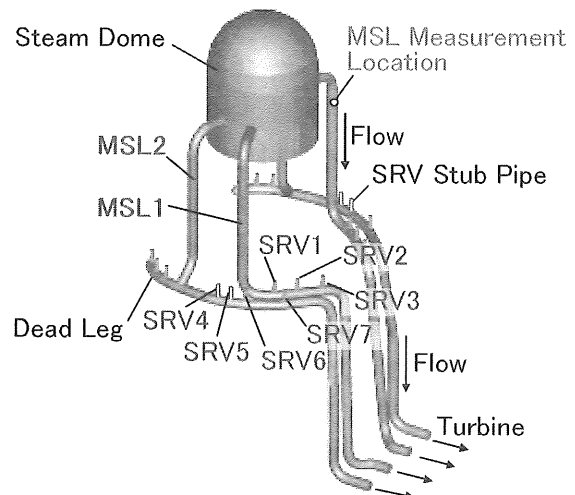


Fig. 4 BWR-5 Main Steam Line.

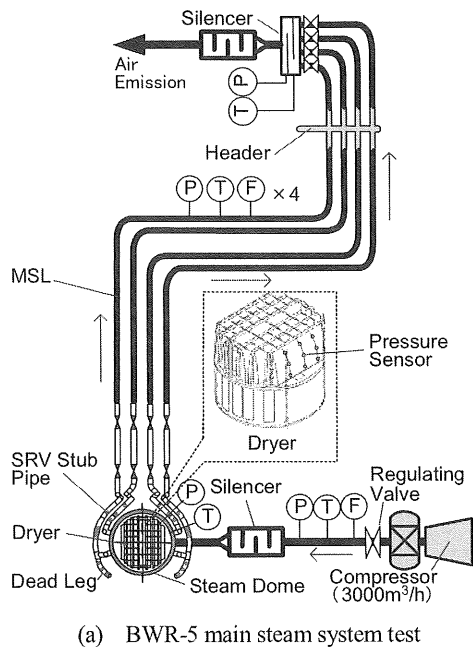
## 3. 試験及び解析方法

### 3.1 試験方法

SRV管台での流力音響共鳴及び蒸気乾燥器への圧力変動の伝播を確認するため、図5(a)に示すような、BWR-5主蒸気系の1/10縮小試験装置を製作した。

本試験装置は国内の代表的なBWR-5を1/10縮小で模擬しており、蒸気ドーム、蒸気乾燥器、20体のSRV管台を有するMSLの4系統を模擬した。本試験では、常温、常圧の空気を試験体へ圧縮機で供給した。流調

バルブや圧縮機で発生するノイズを低減するため、試験体前後にサイレンサを設置した。蒸気ドーム、蒸気乾燥器及び MSL 表面、SRV 管台の先端に圧力センサを設置し、SRV 管台で発生、伝播した圧力変動を測定した。測定圧力の 0.1% 以下の最小分解能を有する圧力センサを構造物表面に合わせて設置した。試験時の流体条件を把握するため、温度、圧力及び流量（図中記号、T、P、F）を測定した。また、単一の SRV 管台の音響共鳴現象を評価するため、図 5(b)に示すように、直管に単一 SRV 管台を設置して試験を実施した。



(a) BWR-5 main steam system test  
(b) Single SRV stub test  
Fig. 5 Schematic diagram of 1/10-scale test apparatus.

### 3.2 解析方法

本研究では、SRV 管台で発生する圧力変動の現象を解明するため、流動（音源）解析を実施した。解析には、格子ボルツマン法 (LBM) を用いた。解析対象は、図 5(b)に示すような単一の SRV 管台を模擬した分岐管であり、主管出入口境界を無反射とした[6]。

また、MSL から蒸気乾燥器への圧力変動（音）の伝播を評価するため、3 次元波動方程式による音響解析を実施した。図 6 に本研究で用いた音響解析モデルの

外観図（中心断面を表示）を示す。約 10 万のメッシュで BWR 蒸気ドーム及び蒸気乾燥器を模擬した解析モデルを作成した。また、試験結果と比較し、解析手法の妥当性を確認するため、1/10 縮小試験装置のスケール及び流体条件を模擬した。本解析では、縮小空気試験で得られた圧力変動を MSL での入口入力条件として、蒸気乾燥器に伝播する圧力変動を非定常音響解析で求め、蒸気乾燥器フード表面の圧力変動の試験結果と比較した。なお、入力した圧力の変動周波数は SRV 管台における共鳴周波数である。スケールと圧力変動の波長の比は実機と一致させた。また、境界は全反射条件とした。

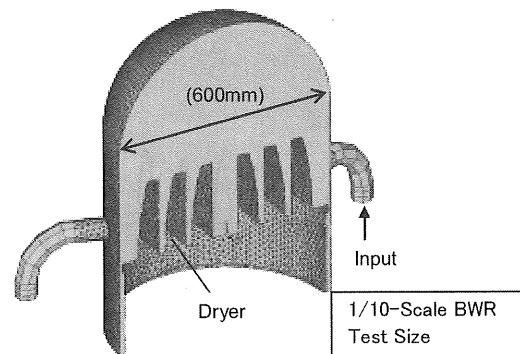
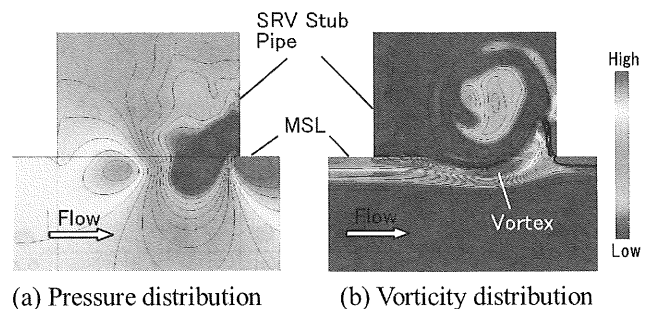


Fig. 6 Computational grids for acoustic analysis.

## 4. 試験及び解析結果

### 4.1 解析による音源評価

強く共鳴する  $St=0.4$ （但し、 $St=fd/U$ ,  $f$ : 管台共鳴周波数,  $d$ : 管台内径,  $u$ : MSL 平均流速）の条件で音源解析を実施した結果を、図 7 に示す。図 7 は SRV 管台付け根部周りの 2 次元解析結果（圧力と渦度分布）である。本解析により、流れのはく離により生じる高い渦度と渦と壁面の作用による圧力変動の発生を確認できた。このように、SRV 管台で発生する圧力変動を LBM による解析により再現することが可能である。



(a) Pressure distribution (b) Vorticity distribution  
Fig. 7 Sound source analysis.

#### 4.2 試験による単一 SRV 管台の音源評価

図 8(a)に、試験で得られた  $St$  が 0.69 及び 0.44 における、単一 SRV 管台の圧力の時間変動波形を、図 8(b)に  $St$  が 0.44 におけるパワースペクトル密度 (PSD) を示す。図中の圧力変動は、SRV 管台の天端 (図 2 の弁体設置部) で測定した試験結果であり、流れの動圧で無次元化した。また、図 8(b)の周波数は、SRV 管台の共鳴周波数で規格化した。図 8(a)のように、 $St$  が 0.69 では、圧力変動の振幅は小さく、比較的ランダムな波形であった。一方、過度に配管内の流速を増加した条件 ( $St=0.44$ ) では、分岐管長さの 1/4 波長に相当する周波数で共鳴し、強い圧力変動が発生した。また、図 8(b)に示すように、 $St$  が 0.44 では、SRV 管台の共鳴周波数 ( $f=1$ )で顕著な圧力変動のピークを確認できた。

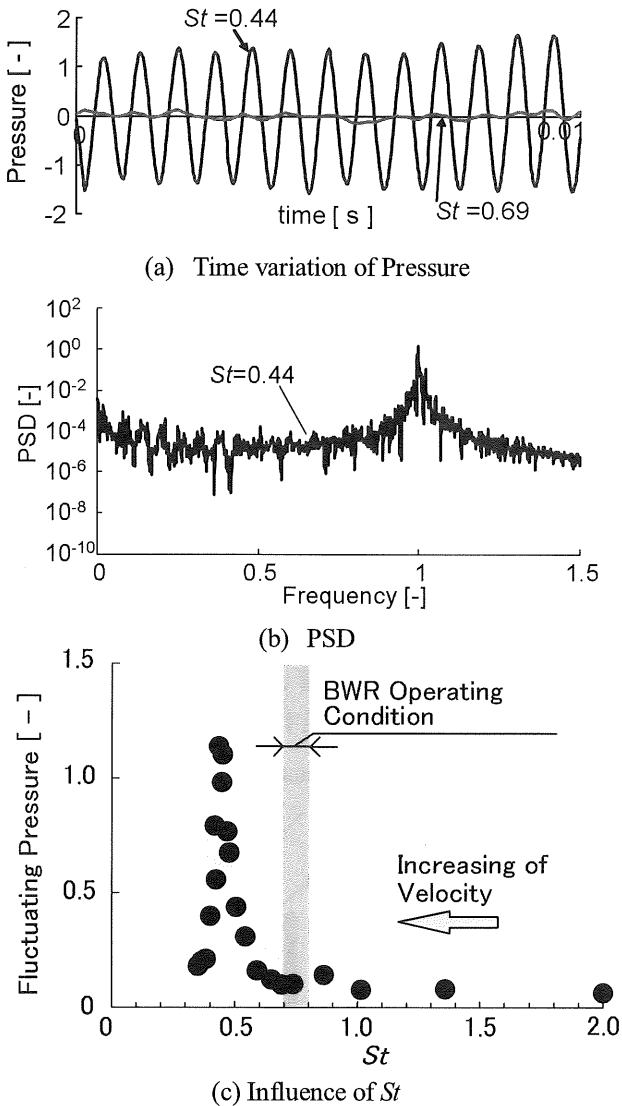


Fig.8 Fluctuating pressure in single SRV stub pipe.

次に、圧力変動の強さに及ぼす  $St$  (MSL 流速) の影響を検討した結果を図 8(c)に示す。縦軸の圧力変動 (標準偏差) は、流れの動圧で無次元化した。図 8(c)に示すように、過度に流速を増加 ( $St$  を低下) すると、急激に圧力変動が大きくなり、その振幅は流れの動圧にまで達することを確認した。すなわち、過度に流速を増加した  $St$  が 0.6 以下の条件では音響共鳴現象が発生し、0.6 以上の  $St$  では明確な共鳴現象は生じなかった。また、国内 BWR を模擬した SRV 管台では、圧力変動のピークは、 $St$  が約 0.4 の条件で発生しており、Selamet や Ziada の閉止分岐管の結果[7][8]と類似している。

#### 4.3 試験による複数 SRV 管台の音源評価

次に、図 4 の MSL のように、SRV 管台が複数設置された場合の音源特性を評価した。図 9 に  $St$  を変化させた場合における SRV 管台先端 (図 2 弁体部に設置) の圧力変動の標準偏差を示す。

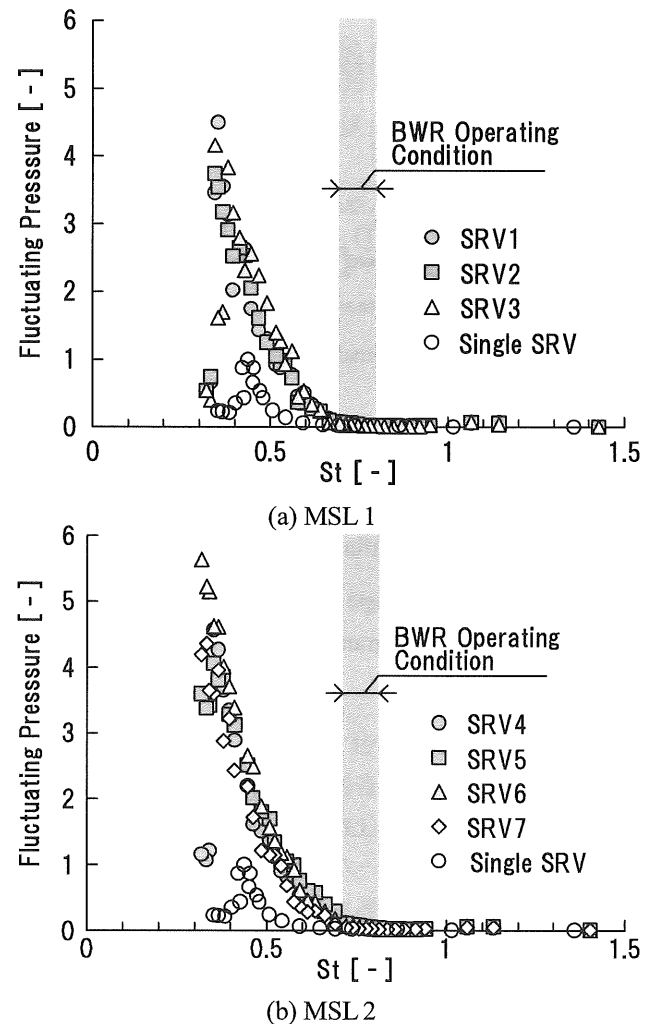


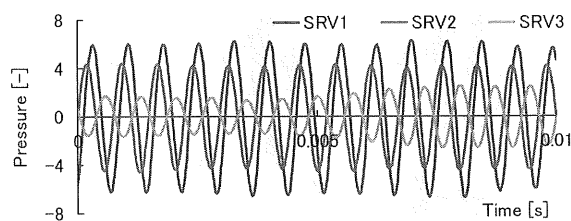
Fig. 9 Characteristics of fluctuating pressure of SRV stubs.

図中の各 SRV 番号 (SRV1~SRV7) に対する測定場所は、図 4 に表示している。なお、単管における値も参考に示しており、縦軸の値は単管における最大値で規格化した。図 9 に示すように、SRV 管台を複数設置した場合でも、 $St$  が 0.6 から 0.7 以下になると、急激に圧力変動が増加し、 $St$  が 0.3 から 0.4 の範囲内でピークとなる。この音響共鳴による圧力変動の急増は、流れが横切る全ての SRV 管台で発生している。また、 $St$  が約 0.3 になると急激に圧力変動が低下しはじめる。また、単管の場合に比較して、共鳴時の圧力変動値が大きくなり、共鳴領域が若干拡大している。これは、SRV 管台の数が增加するほど、SRV 管台同士が相互に強く反射、共鳴し、圧力変動振幅が増加するとともに、SRV 多管の共鳴モードの複数化により、共鳴周波数領域が拡大した可能性がある[4]。また、図 9 中に BWR-5 の実機定格から 115%出力向上条件の領域を赤色で示す。BWR 出力向上時の条件では、SRV 管台を複数設置しても、明確な共鳴現象は生じていない。

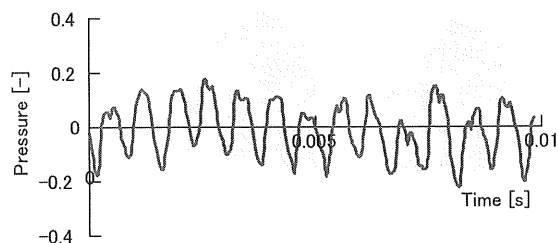
#### 4.4 試験による BWR 主蒸気系の音の伝播評価

次に、SRV 管台で発生した圧力変動が MSL を通じてドライヤまで伝播した結果を示す。図 10 に試験で得られた SRV 管台先端、MSL 及び蒸気乾燥器フードの中心 (SRV 管台先端と MSL の評価点は図 4 参照) における、圧力の時間変動波形を示す。過度に流速を増加した  $St$  が 0.34 における最大圧力変動発生時の結果である。なお、図中の縦軸は動圧で無次元化した。図 10(a) に示す SRV 管台で発生した圧力変動は、振幅を減衰しながら、MSL (図 10(b)参照) を通じて、図 10(c)に示すように、蒸気乾燥器フード表面まで伝播した。これらの場所で測定した圧力変動の周波数は、SRV 管台の共鳴周波数と一致した。このように、主蒸気系の各場所において、同様の周波数の圧力変動を確認でき、SRV 管台で発生した圧力変動が主蒸気系全体に伝播していることを確認した。

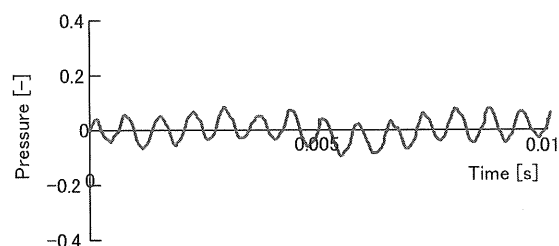
図 11 に共鳴時に SRV 管台で生じた圧力変動のドライヤフードまでの振幅変化を示す。SRV 管台で生じた 100%の圧力変動の振幅 (rms 値) は MSL (MSL の 4 系統の平均) で 5%弱、フード (5 点平均、図中参照) で 2%弱まで低下した。SRV 管台から MSL の減衰は、面積比 (SRV 管台断面積 / MSL 断面積) の約 1/2 (SRV 管台から MSL 上流側と下流側の 2 方向へ伝播するため) に相当する値であった。



(a) Top of evaluated SRV stub pipe



(b) Main steam line



(c) Center of evaluated outer dryer hood

Fig. 10 Fluctuating pressure ( $St=0.34$ ).

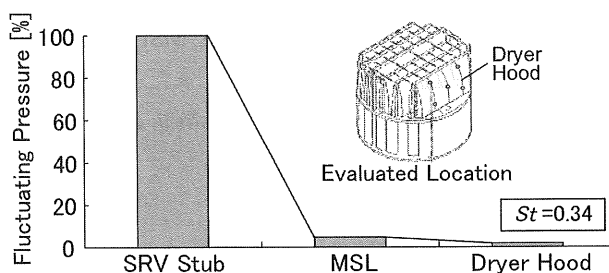


Fig. 11 Variation of intensity of fluctuating pressure.

#### 4.5 BWR 主蒸気系の音の伝播解析

音響解析により、MSL から蒸気乾燥器への圧力変動の伝播を評価した。図 12 に  $St$  が 0.34 (SRV 管台) の共鳴時における蒸気ドームの圧力分布を示す。図 14 に示すように、MSL 内の圧力変動は蒸気ドーム内に伝播し、蒸気乾燥器フード表面に圧力変動として作用した。特に、赤点線で示すノズル近傍の外周側の蒸気乾燥器 (ドライヤフード) において、比較的高い周期的な圧力変動を確認した。

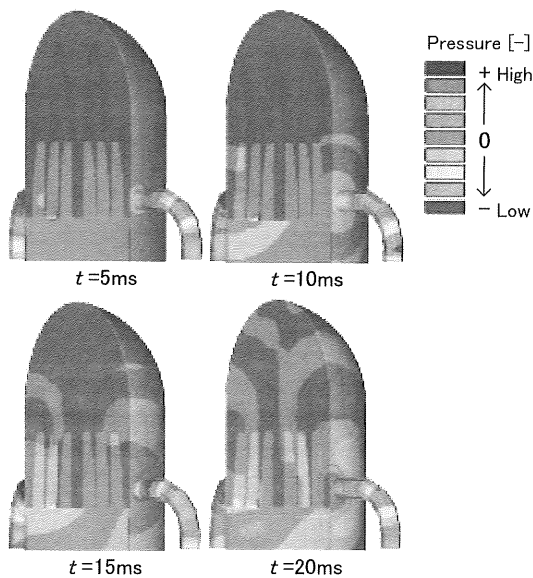


Fig. 12 Pressure distribution on steam dome.

#### 4.6 ドライヤ荷重評価

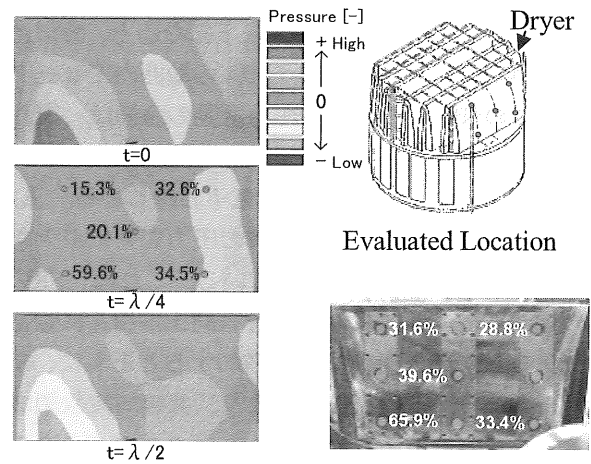
図 13 に音響解析で得られたフード表面の圧力分布を示す。図 13 に示すように、圧力はドライヤ表面において時間変化し、ドライヤに変動荷重として作用した。また、蒸気乾燥器フード表面 5 点 (図 13 右上の緑点) における圧力変動の平均値を試験と解析で比較した結果を示す。試験及び解析結果で確認できるように、左下側のノズル近傍のフード表面において圧力変動が高い。これは、SRV 管台が多数設置された MSL 側 (MSL2) のノズル近傍に位置するためである。また、MSL 内の平均変動圧力を 100% とした場合、解析結果は平均 7.5% の差で試験結果と一致した。

#### 5. 結言

BWR 主蒸気系を模擬した縮小試験及び解析手法により、SRV 管台の流体力学音響共鳴、蒸気乾燥器への圧力変動の伝播、及び荷重を確認し、以下の結論を得た。

- 1) BWR-5 の出力向上条件では、SRV 管台で流体力学音響共鳴は発生しない。一方、0.6 以下の  $St$  (過度に流速を増加した場合) では、SRV 管台において流体力学音響共鳴現象が発生し、流れの動圧以上の強い圧力変動が生じる。
- 2) 単一 SRV に比較して、BWR 主蒸気系の複数 SRV により、圧力変動の振幅は数倍増加する。また、共鳴する  $St$  の領域も僅かに増加する。
- 3) SRV 管台で発生した圧力変動は、振幅を減衰して蒸気乾燥器まで伝播する。

- 4) MSL 内の平均変動圧力を 100% とした場合、音響解析は 7.5% の差で BWR-5 の縮小試験結果と一致する。



(a) Analysis

(b) Tests

Fig. 13 Pressure distributions (analysis results).

#### 参考文献

- [1] G DeBoo, K. Ramsden and R. Gesior, "Quad Cities Unit 2 Main Steam Line Acoustic Source Identification and load Reduction", ICONE14-89903, 2006.
- [2] Ohtsuka, M., et al., "Study on Acoustic Resonance and its Damping of BWR Steam Dome", ICAPP'06-6186, 2006.
- [3] Takahashi, S., et al., "Experimental Study of Acoustic and Flow-Induced Vibrations in BWR Main Steam Lines and Steam Dryers" ASME PVP 2008-61318, 2008.
- [4] Takahashi, S., et al., "Characteristics of Fluctuating Pressure generated in BWR Main Steam Lines" ICAPP'09-9030, 2009.
- [5] Morita, R., et al., "Numerical Simulations of Pressure Fluctuations at Branch Piping in BWR Main Steam Line" ICAPP'09-9372, 2009. D. S. Weaver and G. O. MacLeod, "Entrance Port Rounding Effects on Acoustic Resonance in Safety Relief Valves", ASME, PVP, Vol. 389, 1999, pp. 291-297.
- [6] 田村明紀、他 3 名、"格子ボルツマン法による BWR 主蒸気系の流体励起音響共鳴現象評価"、機械学会関西支部第 84 期総会予稿集、2009、pp.1111.
- [7] S. Ziada, "A Flow Visualization Study of Flow-Acoustic Coupling at the Mouth of a Resonant Side-Branch", ASME PVP Vol. 258, 1993, pp35-59.
- [8] B. D. Knotts and A. Selamet, "Suppression of Flow-Acoustic Coupling in Sidebranch Ducts by Interface Modification", J. Acoust. Soc. Vol. 265, No. 5, 2003, pp1025-104.