

状態監視振動診断技術者コミュニティ
第2回ミーティング
～ 機械状態監視診断技術者の技術交流と
技術力向上のためのフォローアップ ～

特別講演 「流体連成振動のトラブル事例とその診断／対策の紹介」

2011年2月10日

(財)電力中央研究所
原子力技術研究所 発電基盤技術領域
稲田文夫



ご説明内容

1. トラブルにおける「振動」の重要性
 - 現象毎の破損モード／破損頻度から
2. 運転中プラントの流体連成振動による事例
3. 運転モードの変更による流体連成振動事例
 - 出力向上時の分岐部音響共鳴によるドライヤ疲労破損



振動事象の重要性①

様々な要因による配管の損傷および破断頻度

Failure Mechanism	Failures $n_j\{F\}$	Ruptures $n_j\{R\}$	Failure Frequency [per reactor year] $\lambda_j\{F\}$	Conditional Rupture Probability $P_j\{R F\}$	Rupture Frequency [per reactor year] $\lambda_j\{R\}$	
			Point Estimate	Point Estimate	Point Estimate	Bayes Update Mean Value
CF	14	0	6.8×10^{-3}	<0.071*	$<4.8 \times 10^{-4}$ *	3.8×10^{-5}
TF	38	0	1.8×10^{-2}	<0.026*	$<4.8 \times 10^{-4}$ *	3.8×10^{-5}
SC	166	0	8.0×10^{-2}	<0.0060*	$<4.8 \times 10^{-4}$ *	3.8×10^{-5}
E-C	15	0	7.3×10^{-3}	<0.067*	$<4.8 \times 10^{-4}$ *	3.8×10^{-5}
COR	72	3	3.5×10^{-2}	0.042	1.5×10^{-3}	1.2×10^{-3}
WH	35	15	1.7×10^{-2}	0.43	7.3×10^{-3}	6.8×10^{-3}
E/C	280	19	1.4×10^{-1}	0.068	9.2×10^{-3}	8.7×10^{-3}
VF	364	25	1.8×10^{-1}	0.069	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-2}
OTH	43	8	2.1×10^{-2}	0.19	3.9×10^{-3}	3.5×10^{-3}
D&C	192	13	9.3×10^{-2}	0.068	6.3×10^{-3}	5.9×10^{-3}
UNK	177	11	8.6×10^{-2}	0.062	5.3×10^{-3}	4.9×10^{-3}
TOTALS	1396	95	6.8×10^{-1}	0.068	4.6×10^{-2}	4.5×10^{-2}

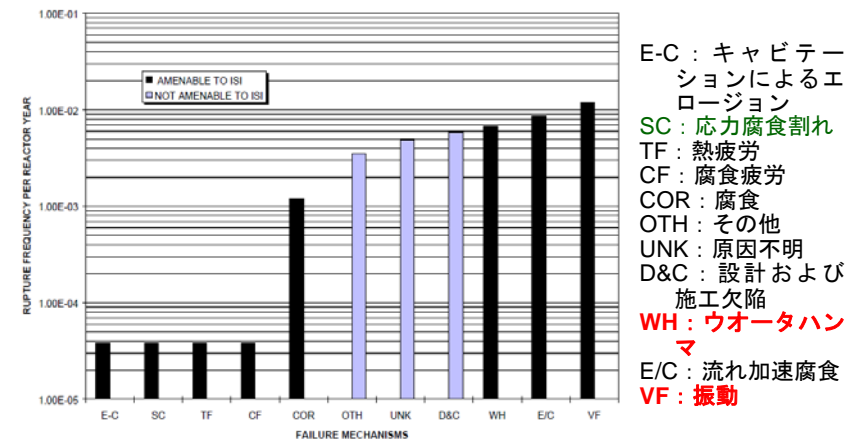
* Point estimate is zero based on no occurrences of ruptures, upper bound estimated assuming 1 rupture for each failure mechanism.



Gossline et al., ASME/JSME ICONE5 (1997) No.2641

振動事象の重要性②

各損傷機構別の破断に至る確率
(炉年あたりの件数)



E-C : キャビテーションによるエロージョン
SC : 応力腐食割れ
TF : 熱疲労
CF : 腐食疲労
COR : 腐食
OTH : その他
UNK : 原因不明
D&C : 設計および施工欠陥
WH : ウォータハンマ
E/C : 流れ加速腐食
VF : 振動



Gossline et al. ASME/JSME ICONE5 (1997) No.2641

流体振動による多くの事象

プラント運転者の立場

• 通常運転時

- ポンプやバルブ等の下流に生じる圧力波により励起される配管振動
- 比較的大口径な母管ではなく、母管に計装等のために取り付けられた小口径管で発生
- 事象の約1/3は、配管が破断

• 運転条件変更時

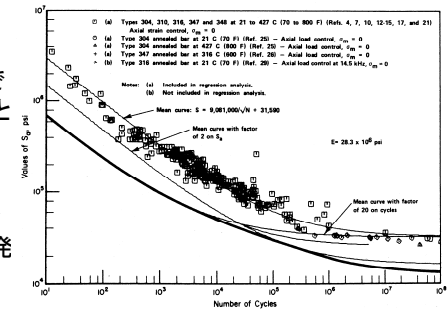
- 設計対応

過渡時の振動評価の重要性

- 応力の繰返し数
 $> 10^7$ 回

疲労強度は応力の繰返し数に依存しなくなる

- プラントの運転1年: 定格運転で 5×10^8 回の繰返し応力 (20Hzとして)
- 振動事象の発生条件
 - 通常運転時の事象はプラント運転後に初期故障として発生
 - 改良工事後すぐに発生する
 - 起動時, 定期点検時などの短い運転時間の振動の積み重ね



ステンレス鋼の設計疲労曲線

Jaske, C. E., et al. Trans ASME J. Press. Vess. Tech (1977) 584

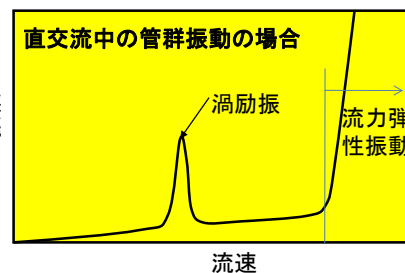
流速を下げたときに発生する現象

• 流速をあげると大きくなる振動

- 乱流励振
- 自励振動/流力弾性振動
(美浜2の蒸気発生器細管破断)

• ある流速で振動が大きくなる現象 (部分負荷で大)

- 渦励振
(もんじゅの温度計破損)
- 音響共鳴
- ポンプ下流の振動



起動・停止時等の部分負荷時の重要性

• 定格運転---設計時に配慮

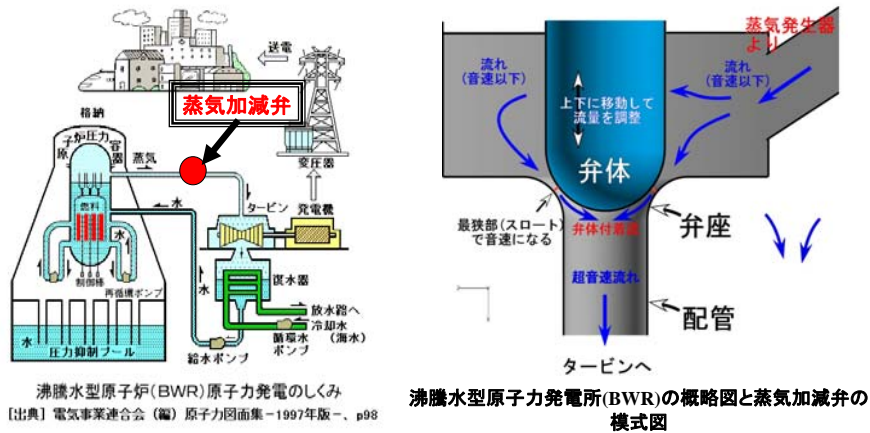
新規プラント以外では、発生しているものはもう出ている

• 起動・停止等の部分負荷---一般的に配慮不足

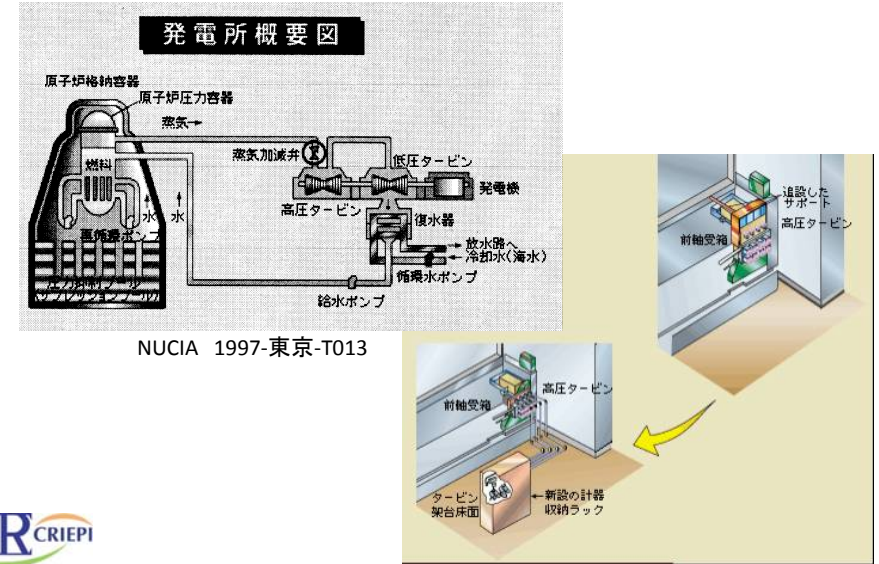
経年炉でも出る可能性

• 事象が発生すると破断まで至りやすい

蒸気加減弁による振動事例 発電所の起動・停止時での蒸気系の弁の振動事象 /振動事象の主なトラブル源の一つ

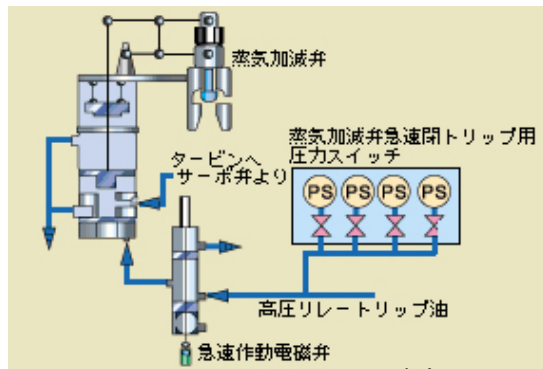


主蒸気弁後流の振動事例



中間開度時の主蒸気加減弁に起因した 機器の誤作動事象

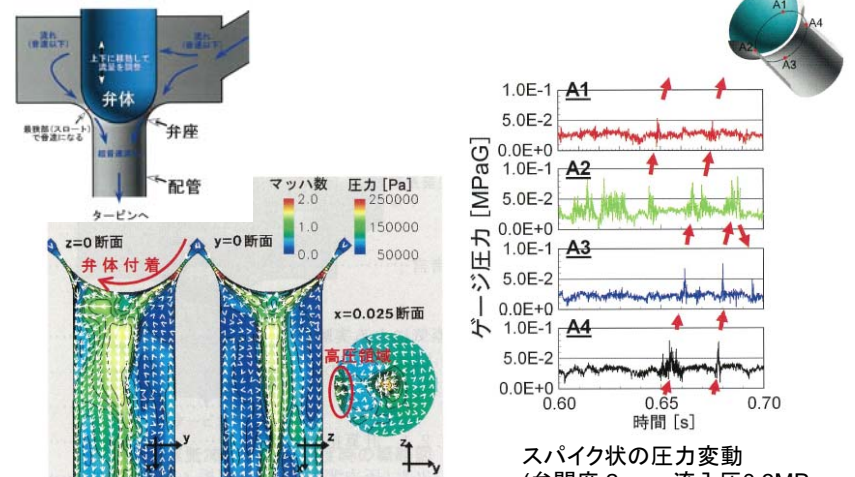
- 発電所において圧力スイッチが誤動作し、原子炉発電所がスクラム、あるいはハーフスクラムした。国内外で類似事象が発生している。



NUCIA 1997-東京-T013



中間開度時の主蒸気加減弁内流れ



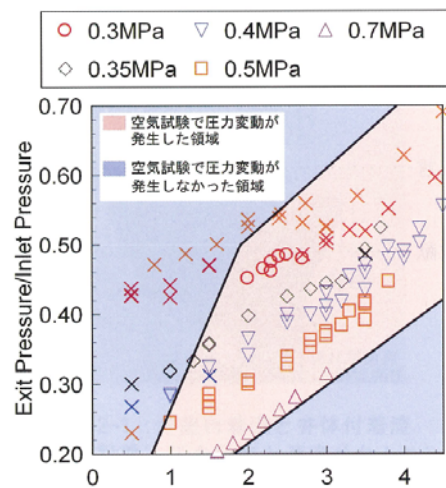
マッハ数と速度ベクトル分布(左, 中), 静圧と速度ベクトル分布(右), (弁開度:2.0mm, 流入圧・0.4MPa, 流出圧:0.14MPa)



スパイク状の圧力変動 (弁開度:2mm, 流入圧:0.3MPa, 流出圧:0.135MPa)
森田ら 電中研報告 L05015(2006)

蒸気試験における中間閘度の圧力変動の発生領域、及び空気試験との比較結果

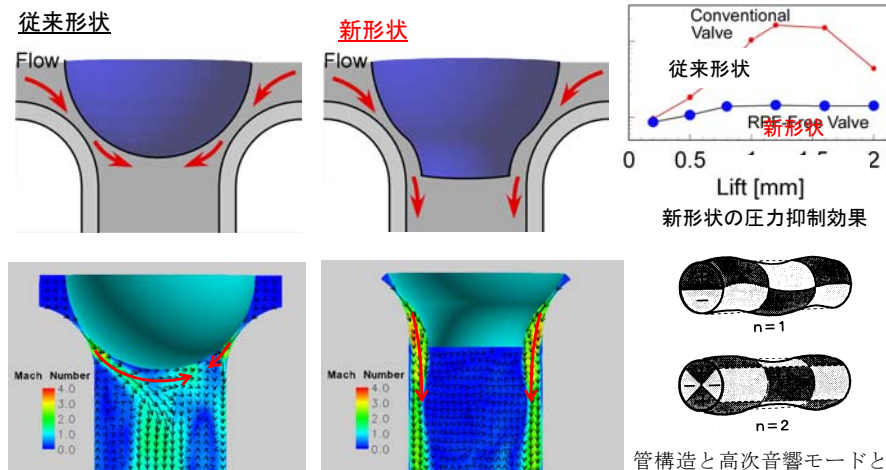
x 変動なし(蒸気試験), その他記号・変動発生(蒸気試験)



森田ら 電中研報告 L05015(2006)

電中研で開発したCFDコードMATISの適用例

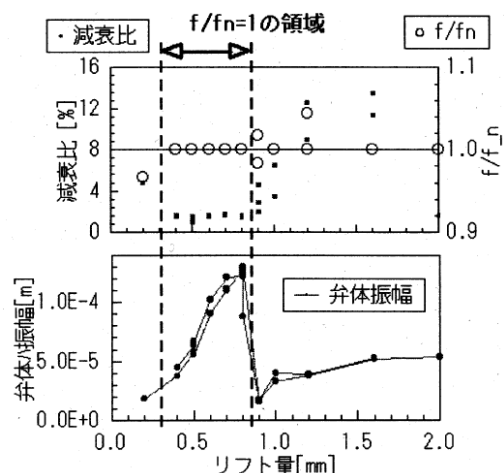
-蒸気加減弁の振動抑制研究-



従来形状(右)と新形状(左)の概略図とMATISコードによる数値計算結果の可視化図
森田ら 電中研報告 L06009(2007)

自励振動による振動の発生

- 従来形状では、弁体の剛性が低い場合に大振幅振動が発生しうる
- その振動は、減衰比の低下により発生し、自励振動であることを解明



15 森田ら 電中研報告 L06009(2007)

ポンプ後流の配管系のN,Nz振動

ポンプの圧力脈動源
=羽根通過周波数
(羽根枚数 × ポンプ回転数)
その高調波成分
下流側に伝播
母配管系の圧力脈動の固有振動数や、母配管下流側に取り付けられた計装のための小口径配管構造の固有振動数に一致すると、振動が大きくなる

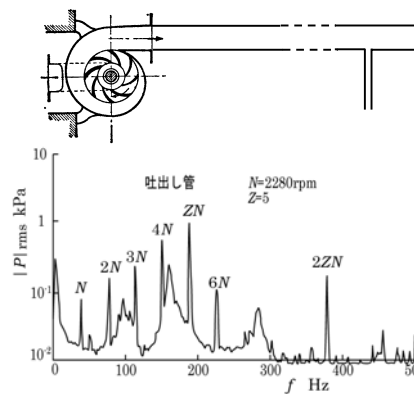


図5. 2-3 ポンプの脈動の振動数スペクトルの例⁽⁶⁾



部分負荷でも共振の可能性あり

ASMEの評価式

許容振動速度 V_{allow} (m/sec)

$$V_{allow} = \frac{C_1 C_4}{C_3 C_5} \frac{1.342 \times 10^{-8} S_{el}}{\alpha C_2 K_2}$$

C_1 : 集中質量係数

C_3 : 付加質量係数

C_4 : 端部が固定端と異なるもの、スパンが直線状でないものに対する補正係数

$C_2 * K_2$: 応力拡大係数

C_5 : 振動のランダム特性に関するピークファクタ

S_{el} : 許容応力



SWRIのチャートとASME-OM3規格 ～小口径管振動のスクリーニング法～

- ASME-OM3基準 :

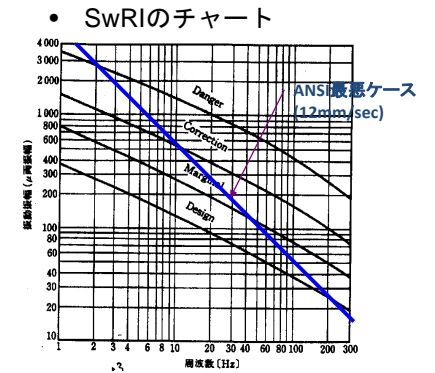
– 許容振動速度のRMS値

$$V_{adm} = \frac{C_1 C_4}{C_0 C_3} \frac{\alpha}{C_2 K_2} [0.8] \sigma_{adm}$$

($C_2 * K_2$: 応力拡大係数,

σ_{adm} : 許容応力)

許容応力になる振動速度を様々なケースについて解析し、保守側に線を引いて求めたもの

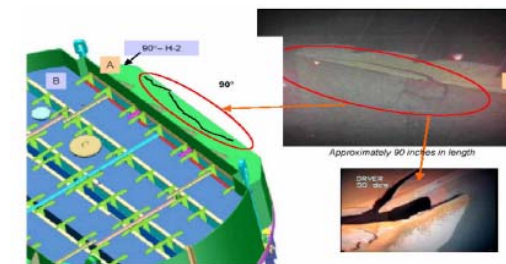


定期検査での亀裂点検による対策の問題点

- 亀裂が入ると、既に寿命の大半を経過しているので、それから貫通まで至る時間が短いことがある
- 毎回の定検時に検査して亀裂がなくても、次回定検までにリークが生じる可能性がある(毎定検時に検査の必要がある)
- SCCのように進展速度が非常に遅い現象とは同列には扱えない



米国で原子カプラントの出力向上時に発生した音響共鳴による炉内構造物の疲労破損



Structural Integrity Associates, Inc.
BWR Workshop - Kennel Square, PA

©-Heron12

- 米国EXCELON社のQuad Cities1号機および2号機
- 定格出力を820MWeから912MWeへ17.8%上昇させるEPU (Extended Power Uprate)を実施
- 主蒸気系配管内の音響源に対する蒸気乾燥器で疲労による割れ
- 同時に電動リリーフバルブ(ERV)アクチュエータでフレットング摩耗、支持部材の損傷が発生
- なお、本プラントはEPU前は、20年間問題なく運転されてきた。



原子炉出力向上 ～米国の状況～

- 約100基の原子炉を運転中
- 2010年5月までに129件の出力向上を実施(100万kWクラス原子炉5基分 5726MWe)
- 現在申請中のものを含めると、100万kWクラス12.5基分
 - 給水流量計測定精度改善型(MU型): 約2%
 - ストレッチ型(S型): プラント改造を伴わず安全解析等の再評価
5～7%
 - 設備拡張型(E型): 高圧タービン、復水ポンプやモータ、主発電機、変圧器などの改造による約20%までの出力向上



出力向上 ～日本の状況～

- 日本原子力発電 東海第二原子力発電所 (BWR5)で、日本初の原子炉出力向上を実施予定
 - 出力上昇量は5%
 - 現状では2013年春の予定



出力向上

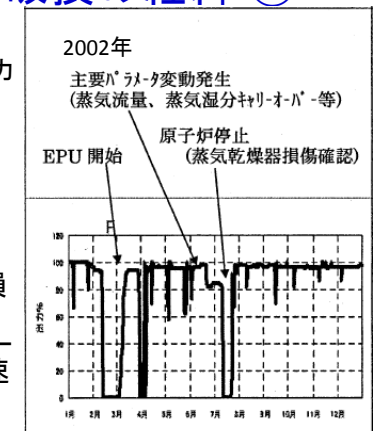
- 評価項目
 - 安全評価に関わる項目
 - 設置許可申請書で審査される安全評価項目(安全設計のやり直し)
 - 統計的安全評価法の導入は有効
 - 設備への影響に関わる項目
 - 運転条件の変更に伴って、劣化の加速に対する対応やトラブル対策が必要となる項目
 - 例: 照射脆化、IASCC、配管減肉、振動疲労 etc

運転条件が変わると、設備への影響は変わる。トラブルをなるべく起こさないためには事前検討が必要。



米国プラントでのドライヤ破損の経緯-①

- プラント: Quad Cities Unit 2 (BWR3)
 - Unit 1やDresdenなど、同型炉でも出力向上時に同様事象発生
- 2002/3 117%のEPU実施
- 約3ヶ月後にプロセス値に異常(主蒸気流量、炉圧力、水位、湿分など)
- 約4ヶ月後にプラント停止、ドライヤに破損発見
- ドライヤは安全機器ではないが、破損によりルーズパーツが発生した。
- 対策として破損した部分(カバープレート)の肉厚を1/4"→1/2"にし、比較的速やかに再稼働



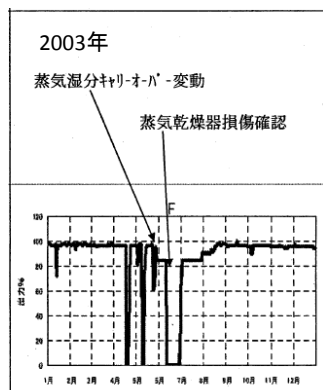
出典: JANUS-LIS

注意事項
JANUS-LIS サービスに基づくものは、以下の注意事項を遵守ください。
① 本報告書の記事の一部を現状のまま、もしくは改変してLISメンバー以外に開示する場合には、有償で行うことを禁止致します。
② LISメンバー以外(匿名行及び公的な組織は除く)に本報告書の記事の一部を開示する場合には、「この内容はJANUS-LIS サービスに基づくものであることを明示し、この注意事項を添付して下さい。」
③ LISメンバー以外には、JANUSの事前の書面による許可無くして、本報告書の記事の複製等を行うことを禁止致します。



米国プラントでのドライヤ破損の経緯-②

- 再稼働後、約1年運転後に、再度プロセスデータ(湿分)に異常。
- 損傷部板厚を1/2"から1"に厚くし、補強して比較的速やかに再稼働



出典：JANUS-LIS

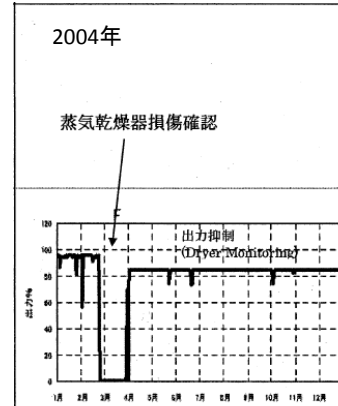
注意事項
 JANUS-LIS サービスに基づくものは、以下の注意事項を守ってください。
 ① 本報告書の記事の一部を現状のまま、もしくは改変してLIS メンバー以外に開示する場合には、有償で行うことを禁止致します。
 ② LIS メンバー以外(官公庁及び公的な組織を除く)に本報告書の記事の一部を開示する場合には、「この内容はJANUS-LIS サービスに基づくものである」とを明示し、この注意事項を添付して下さい。
 ③ LIS メンバー以外は、JANUSの事前の書面による許可無くして、本報告書の記事の複製等を行うことを禁止致します。

Copyright 2007 JANUS



米国プラントでのドライヤ破損の経緯-③

- 再稼働後8ヶ月で補強部に損傷
- その後しばらく元の定格出力で運転



出典：JANUS-LIS

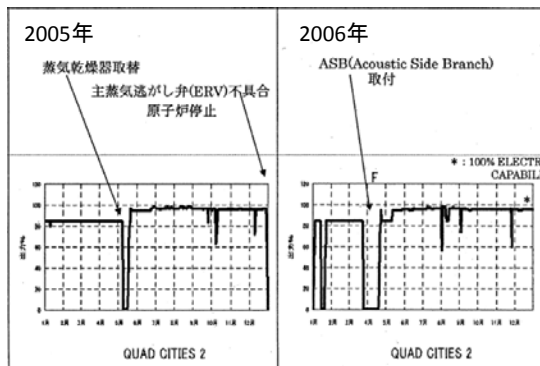
注意事項
 JANUS-LIS サービスに基づくものは、以下の注意事項を守ってください。
 ① 本報告書の記事の一部を現状のまま、もしくは改変してLIS メンバー以外に開示する場合には、有償で行うことを禁止致します。
 ② LIS メンバー以外(官公庁及び公的な組織を除く)に本報告書の記事の一部を開示する場合には、「この内容はJANUS-LIS サービスに基づくものである」とを明示し、この注意事項を添付して下さい。
 ③ LIS メンバー以外は、JANUSの事前の書面による許可無くして、本報告書の記事の複製等を行うことを禁止致します。

Copyright 2007 JANUS



米国プラントでのドライヤ破損の経緯-④

- 約1年後に改良型蒸気乾燥器に交換。
 - 出力向上条件で運転
 - 約半年後に、電動逃がし弁が損傷し、動作不良となった。
 - 再度元の出力条件で運転
 - 約4ヶ月後にASBを設置し、出力向上運転再開
- 結果として約4年間対応に要した



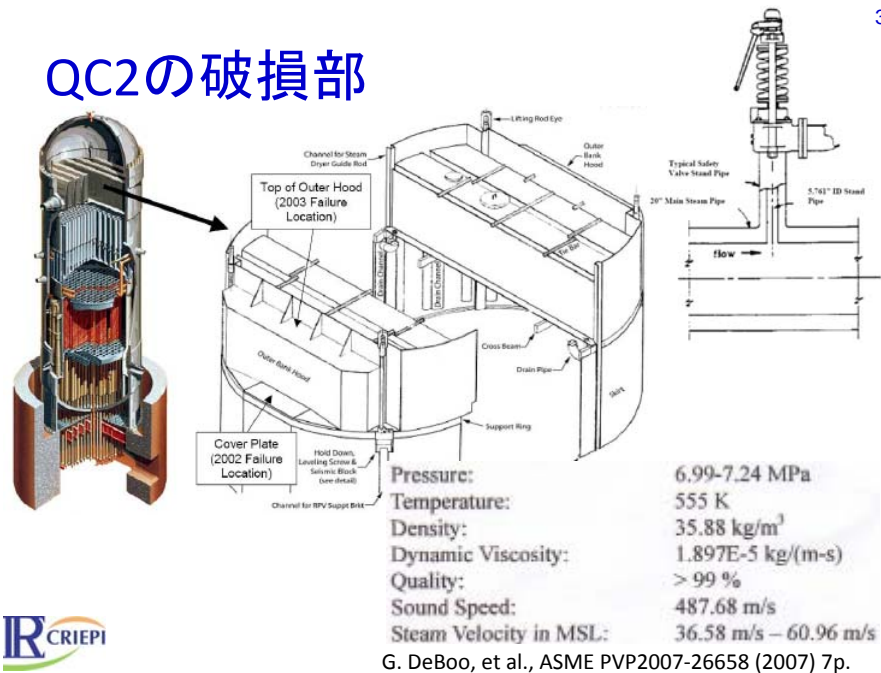
出典：JANUS-LIS

注意事項
 JANUS-LIS サービスに基づくものは、以下の注意事項を守ってください。
 ① 本報告書の記事の一部を現状のまま、もしくは改変してLIS メンバー以外に開示する場合には、有償で行うことを禁止致します。
 ② LIS メンバー以外(官公庁及び公的な組織を除く)に本報告書の記事の一部を開示する場合には、「この内容はJANUS-LIS サービスに基づくものである」とを明示し、この注意事項を添付して下さい。
 ③ LIS メンバー以外は、JANUSの事前の書面による許可無くして、本報告書の記事の複製等を行うことを禁止致します。

Copyright 2007 JANUS

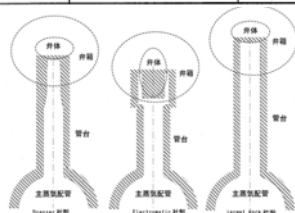


QC2の破損部



QC2の主蒸気流速と音響共鳴発生流速 (出力向上前後)

原子炉 熱出力レベル	主蒸気流速 (m/s) (A)	弁	音響共鳴開始流速の 計算結果 V_{res} (m/s) (B)	流速比 (A) / (B)
定格	51.2	Dresser 社製	39.8	1.3
		Electromatic 社製	35.2	1.5
		Target Rock 社製	29.5	1.7
1.178×定格	61.6	Dresser 社製	39.8	1.5
		Electromatic 社製	35.2	1.8
		Target Rock 社製	29.5	2.1



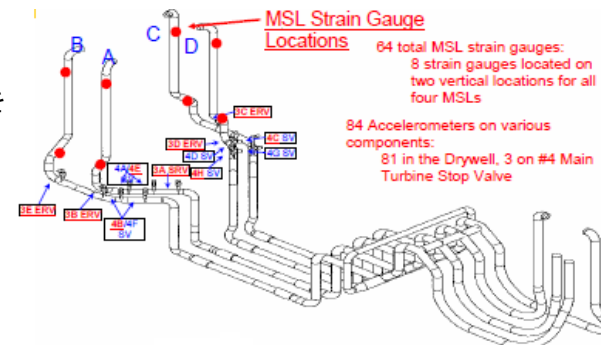
日本原子力学会「原子炉出力向上の安全性に関する技術検討評価報告書」(2007)



解析・データ分析-(1)

- 蒸気乾燥器上での圧力センサおよびひずみゲージによる測定
 - 本センサ類は、最終的な対策である音響サイドブランチ(ASB)設置前に撤去

●ERVとMSSVの加速度測定、主蒸気管にひずみゲージをはりつけることによるbreathing modeの圧力変動の測定



G. DeBoo, et al., ASME PVP2007-26658 (2007) 7p.



改良型ドライヤへの圧力センサの 取り付け状況



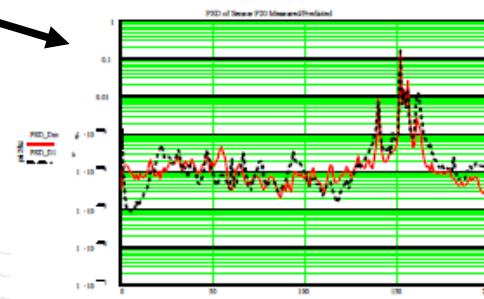
Hambric S. et al., 9th NRC/ASME Symp. On Valves, pumps, and Inservice Testing (2006)



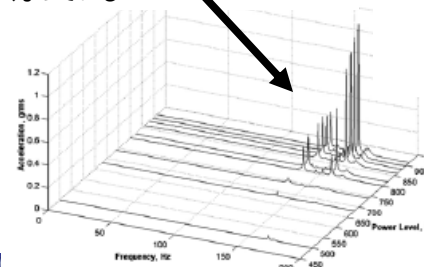
解析・データ分析-(2)

140Hzおよび150~160Hzにピーク

140Hzのピーク: 820MWe(EPU前)から912MWe(EPU後)にかけて、ピークの上昇はそれほど大きくない
150~160Hzのピークはかなり大きくなっている



C-MSラインズル向かいの蒸気乾燥器表面における圧力変動のPSD(実線は測定、破線は解析)



3B ERV入口フランジのY方向加速度のPSD

G. DeBoo, et al., ASME PVP2007-26658 (2007) 7p.



音響共鳴発生時の音圧

- 圧力のスペクトル密度の最大値

168dB

- 160dB 鼓膜がやぶれる
- 165dB 窓ガラスが割れる
- 170dB 建物が壊れる

Hamblic S. et al., 9th NRC/ASME
Symp. On Valves, pumps, and
Inservice Testing (2006)



解析・データ分析-(3)

- これらの測定結果は、ERVおよびMSSV分岐管部の音響共鳴(キャビティトーン)現象の発生条件

$$V_0 = f_1(d+r)/S_0$$

と対応
ここで

V_0 : 音響共鳴の発生流速

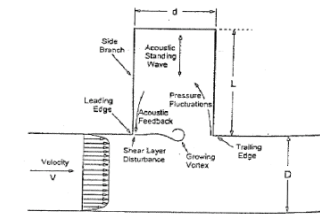
f_1 : 分岐管の1次モードである1/4波長の固有周波数

d : 分岐管内径

r : 分岐管の角の丸み

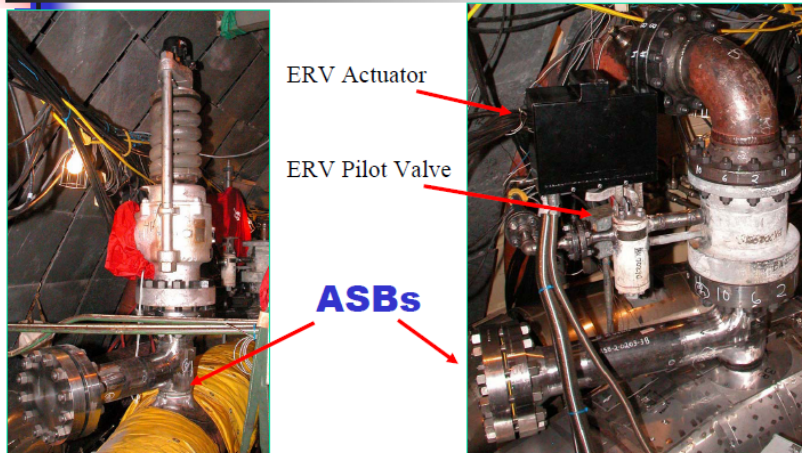
S_0 : ストロハル数 = 約0.55

- 本結果よりERVが139Hzの音響源で、MSSVが150~160Hzの音響源であることが判明した。



G. DeBoo, et al., ASME PVP2007-26658 (2007) 7p.

Installed ASBs



Main Steam Safety Valve

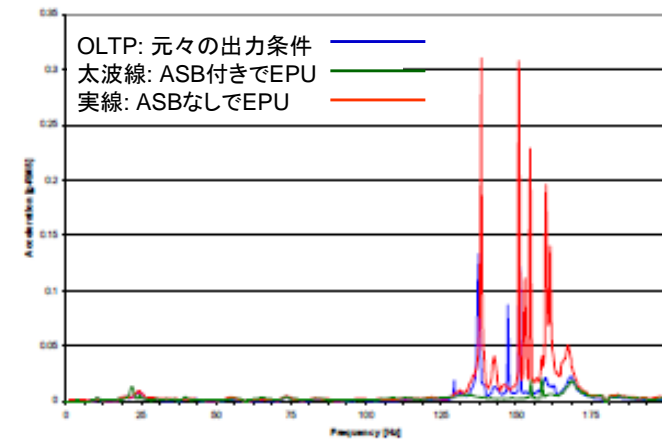
Brian R. Strub
Exelon Nuclear - Quad Cities Nuclear Power Station
Page 31

Electromatic Relief Valve

Nuclear Plant Fatigue Applications Workshop
February 19 - 21, 2007
Centennial, CO



対策・結果



ERV 3Eのy方向加速度のスペクトル

G. DeBoo, et al., ASME PVP2007-26658 (2007) 7p.



分岐管部音響共鳴現象の数値解析における要件

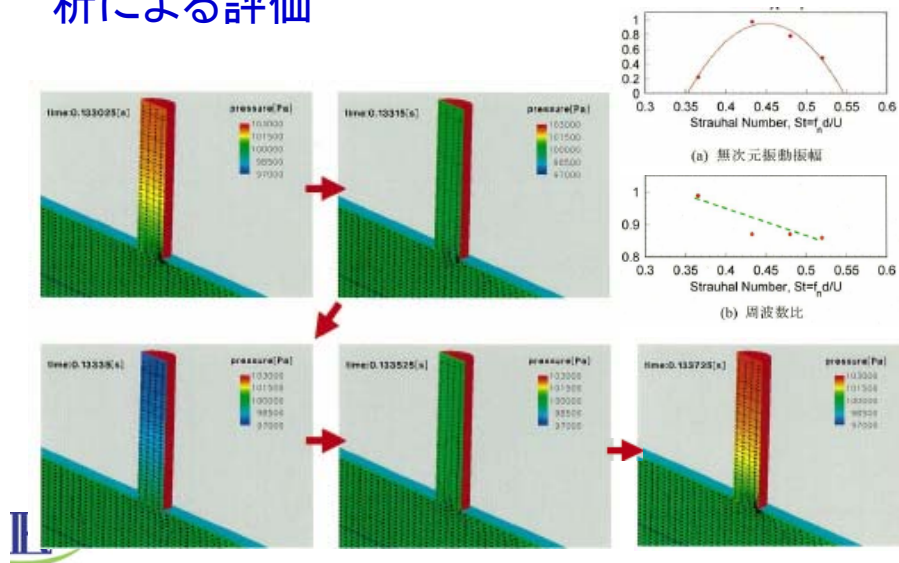
- 現状では、圧力脈動が発生していないことを確認するために、実機計測が行われる。
- 解析で予測することができればメリットあり。
- 高精度の解析を行わないと、現象そのものが再現しない。

電中研のMATIS-SCコードの諸元

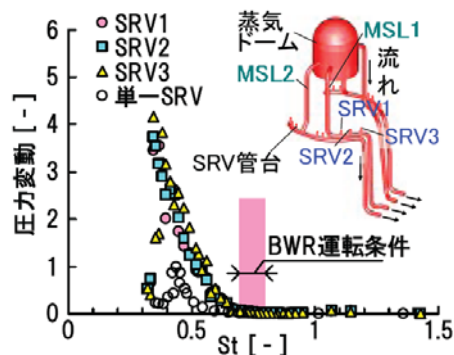
	3D-FDM Based LES
Fluid	Compressible Flow
Government Equations	/Mass Conservation /Momentum Conservation /Energy Conservation
State Quantity Calculation	/Equation of State (Air) /Look-up Table constructed by IAPWS-IF 97 (Steam)
Discretization	/Convective Term: 5 th Order Upwind /Viscous Term: 4 th order Central
Time Marching	2 nd Order Backward Diff. with Newton Iteration /Implicit Method : LU-SGS ⁽¹⁷⁾
Turbulence Model	Modified Smagorinsky ⁽¹⁸⁾

森田他, 日本原子力学会秋の大会 要旨集(2009)

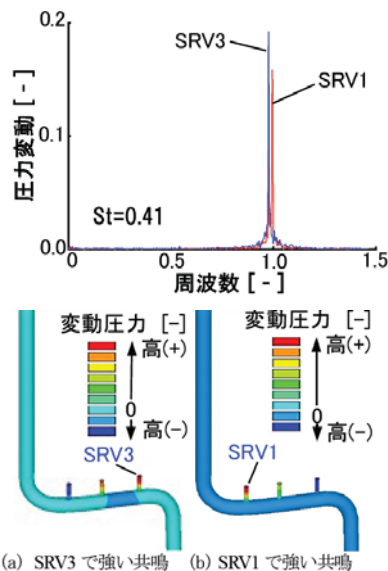
分岐部キャビティートンの数値流体解析による評価



電中研-日立共同研究での代表プラントの1/10モックアップ試験

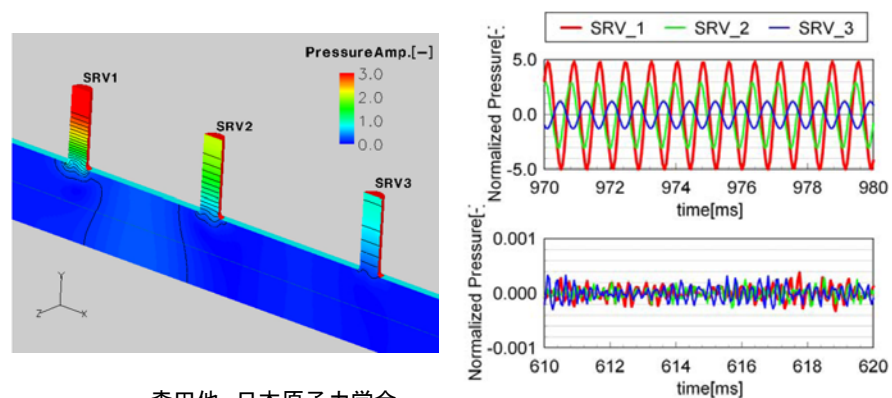


分岐管が複数の場合には、単管の固有振動数とわずかに異なる振動数の固有値が現れる。



高橋他, 日本原子力学会秋の大会要旨集(2009)

複数分岐管の場合のCFD解析



森田他, 日本原子力学会秋の大会 要旨集(2009)

IR CRIEPI

分岐管音響共鳴まとめ

現象

- 分岐部の剪断層の不安定による共鳴
- 火力や化学プラントなど、原子力以外では多数の事例あり

出力向上に対する影響

- 米国BWR3(古いタイプ)で出力向上時に発生。BWR3は主蒸気管流速が速い。日本で大部分のBWR5(新しい)では主蒸気管流速が遅く、発生しにくいと予想できる。

現象を解析評価する上で、新たにわかったこと

- CFDでの解析は、LESで精度の高い計算をしないと現象が再現しない
- 予測上、分岐管が複数ある場合の連成、上流側エルボ等による偏流の影響などは、発生限界流速に影響する

現象を止める方法

- サイドブランチをつけて共鳴周波数を変える方法が実用化している。



全体まとめ

- 振動は配管破断につながる重要な現象である
- 定格運転時の振動は、1年ぐらいで初期故障としてほぼ出尽くす場合が多い
- 現象によっては、定格運転でなく部分負荷など流速が最大でなくでも発生し、破断／損傷につながることもある。この場合、何年もたってから損傷する場合がある。
- 小口径管は、口径によらずこれぐらい揺れると破損リスクが高まるというスクリーニングに使える振動数-振幅チャートがある(ASMEやSWRI)
- 音響共鳴は、精度よく予測しようとする場合には複数管の連成や上流側の偏流影響などに配慮の必要がある。
- 音響共鳴はCFDで再現できるが、精度の高い解析が必要である。

