

論 点

炉システムの革新技術の 課題と対応策



- (1) 2ループ化の成立性根拠
- (2) 配管・蒸気発生器伝熱管の二重化
- (3) ポンプ組込IHXの開発
- (4) Na冷却炉の炉型選定の考え方

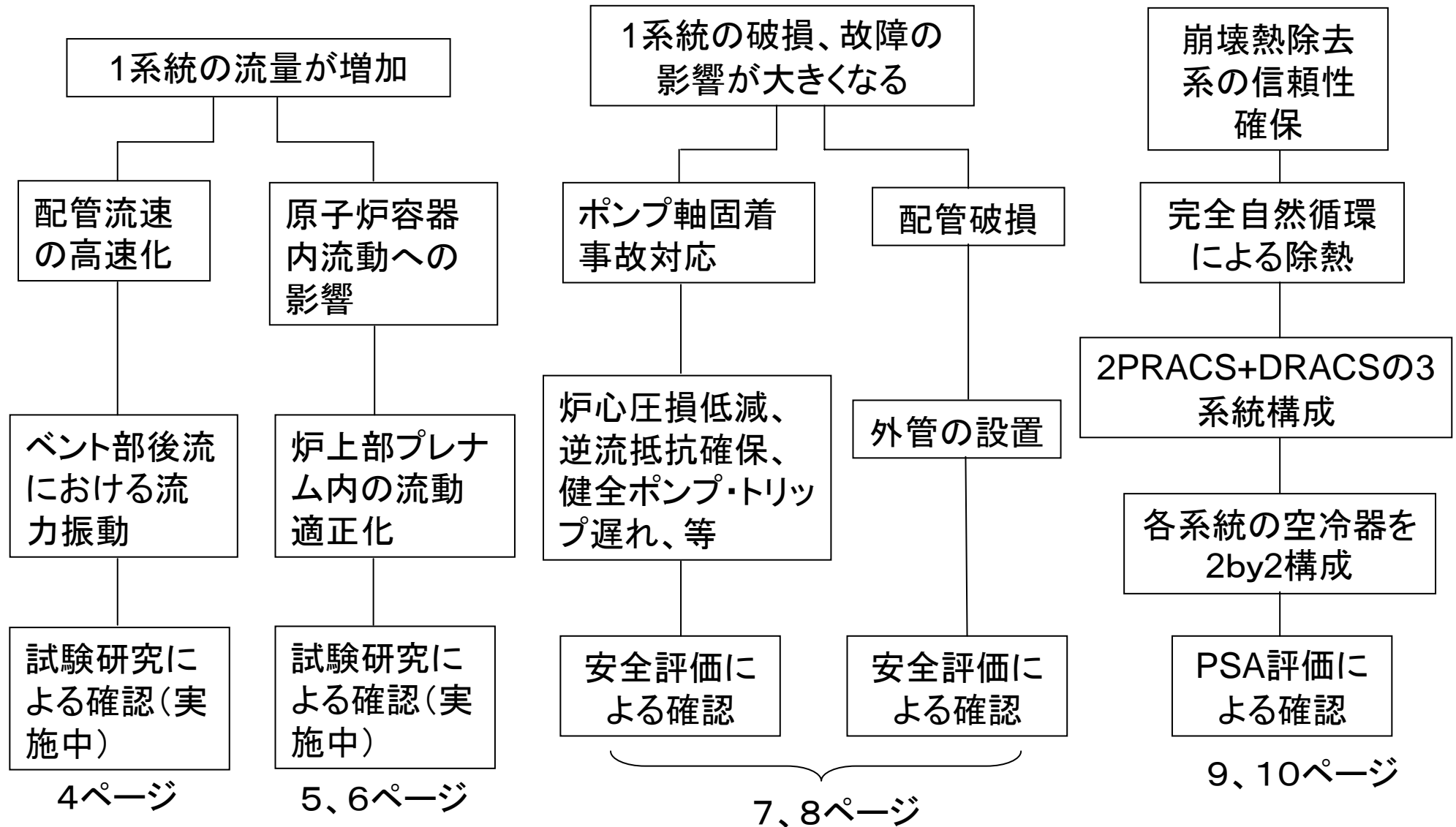
独) 日本原子力研究開発機構



(1) 2ループ化の成立性根拠



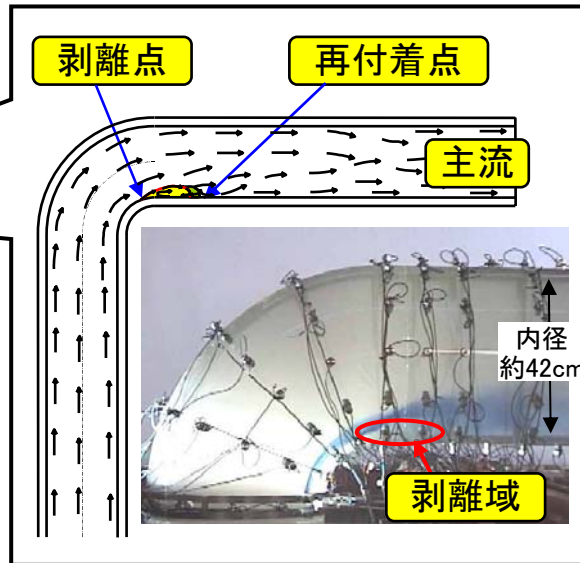
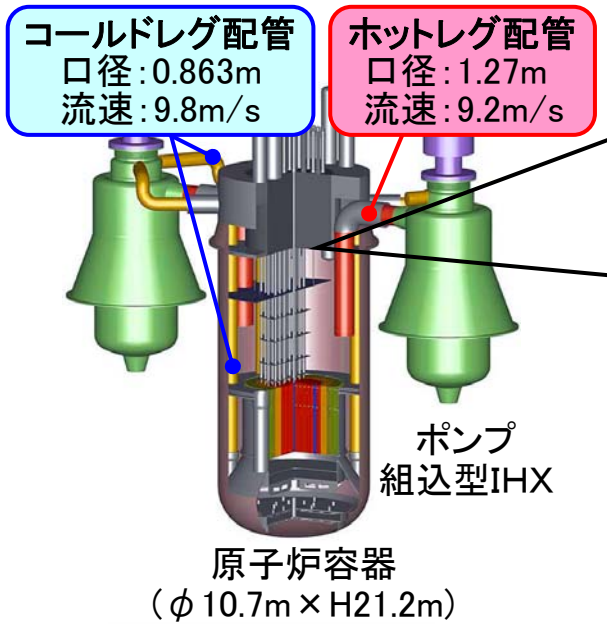
2ループ化に伴う課題



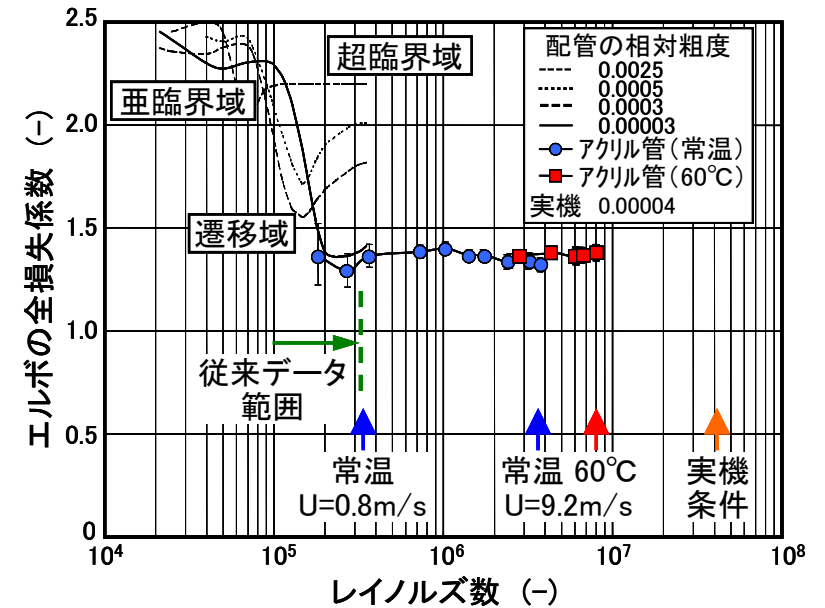
高流速・大口徑配管内流動

課題: 冷却系ループ数の削減に伴い大口徑配管を採用 ⇒ Na流速増加による流動励起振動

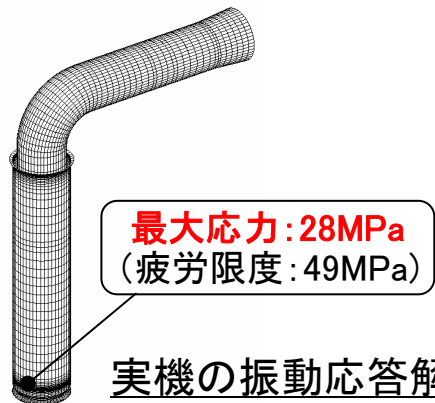
目的: エルボを含む配管系の流動・振動特性の把握 (実機ホットレグ配管の1/3縮尺水試験)



実機流速 (9.2m/s) での流動状況



圧損係数のレイノルズ(Re)数依存性



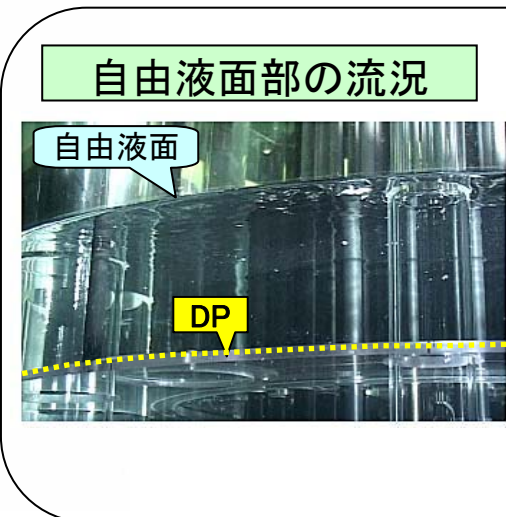
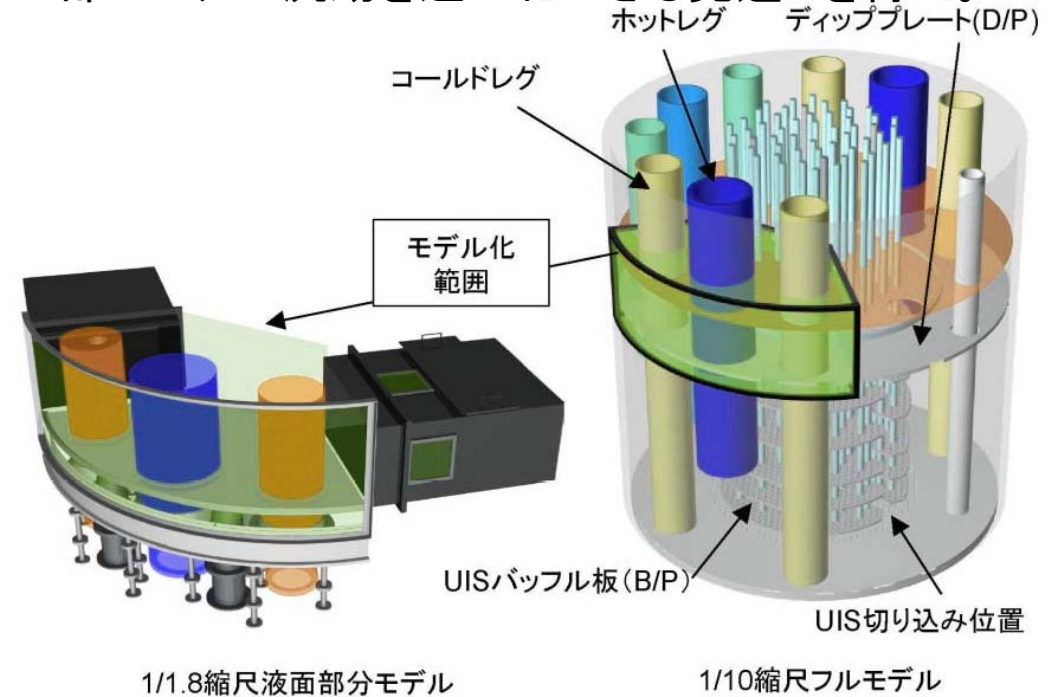
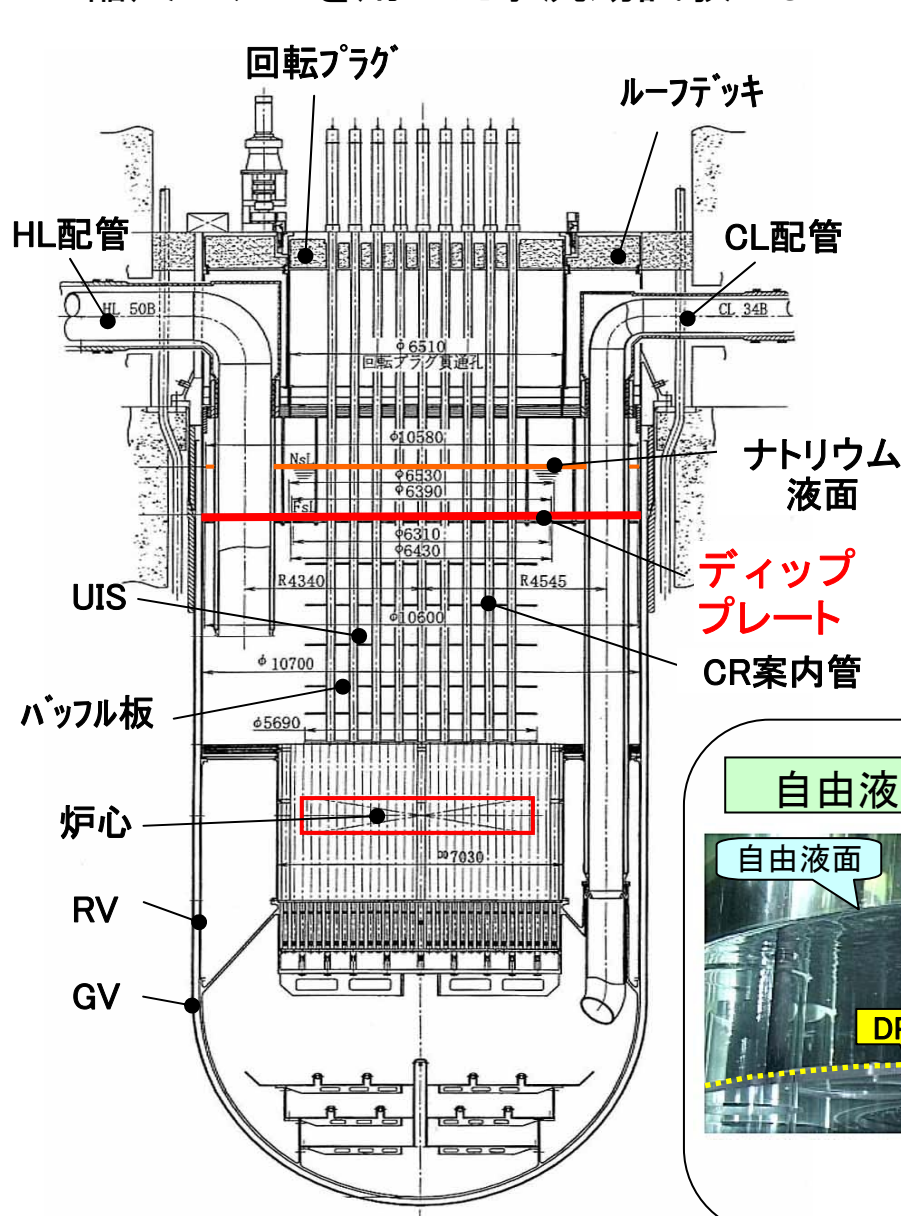
- エルボ圧損係数は、高Re数条件においてもほぼ一定。
⇒ 剥離域の大きさ等、流況はRe数に依存しないことを確認。
- 振動の要因となる管壁での圧力変動特性は、管内流速に依存。
- 実機配管で発生する最大応力は、配管材の設計疲労限度以下。

→ 詳細は11~19ページの添付「大口徑配管の流動試験」を参照



原子炉容器上部プレナム流動適正化(ガス巻き込み防止)

縮尺モデルを用いた水流動試験によって、炉上部プレナム流動を適正化できる見通しを得た。



成果

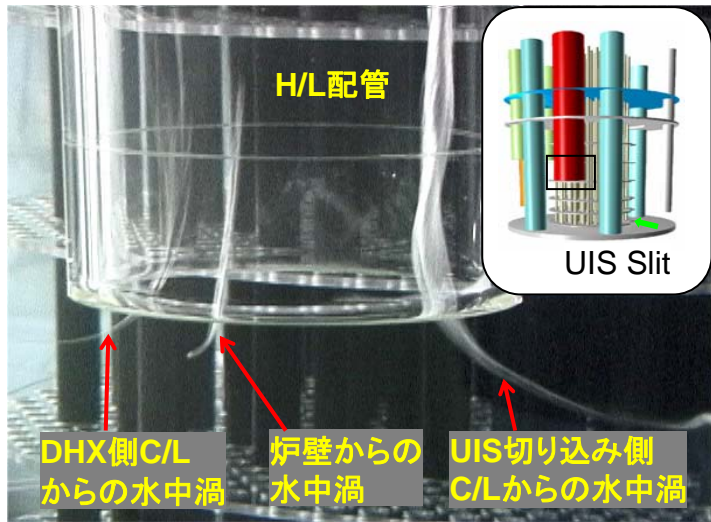
- ・ 2重ディッププレートにより液面からのガス巻き込みが防止できる
- ・ 実機条件(流速、液位)はガス巻き込み発生に対して十分な余裕がある

課題

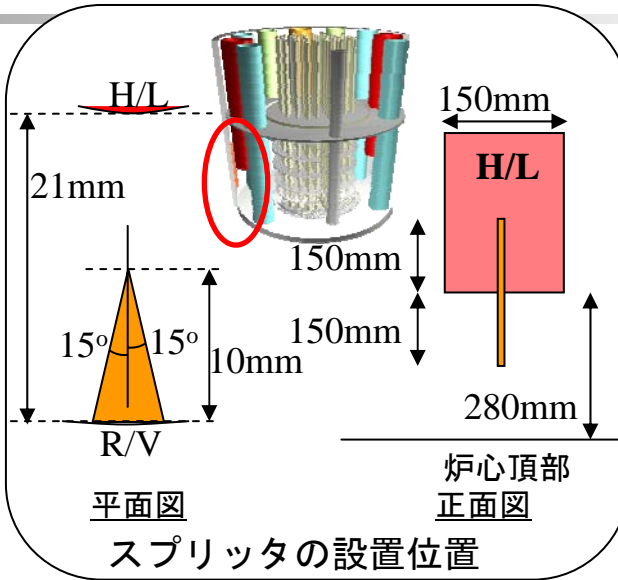
- ・ 熱過渡緩和等との整合を考慮した最適化



原子炉容器上部プレナム流動適正化(キャビテーション防止)

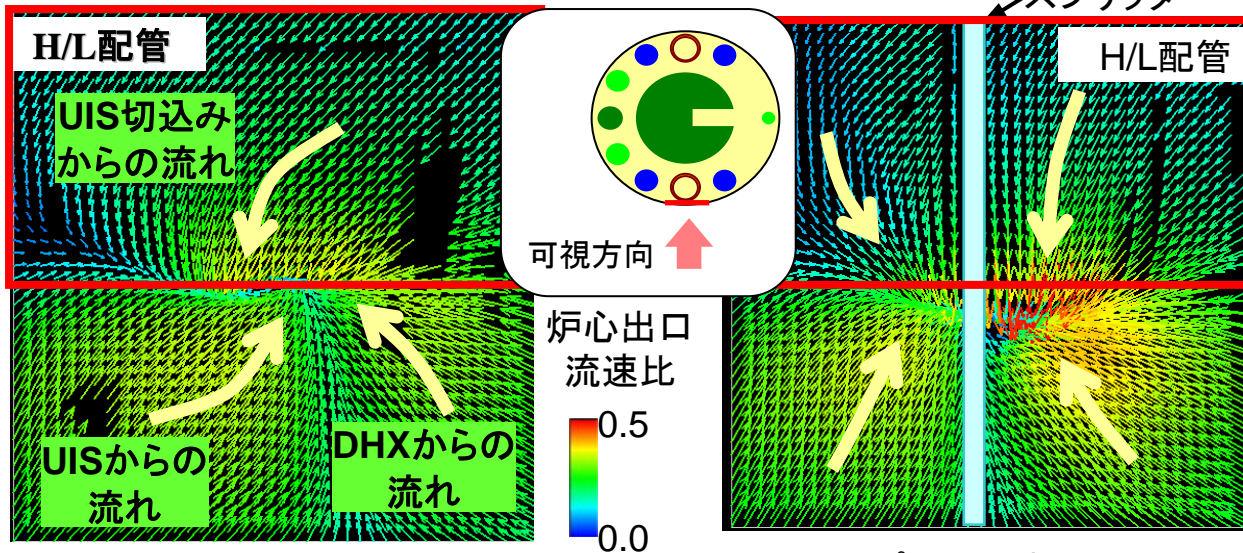


水中渦の発生状況



成果

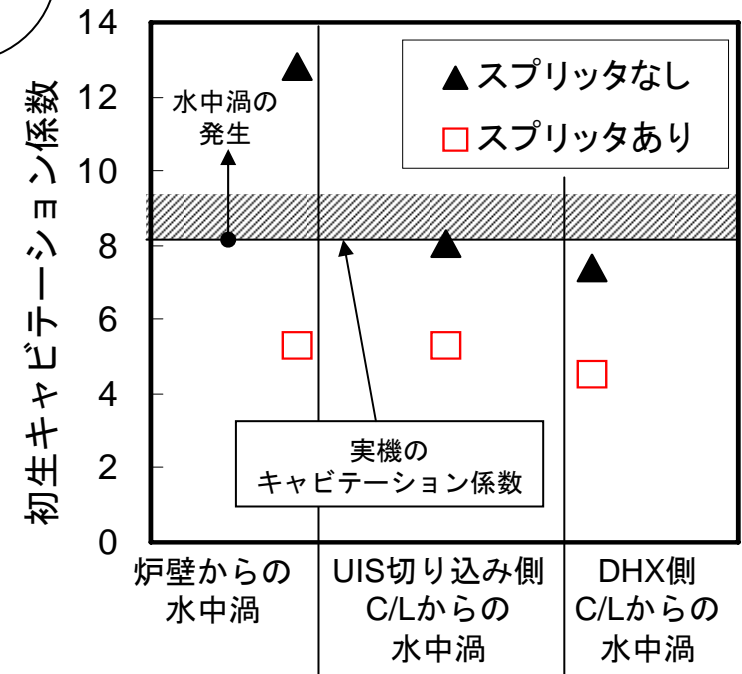
- 液中渦発生防止対策(フロースプリッタ等)を具体化し設計に反映



スプリッタなし

スプリッタあり

スプリッタの有無による流速ベクトルの比較



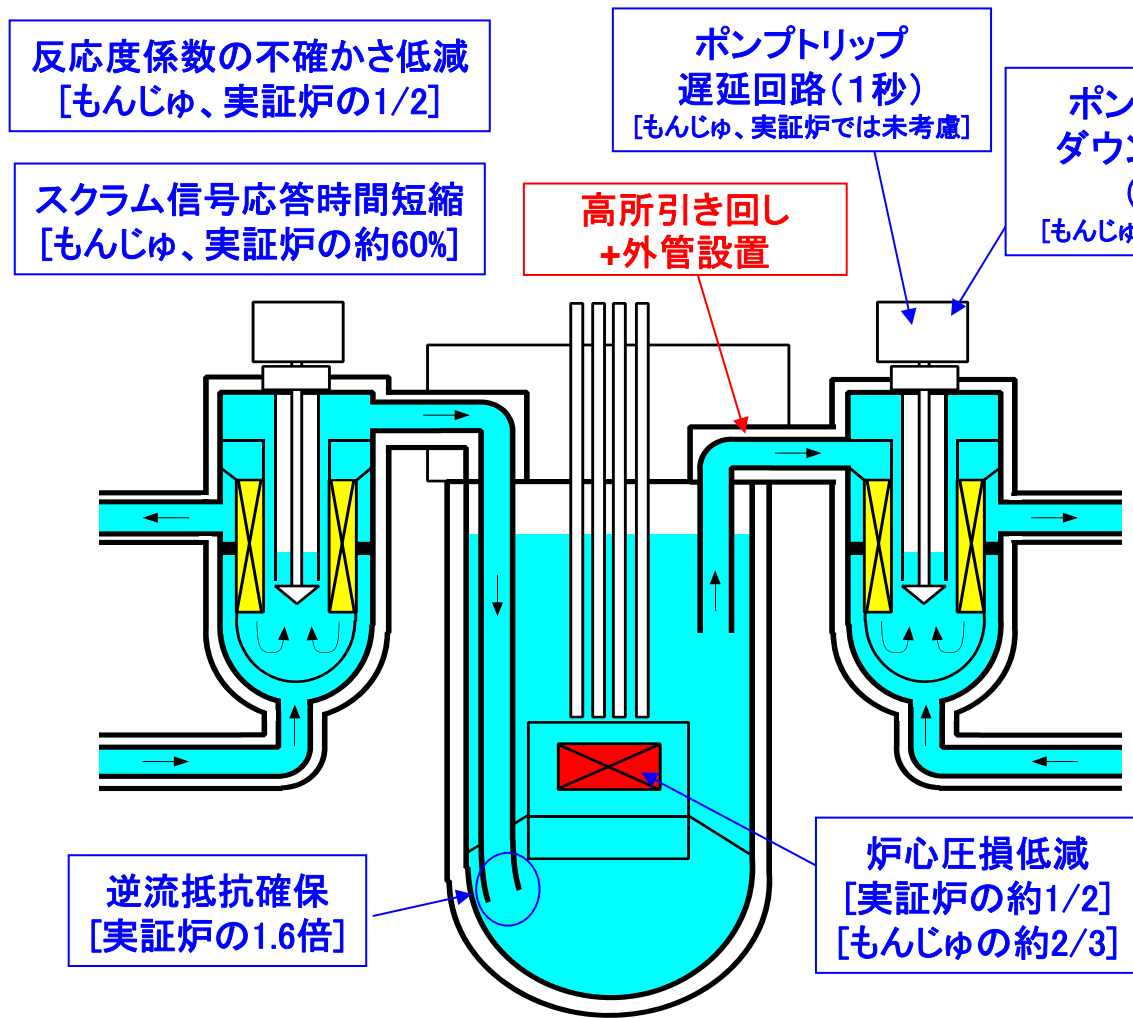
流動最適化による水中渦の抑制効果



冷却系2ループ化に適合するための安全設計(短期の炉心冷却)

1次ポンプ軸固着対策: ポンプコーストダウン時間の確保、ポンプトリップ遅延回路、炉心圧力損失低減、故障ループの逆流抵抗確保等により判断基準を満足する見通し

1次系配管破損対策: 高所引き回し+外管設置によって、炉心冷却に必要な液位を確保する。漏洩量は外管の体積によって制限されるため、炉心冷却への影響は抑制され判断基準を満足する見通し



解析結果(被覆管最高温度)

	1次ポンプ 軸固着	1次系 配管破損
もんじゅ	約800°C	約740°C
実証炉	約830°C	約720°C
実用炉	約850°C	実証炉と同程度 と推定

判断基準
 ・もんじゅ: 830°C
 ・実証炉、実用炉: 900°C



冷却系2ループ化に適合するための安全設計(短期の炉心冷却)

項目	設定値	設定根拠	開発課題
反応度係数の不確かさ低減	もんじゅ、実証炉の1/2	1) 臨界実験データ等の拡張(ZPPR、BFS、もんじゅなど) 2) 核計算手法の高度化(3次元輸送解法、セル非均質モデル、超微細群解析など) 3) 核データの高精度化(基本ライブラリJENDLの改良、共分散データの整備、炉定数調整法の採用)	1) 高速炉実機データ(特に、照射後試験データ)の反映 2) MA核データの充実 3) 拡張容易性・信頼性・開発効率に優れた次世代炉物理解析システムの開発
スクラム信号応答時間短縮	もんじゅ、実証炉の約60%	デジタル信号処理の高度化、高速化などを取り入れることにより達成可能	特になし
ポンプトリップ遅延回路	1秒 (もんじゅ、実証炉では未考慮)	1秒の遅延タイマーをポンプトリップ回路に設置するのみであり、既存技術で対応可能	熱過渡影響の定量評価
ポンプコーストダウン時間確保	もんじゅ、実証炉と同等	もんじゅ、実証炉の実績あり	特になし
逆流抵抗確保	実証炉の1.6倍 (正逆比はもんじゅと同等)	もんじゅR/V入口ノズルの水流動試験結果	水流動試験による確認
炉心圧損低減	実証炉の約1/2 もんじゅの約2/3	設計条件として設定 燃料ピンピッチの調整により対応	水流動試験による確認
配管破損対策	高所引き直し +外管設置 (実証炉と同様)	実証炉の設計概念の発展 水流動試験等を踏まえた成立見通し	微小漏洩検出器の開発 高クローム鋼管のLBB成立性 漏洩に対する外管健全性評価



冷却系2ループ化に適合するための安全設計(崩壊熱除去)

1. 完全自然循環システムの採用

- 動的機器の単一故障の影響小
- 非常用電源への依存性なし
- 静的機器の故障は発生頻度小

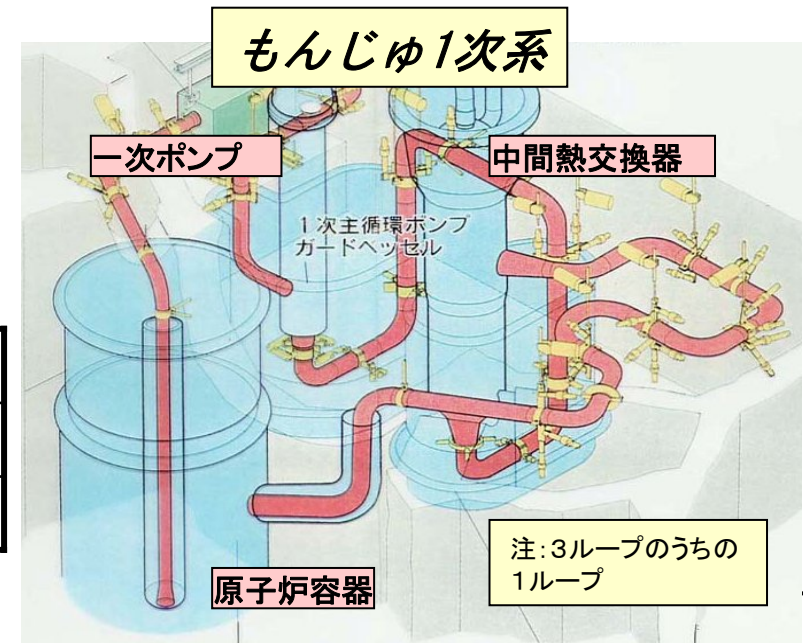
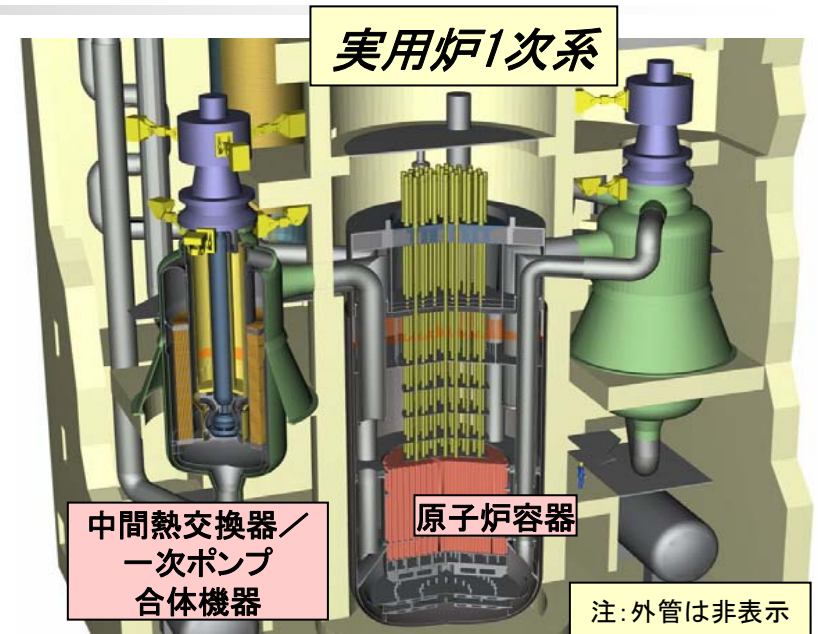


1系統あたりの信頼性の向上

配管引廻しの簡素化により、自然循環への適合性を向上

もんじゅと実用炉の1次系の比較

	もんじゅ(280MWe)	実用炉(1500MWe)
配管長(m)	110	40
エルボ数	23	4

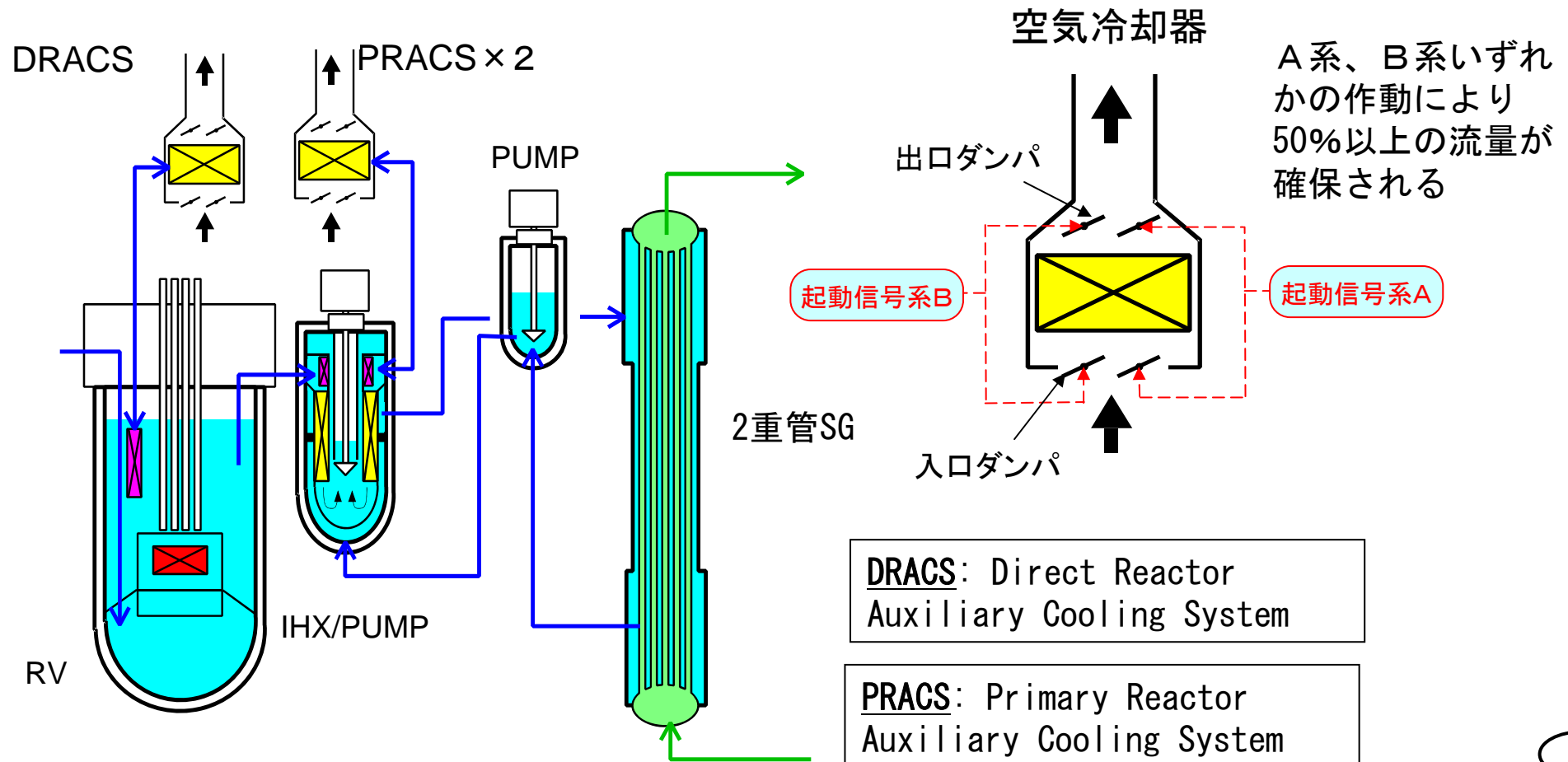




冷却系2ループ化に適合するための安全設計(崩壊熱除去)

2. 系統構成

- PRACS × 2 系統 + DRACS × 1 系統により冗長性を確保
- 空気冷却器ダンパを2重化
- 安全保護系を 2 out of 4 構成化
- 以上の設計により、崩壊熱除去機能喪失確率は 10^{-7} /炉年程度に低減可能な見通し



添付



大口徑配管の流動試験

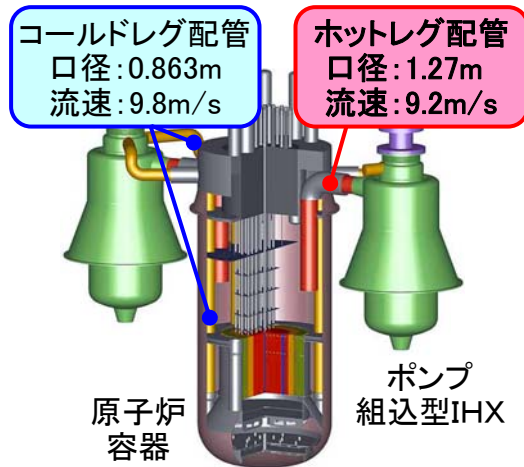


試験の概要

課題: ループ数削減に伴い薄肉構造の大口径配管を採用 ⇒ **流速増加による流力振動**



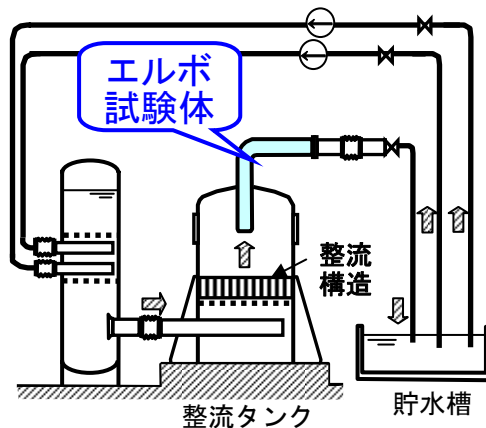
最も口径の大きいホットレグ配管を1/3縮尺で模擬した水流動試験(試験体2種類)により、エルボを含む配管系の流動・振動特性を把握



1)可視化試験体(アクリル管:内径41cm、板厚50mm)

○目的

- ・高流速条件(最大9.2m/s)におけるエルボ部での剥離現象を含む流況の観察、管内流動特性の把握
- ・励振源となる圧力変動特性データの取得



1/3縮尺試験装置の概要



2)振動試験体(SUS管:内径41cm、板厚5mm)

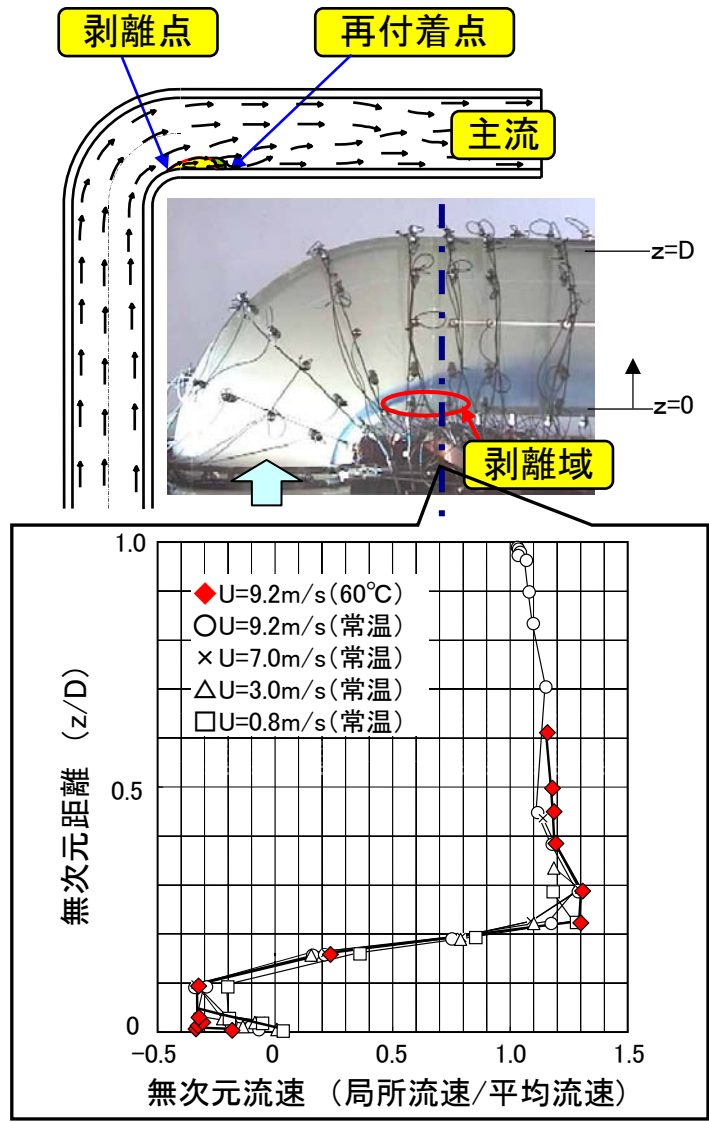
○目的

- ・設計で用いる振動応答評価手法の妥当性を確認するため、実機での配管剛性や支持条件を概略模擬した試験体での振動特性データの取得



可視化試験の結果

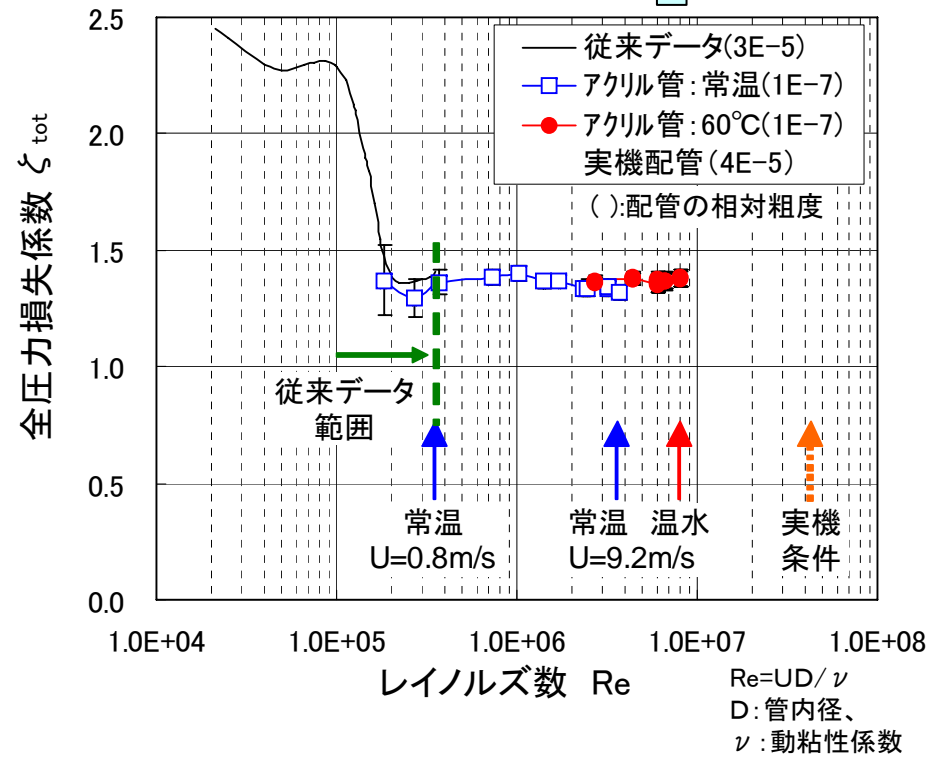
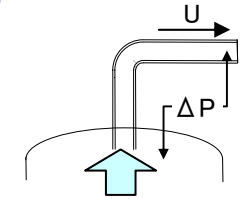
管内の流動特性には、レイノルズ数依存性なし



流況可視化結果と剥離域での軸方向流速分布

$$\zeta_{tot} = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

ΔP : 差圧+動圧
 ρ : 流体密度
 U : 平均流速



圧力損失係数のレイノルズ数依存性

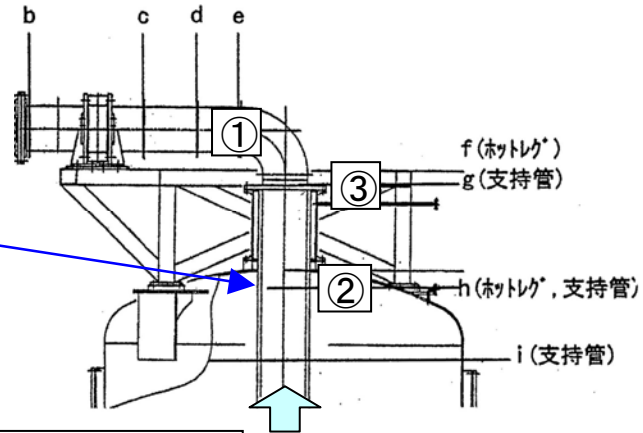
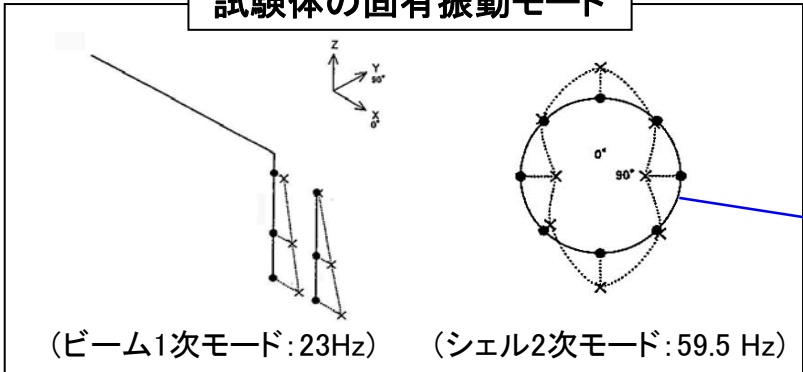
- 今回の試験範囲 (Re数=3 × 10⁵ ~ 8 × 10⁶) では、配管内の無次元流速分布は一致
- 圧力損失係数も、Re数10⁶以上ではほぼ一定



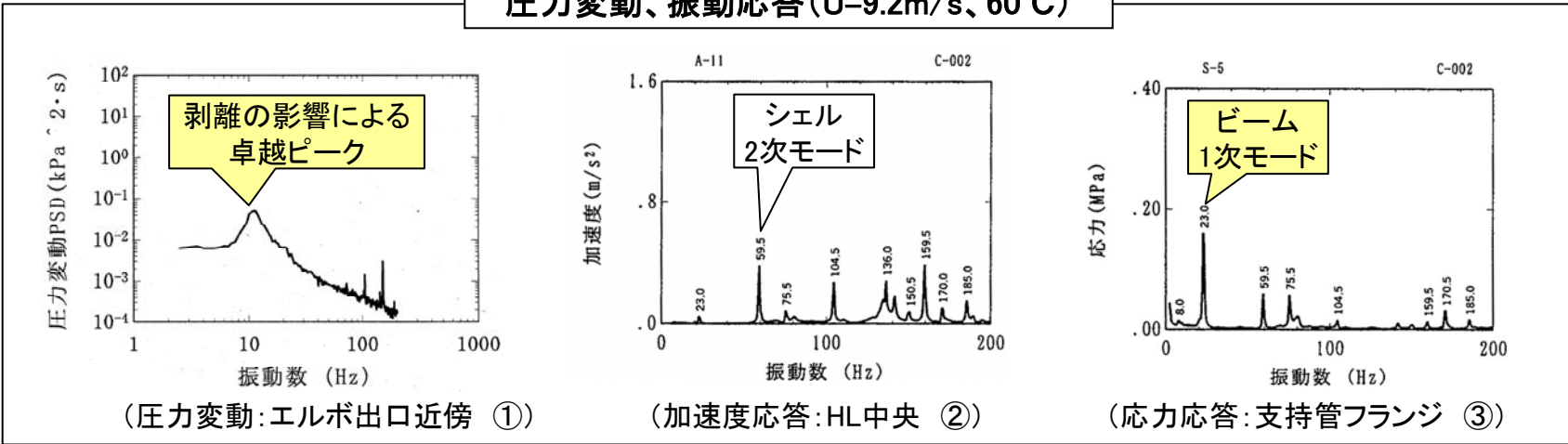
振動試験の結果

エルボで生じる圧力変動によって励振される試験体の振動応答特性を把握

試験体の固有振動モード



圧力変動、振動応答 (U=9.2m/s、60°C)

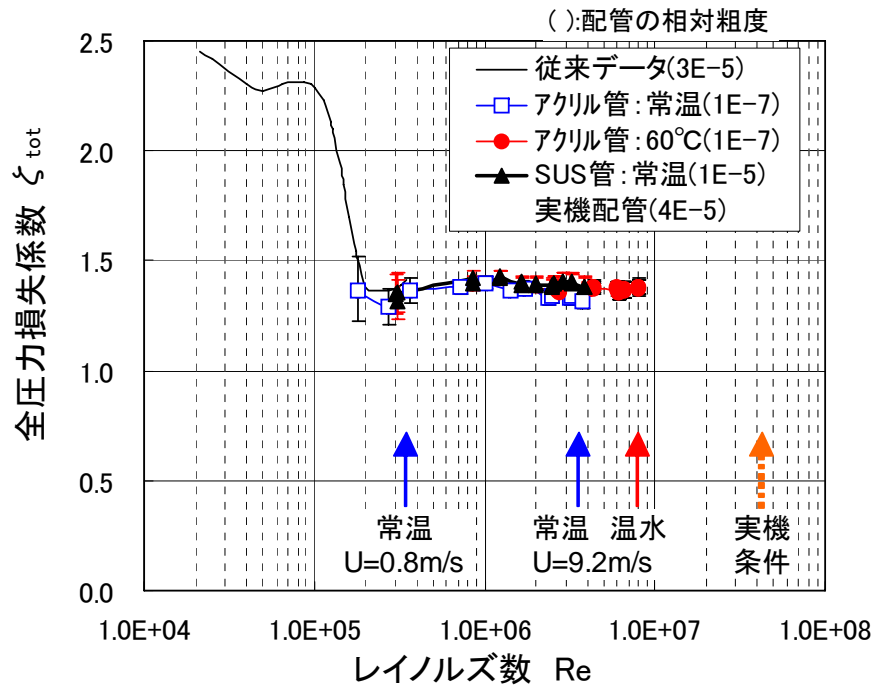


➤ 管内で発生する圧力変動(励振力)の振動数は広範囲に存在するが、試験体の加速度・応力の応答は、試験体の固有振動数に相当する振動数成分で励起され、比較的応力の高い部位ではビーム1次モードが支配的 (実機体系の応力として換算しても、構造上の裕度大)

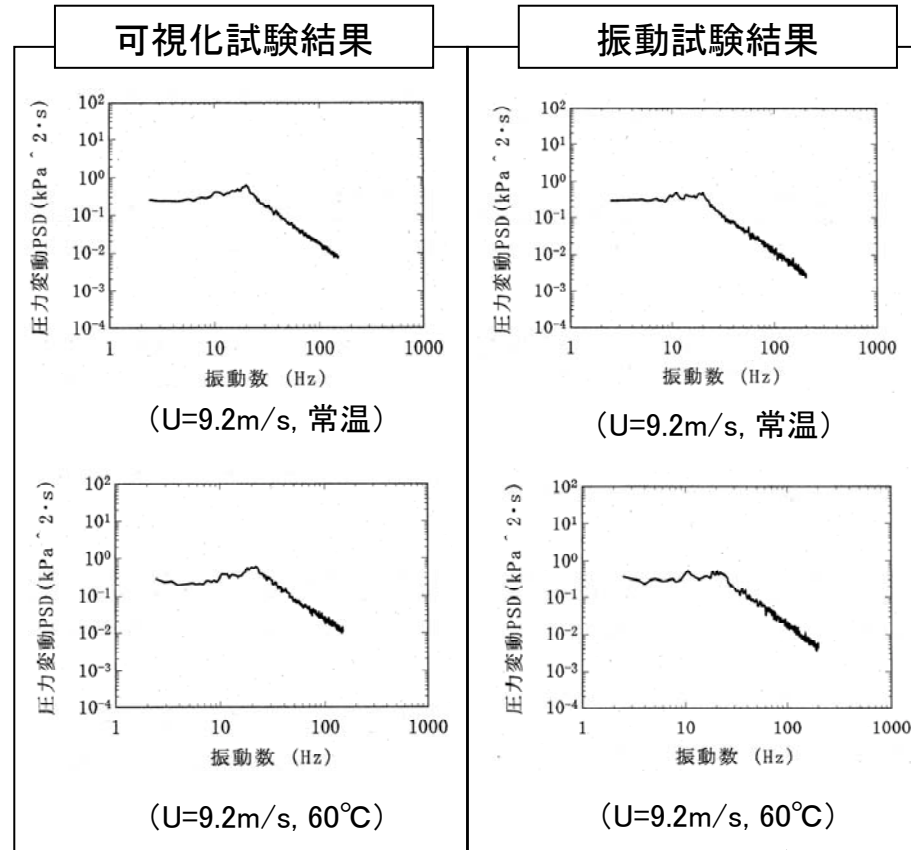


可視化試験と振動試験の比較

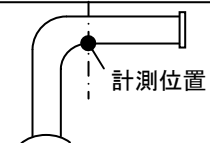
可視化試験体と振動試験体で、流動特性、圧力変動特性はほぼ一致



圧力損失係数のレイノルズ数依存性
(SUS管データ追記)



エルボ出口近傍での
圧力変動パワースペクトル密度

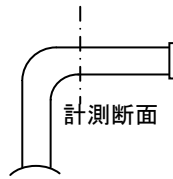
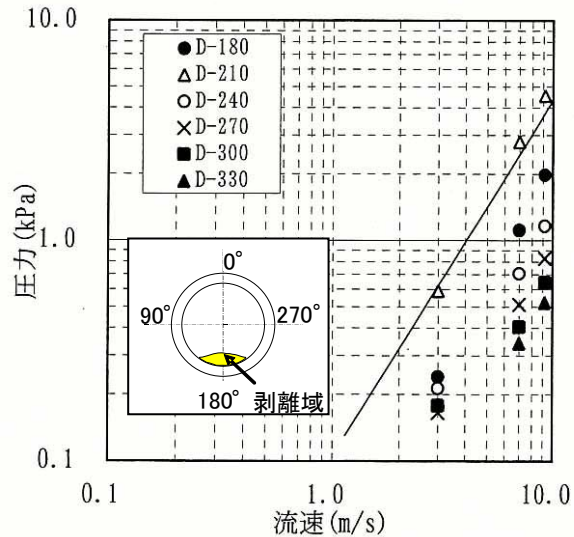


- 振動試験体の圧力損失係数は、可視化試験体と一致（表面粗度の影響小）
- 励振源となる圧力変動PSDでも、両試験体で有意な差がない

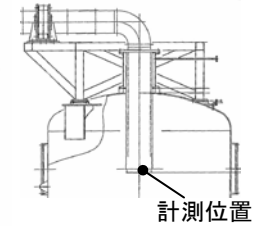
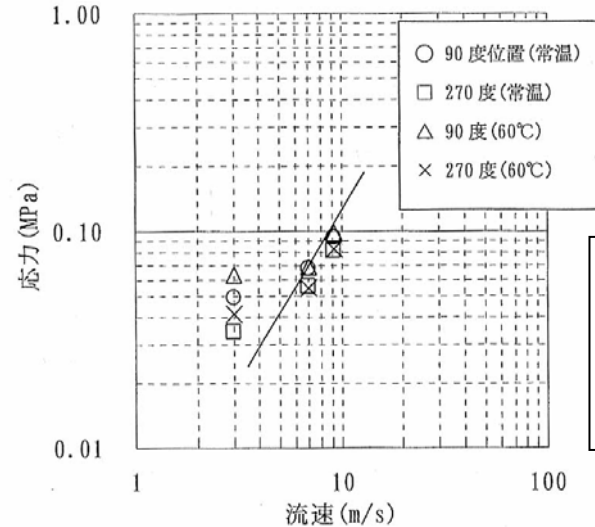


流速、Re数に対する依存性

圧力変動(振幅)及び振動応力は流速の2乗に比例する傾向を示し、Re数依存性なし



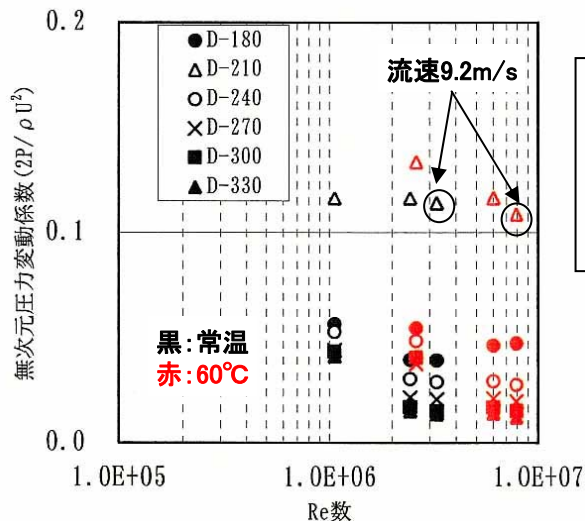
圧力変動(振幅)は、流速の2乗に比例して増加する傾向



振動応力は、流速の2乗に比例する傾向
水温を変えても、応力値は一致
⇒Re数依存性なし

圧力変動(振幅)の流速依存性

振動応力の流速依存性



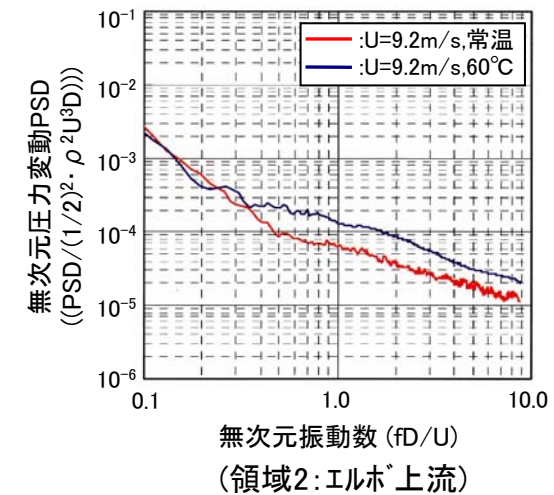
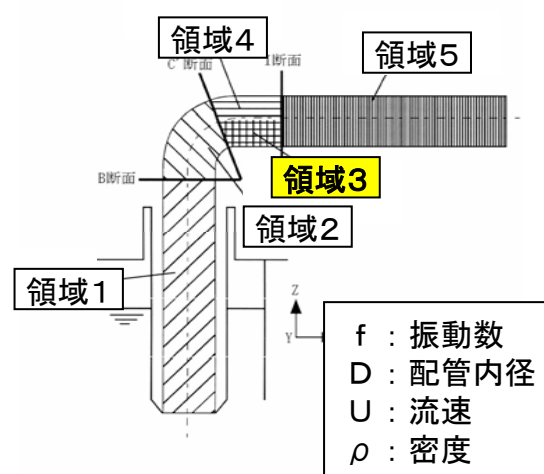
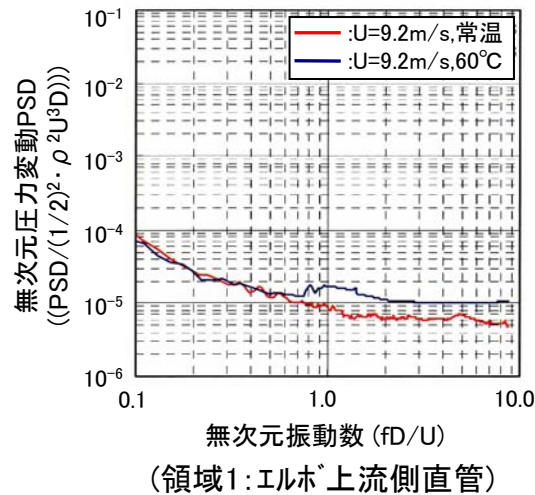
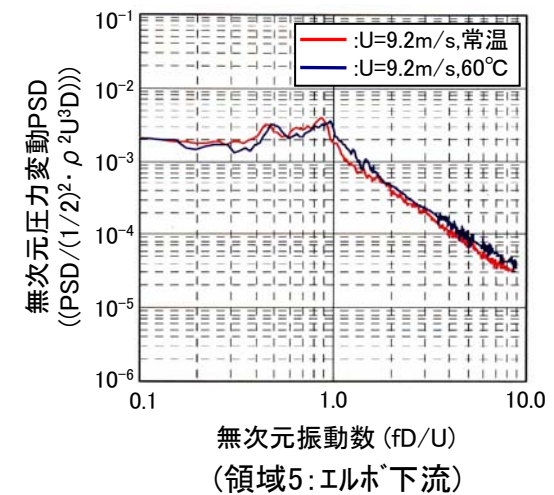
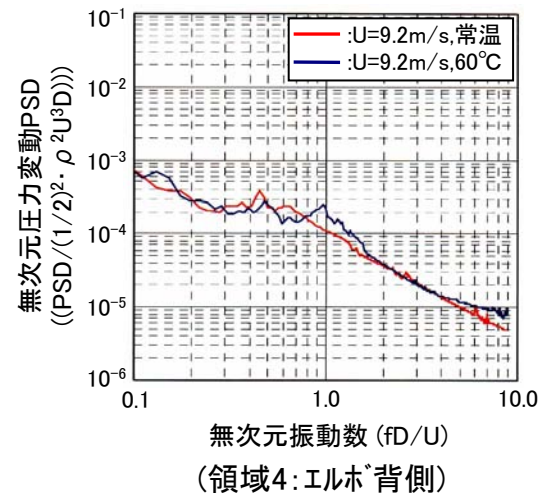
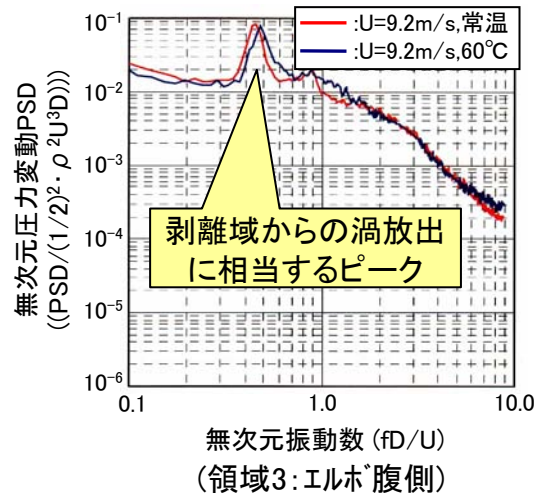
圧力変動(振幅)を動圧で無次元化した圧力変動係数は、水温を変えた場合でもほぼ一定
⇒Re数依存性なし

無次元圧力変動係数のRe数依存性



圧力変動PSDの領域区分

無次元圧力変動PSDは流れ方向5領域に区分でき、剥離域を含む領域3が最大

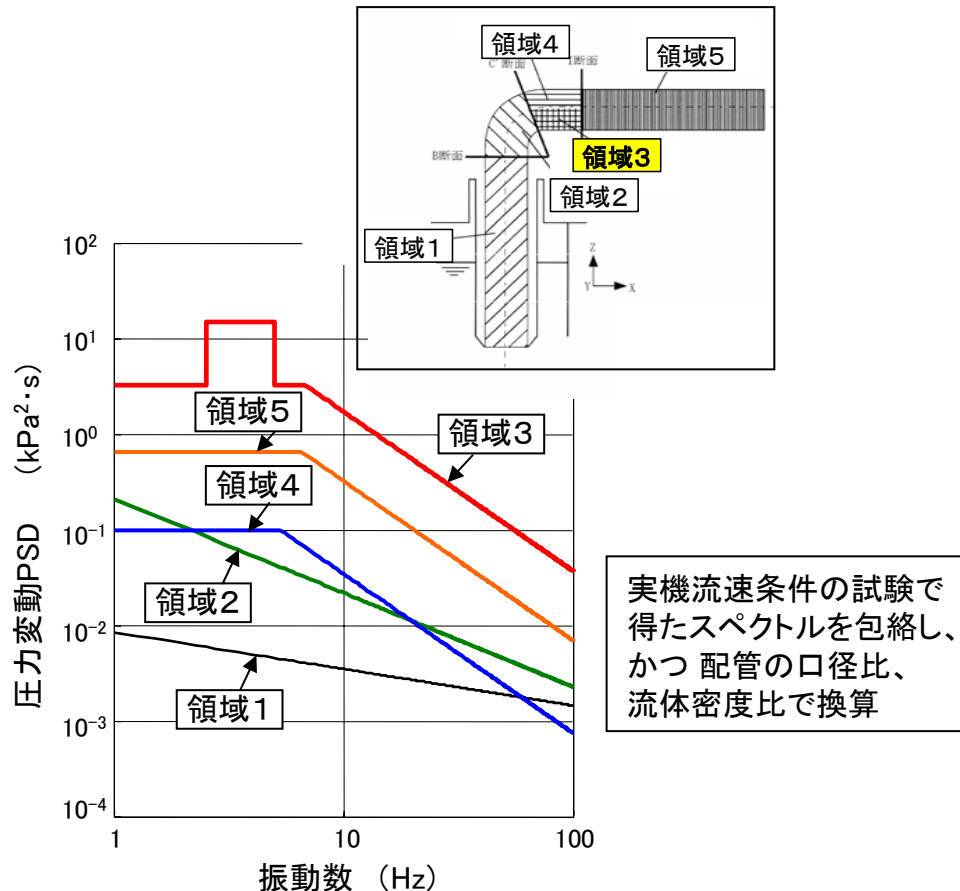


➤実流速条件で取得した圧力変動PSDに、構造系の相似則を考慮すれば
 実機配管の振動応答評価に適用可能

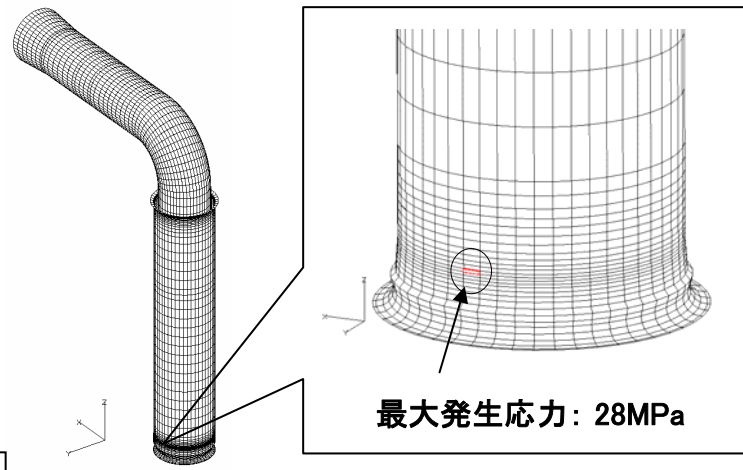


実機体系での応力評価

最大応力は、配管材の設計疲労限度(暫定:2.25Cr-1Mo鋼での値:49MPa)以下
⇒ 配管系の健全性は確保できる見通し



実機流速条件の試験で得たスペクトルを包絡し、かつ配管の口径比、流体密度比で換算



実機HL配管での振動応力評価結果

実機評価用の圧力変動PSD



まとめと今後の課題

1. 試験結果のまとめ

実機ホットレグ配管の1/3縮尺試験体を用いて、高Re数条件(最大 8×10^6)での流動・振動試験を実施。

- ▶管内流速分布、圧損係数、圧力変動、振動応力等の計測結果より、Re数依存性がないことを確認した。
- ▶実機流速条件での圧力変動データに基づき、実機体系での振動応答を評価できる見通しを得た。
- ▶実機体系での最大応力を評価した結果、配管材の設計疲労限度以下となり、配管系の健全性を確保できる見通しを得た。

2. 今後の課題

- ▶配管入口部での流入条件として、実機の上部プレナム流況を想定した旋回流れを与える場合の影響を把握する。
- ▶コールドレグ配管のような多段エルボ体系での流況、圧力変動特性を縮尺水試験により把握する。
- ▶今回の試験条件は、実機Re数の1/5までの範囲であり、過流量条件での特性や試験結果の外挿性を確認するため、より高Re数条件での試験実施の必要性を検討する。