

「常陽」安全対策における温度計ウエルの流力振動評価について

「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故は、ナトリウムの流れによって温度計ウエルの後流に発生する対称渦による流力振動に伴う高サイクル疲労破損が原因であった。当該事象を踏まえ、「常陽」では、温度計ウエルの流力振動評価を実施し、同様の破損が発生しないことを確認している^[1]。

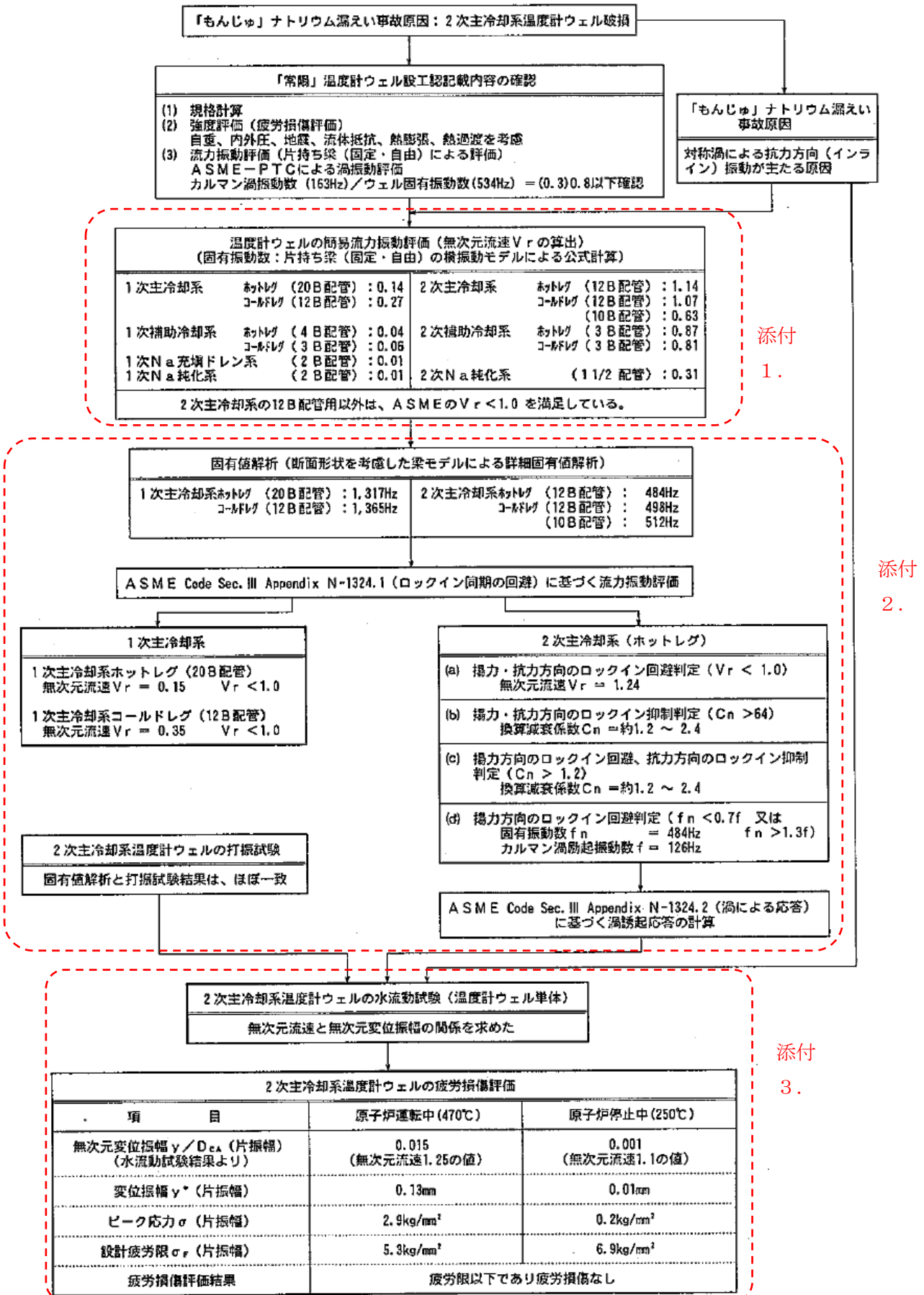
評価の概要を第1図に示す。ここでは、「常陽」の設工認における流力振動評価の実施状況調査、並びに温度計ウエルのうちナトリウム中に突き出した長さを片持ち梁とした固有振動数と ASME Code Section III Appendix N-1300 の揚力及び抗力方向のロックイン回避の判定（無次元流速 $V_r < 1.0$ ）に基づく簡易流力振動評価を行った。

簡易流力振動評価では、2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウエル以外は、渦により共振することがないことを確認した。

簡易流力振動評価を満足しない2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられた温度計ウエルについては、詳細な振動特性の把握と水流動試験を実施し、その構造健全性評価を行った。この結果、2次主冷却系12B配管用温度計ウエルは、熱電対が挿入されていない温度計ウエルを用いた水流動試験結果から、原子炉定格出力運転時の100%流量運転状態で、ウエル細管付け根部発生ピーク応力が、保守的に設定された設計疲労限を下回ることを確認した。

なお、当該ウエルは、主冷却器の上流に設置されているものであり、MK-III改造工事に、予防保全の観点で短尺化（ナトリウム中長さ：150mm→65mm）したものに交換している。

[1] 磯崎 和則、富田 直樹、高速実験炉「常陽」温度計ウエルの流力振動評価、PNC TN9410 97-062、1997。URI: <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?4036149>。



第1図 温度計ウェル流体力学評価の概要

1. 簡易流力振動評価

1次主冷却系温度計ウェルの構造は第 1.1 図に、2次主冷却系温度計ウェルの構造は第 1.2 図に示すとおりであり、以下の評価条件で簡易流力振動評価を実施した。

- (1) 温度計ウェルの固有振動数を、配管内に突き出た長さを持つ片持ち梁として計算。断面 2 次モーメント及び単位長さ当たりの重量は、構造上一定断面でないため、等価断面 2 次モーメント及び等価単位長さ重量に置き換え。
- (2) レイノルズ数は、温度計ウェル壁面で算出。
- (3) ストローハル数は、温度計ウェルを単独円筒として算出。

$$\text{自励振動を回避できる条件} \quad Vr = \frac{V}{fn \cdot D_{CA}} < 1.0$$

V：ナトリウム流速

fn：ナトリウム中ウェル固有振動数

D_{CA}：ナトリウム中ウェル細管部の外径

$$\text{固有振動数} \quad fn = \frac{\lambda^2}{2\pi \cdot l^2} (EIg/W)^{1/2}$$

λ²：振動係数

E：縦弾性係数

I：断面 2 次モーメント

g：重力加速度

W：ウェルの重量

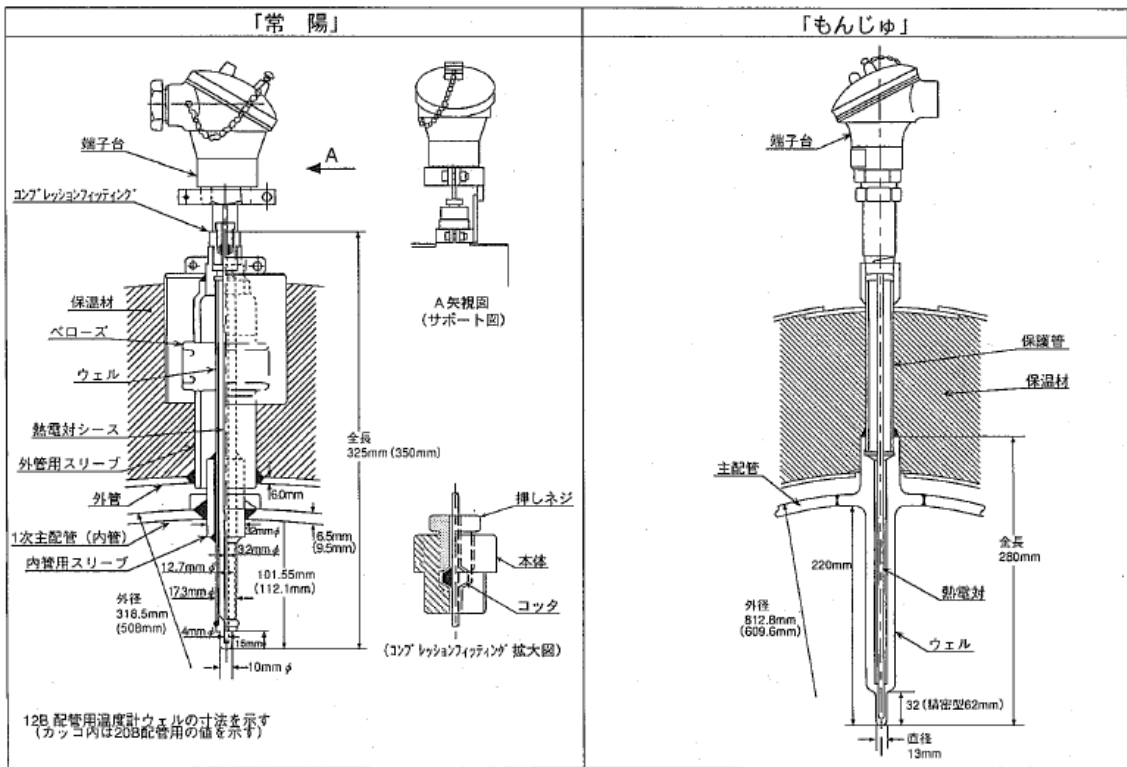
自励振動を回避できる条件の評価結果を第 1.1 表に、2次主冷却系配管の簡易流力振動評価を第 1.2 表に示す。2次主冷却系 12B 配管以外は自動振動を回避できる条件を満足しており、渦により共振することはない。2次主冷却系のうち 12B 配管に取り付けられている温度計ウェル（ナトリウム中長さ 150mm）については、ロックイン回避の無次元流速 Vr<1.0 を満足しないことから、詳細な流力振動評価（2.）を行った。

第 1.1 表 温度計ウェルの自励振動を回避できる条件

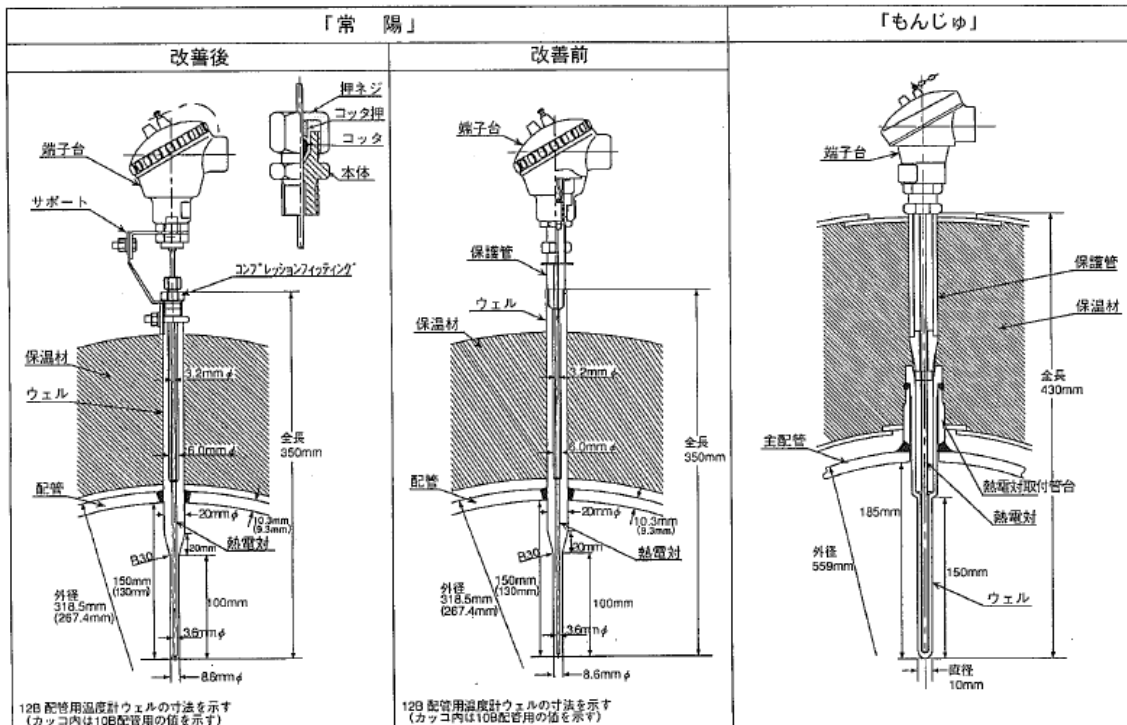
温度計ウェル			無次元流速 Vr
1 次主冷却系	ホットレグ	20B 配管	0.137
	コールドレグ	12B 配管	0.265
1 次補助冷却系	ホットレグ	4B 配管	0.033
	コールドレグ	3B 配管	0.053
1 次 Na 充填ドレン系		2B 配管	0.007
1 次 Na 純化系		2B 配管	0.010
2 次主冷却系	ホットレグ	12B 配管	<u>1.136</u>
	コールドレグ	12B 配管	<u>1.061</u>
		10B 配管	0.623
2 次補助冷却系	ホットレグ	3B 配管	0.866
	コールドレグ	3B 配管	0.807
2 次 Na 純化系		1 1/2 B 配管	0.305

第 1.2 表 2 次主冷却系温度計ウェルの簡易流力振動評価

	ホットレグ	コールドレグ	
		12B 配管	10B 配管
ナトリウム温度 (°C)	470	340	340
ナトリウム流量 (m ³ /s)	0.3589	0.3461	0.1731
配管外径 (m)	0.3185	0.3185	0.2674
配管内径 (m)	0.2979	0.2979	0.2488
配管内断面積 (m ²)	6.96997×10^{-2}	6.96997×10^{-2}	4.861728×10^{-2}
ナトリウム流速 (m/s)	5.15	4.97	3.56
動粘性係数 (m ² /s)	3.04976×10^{-7}	3.64398×10^{-7}	3.64398×10^{-7}
レイノルズ数	1.45×10^5	1.17×10^5	8.40×10^5
ストローハル数	0.21	0.21	0.21
ウェル全長 (mm)	150.0	150.0	130.0
ウェル細幹部外径 (mm)	8.6	8.6	8.6
縦弾性係数 (kg/mm ²)	1.7876×10^4	1.9047×10^4	1.9047×10^4
断面 2 次モーメント (mm ⁴)	2283	2283	1427
ウェル等価重量 (kg/mm)	8.90×10^{-4}	8.90×10^{-4}	6.61×10^{-4}
重力加速度 (mm/s ²)	9800	9800	9800
振動係数	3.516	3.516	3.516
ウェル固有振動数 (Hz)	527	544	665
カルマン渦による励振振動数 (Hz)	126	121	87
自励振動数を回避できる条件 <1.0	1.136	1.061	0.623



第 1.1 図 1 次主冷却系温度ウェルの構造比較



第 1.2 図 2 次主冷却系温度ウェルの構造比較

2. 2次主冷却系 12B 配管用温度計ウェルの詳細な振動特性評価

2.1 固有値解析及び打振試験

簡易流力振動評価で2次主冷却系 12B 配管用温度計ウェルについて、断面形状を詳細にモデル化した固有値解析、模擬試験体を用いた打振試験を実施した。

解析では、FINAS (ver. 12) を用いて2次主冷却系温度ウェルの断面形状を詳細にモデル化した。固有値解析結果を第2.1.1表に示す。また、模擬試験体による打振試験を実施した結果を第2.1.2表に示す。打振試験では、模擬配管に溶接支持された温度計ウェルの上端及び先端をインパルスハンマで打振し、ウェル上端及び先端の変位又は加速度応答を計測した。

固有値解析結果と打振試験結果は一致しており、温度計ウェルの固有振動数は、1次：80Hz、2次：484Hz（原子炉運転中）、と判断した。

第2.1.1表 2次主冷却系温度計ウェルの固有値解析結果

ウェル タイプ	モード	Na 付加質量考慮		Na 付加質量なし（気中）		
		運転中 470℃	停止中 250℃	運転温度 470℃	停止温度 250℃	大気温度 20℃
タイプ A (150mm)	1次	80	81	80	81	82
	2次	484	507	512	538	555
タイプ B (130mm)	1次	73	74	73	74	75
	2次	497	521	526	553	570

第2.2表 2次主冷却系温度計ウェルの打振試験結果

ウェルタイプ	ウェル+熱電対 (シース付)	ウェル単体	ウェル+加速度計内挿	
	大気中	大気中	大気中	水中
タイプ A (150mm)	555.0	582.5	572.5	537.5
タイプ B (130mm)	572.5	602.5	590.0	550.0

2.2 揚力・抗力方向のロックイン回避及び抑制の判定

固有値解析及び打振試験で得られた固有振動数を用いて、ASME の設計対処法に示されている揚力・抗力方向の渦による振動のロックイン回避及び抑制の評価を行った。

判定には以下の条件を用いた。

- (1) 原子炉運転中における 100%流量条件 (MK-II) を用いている。
- (2) レイノルズ数は、 2×10^5 以下の領域であることから、ストローハル数は 0.21 一定としている。
- (3) 換算減衰係数は、ASME で示されている温度計ウェルの振動モード関数を考慮して算出している。
- (4) ウェルの減衰定数は、「もんじゅ」で得られたデータを参考に 0.5~1.0%を用いている。

ASME に基づく評価を第 2.3 表に示す。

2 次主冷却系の 12B 配管に取り付けられている温度計ウェルの判定を第 2.4 表に示す。揚力方向のロックインは回避できる。一方、抗力方向は(a)項を満足せず、(c)項である揚力方向のロックイン回避及び抗力方向のロックイン抑制の判定値 ($V_r < 3.3$ かつ $C_n > 1.2$) を減衰定数約 0.6%で満足することから、抗力方向のロックインが抑制される領域の下限界近傍であると考えられる。

よって、抗力方向については、実機を模擬した水流動試験を行って応答特性を把握し、疲労損傷評価 (3.) を行うものとした。

第 2.3 表 ロックイン回避及び抑制する条件

回避及び抑制の基準		無次元流速 V_r	換算減衰係数 C_n	備考
(a)	揚力・抗力方向ロックイン回避	$V_r < 1.0$		倍調モードの共振を回避するように剛性を高めることを目的
(b)	揚力・抗力方向ロックインの抑制		$C_n < 64$	風にさらされるスタック、塔及びマスト等に関するもの
(c)	揚力方向ロックイン回避及び抗力方向ロックイン抑制	$V_r < 3.3$	$C_n > 1.2$	$C_n > 1.2$ は特に抗力方向のロックインを抑制する目的
(d)	揚力方向ロックイン回避	$f_n < 0.7f$ 又は $f_n > 1.3f$		

第 2.4 表 2 次主冷却系温度計ウェル (12B 配管) のロックイン回避及び抑制の判定

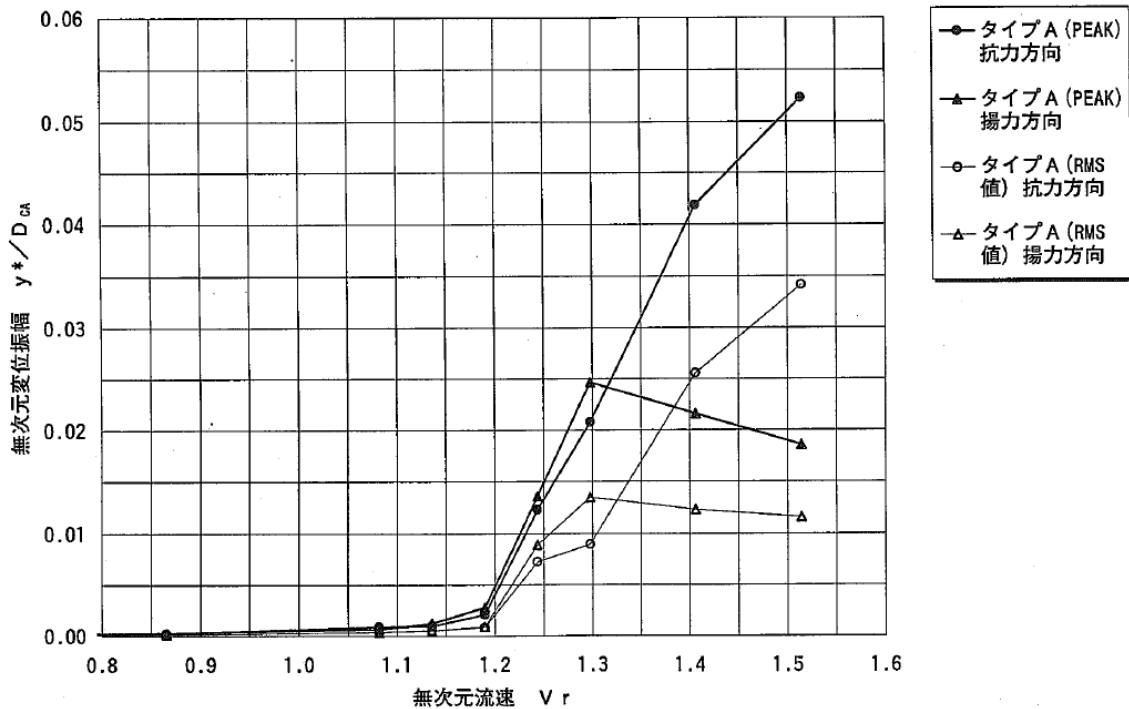
項目	ホットレグ	コールドレグ
ナトリウム温度 (°C)	470	340
ナトリウム流量 (m ³ /s)	0.3589	0.3461
配管内断面積 (m ²)	6.96997×10^{-2}	6.96997×10^{-2}
縦弾性係数 (kg/mm ²)	1.7876×10^4	1.8962×10^4
ナトリウム流速 (m/s)	5.15	4.97
動粘性係数 (m ² /s)	3.04976×10^{-7}	3.58357×10^{-7}
レイノルズ数	1.45×10^5	1.19×10^5
ストローハル数	0.21	0.21
渦放出周波数 (1/s)	126	121
温度計ウェル固有振動数 (1/s)	484	498
温度計ウェルの細莖部外径 (mm)	8.6	8.6
無次元流速 V_r	1.24	1.16
ウェル減衰定数 (0.5%)	0.005	0.005
ウェル減衰定数 (1.0%)	0.010	0.010
温度計ウェルの一般化質量 (kg · s ² /mm)	3.28519×10^{-6}	3.28519×10^{-6}
流体の質量密度 (kg · s ² /mm ⁴)	8.56605×10^{-11}	8.88281×10^{-11}
流れを受けるウェルの長さ (mm)	150	150
換算減衰係数 $C_{n0.5}$	1.20	1.16
換算減衰係数 $C_{n1.0}$	2.40	2.31
0.7f	88	85
1.3f	163	158

3. 2次主冷却系 12B 配管用温度計ウェルの疲労損傷評価

3.1 水流動試験

水流動試験には、長さ 1m の 10B 配管に実機同様に配管上部から配管内に温度計ウェルを突き出し直接溶接支持された模擬試験体（配管内ウェル長さ 150mm（12B 配管用、タイプ A））を用いた。温度計ウェル先端に加速度計（2 方向）を設置し、振動挙動を計測した。また配管内の平均流速を超音波流速計で計測した。

水流動試験（常温水）から、ナトリウム温度 470°C 及び 250°C での評価に用いるため、2 次主冷却系温度ウェルの無次元流速と無次元変位振幅の関係を整理した。第 3.1.1 図にナトリウム中ウェル長さ 150mm（12B 配管用、タイプ A）における無次元流速と無次元変位振幅の関係を示す。原子炉運転中（MK-II 470°C）においては流速 5.15m/s で無次元流速 1.24（484Hz）で無次元変位振幅（ピーク値）は約 0.015（約 0.13mm（片振幅））、原子炉停止中 250°C においては流速 4.85m/s で無次元流速 1.11（507Hz）で無次元変位振幅（ピーク値）は約 0.001（約 0.01mm（片振幅））となる。



第 3.1.1 図 無次元流速と無次元変位振幅の関係（12B 配管用、タイプ A）

3.2 疲労損傷評価

梁モデルによる調和加振解析の結果より応力を算出した（第 3.2.1 図）。なお、応力集中係数は、切り欠き棒の r/d より、1.04 とした（3次元ソリッドモデル解析から算出した応力集中係数とほぼ一致しており、解析結果より保守的な値）。評価結果を第 3.2.1 表にまとめる。

水流動試験結果から求めた無次元流速と無次元変位振幅との関係から求めた変位振幅より、原子炉運転中（MK-II 470°C）においては、最大変位振幅約 0.13mm（片振幅）、ピーク応力 2.9kg/mm²（片振幅、応力集中係数考慮）、原子炉停止中（250°C）においては、最大変位振幅は約 0.01mm（片振幅）、ピーク応力は約 0.2kg/mm²（片振幅、応力集中係数考慮）となる。設計疲労限 σ_F は運転中 5.3kg/mm²、停止中 6.9kg/mm²（高速原型炉第 1 種機器の高温構造設計方針（BDS）より求めた疲労限（10¹¹ 回外挿値、第 3.2.2 表及び第 3.2. 図参照）に 1/1.2 倍した値、10¹⁴ 回疲労限）であり、原子炉運転中及び原子炉停止中とも設計疲労限以下で温度計ウェルが流力振動によって損傷することはない。

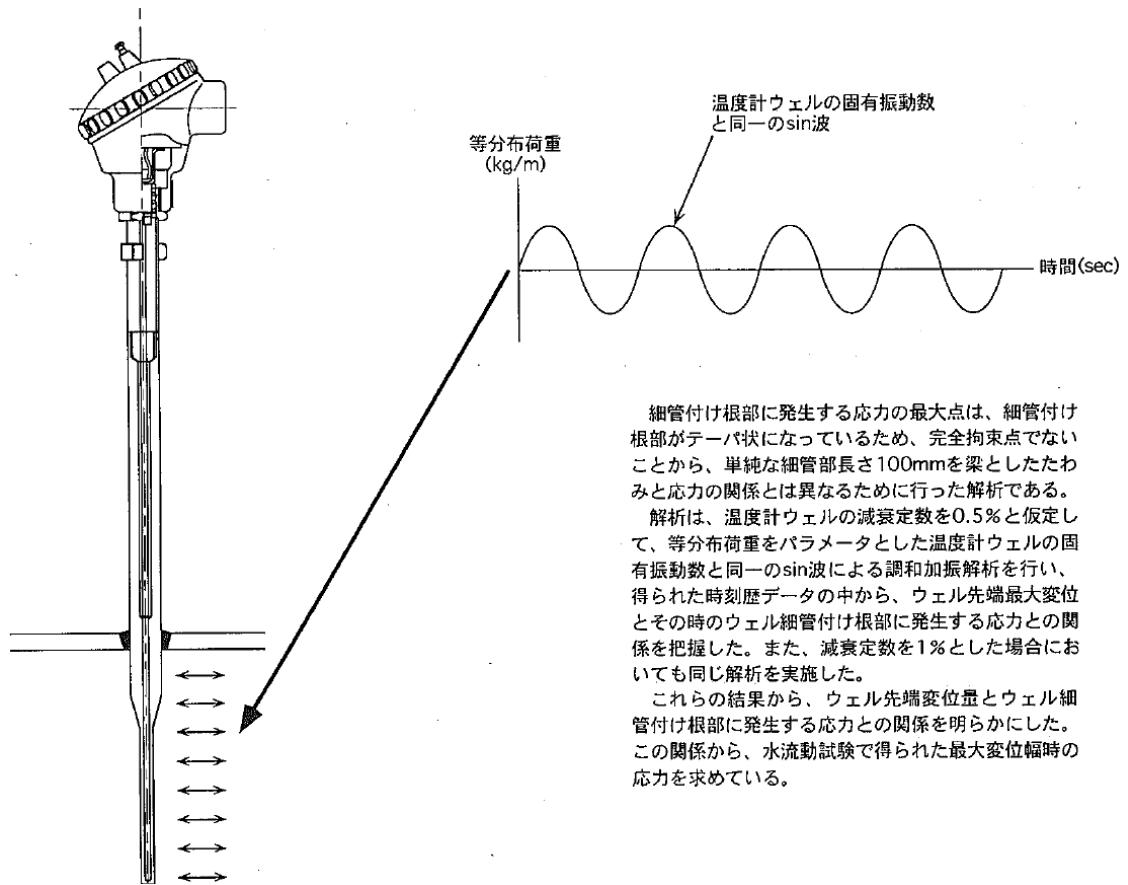
よって、「常陽」2 次主冷却系温度計ウェルが渦による振動によって損傷することはない、その構造健全性に問題ないことを確認した。

第 3.2.1 表 2 次主冷却系温度系ウェル細管付け根部応力及び疲労損傷評価

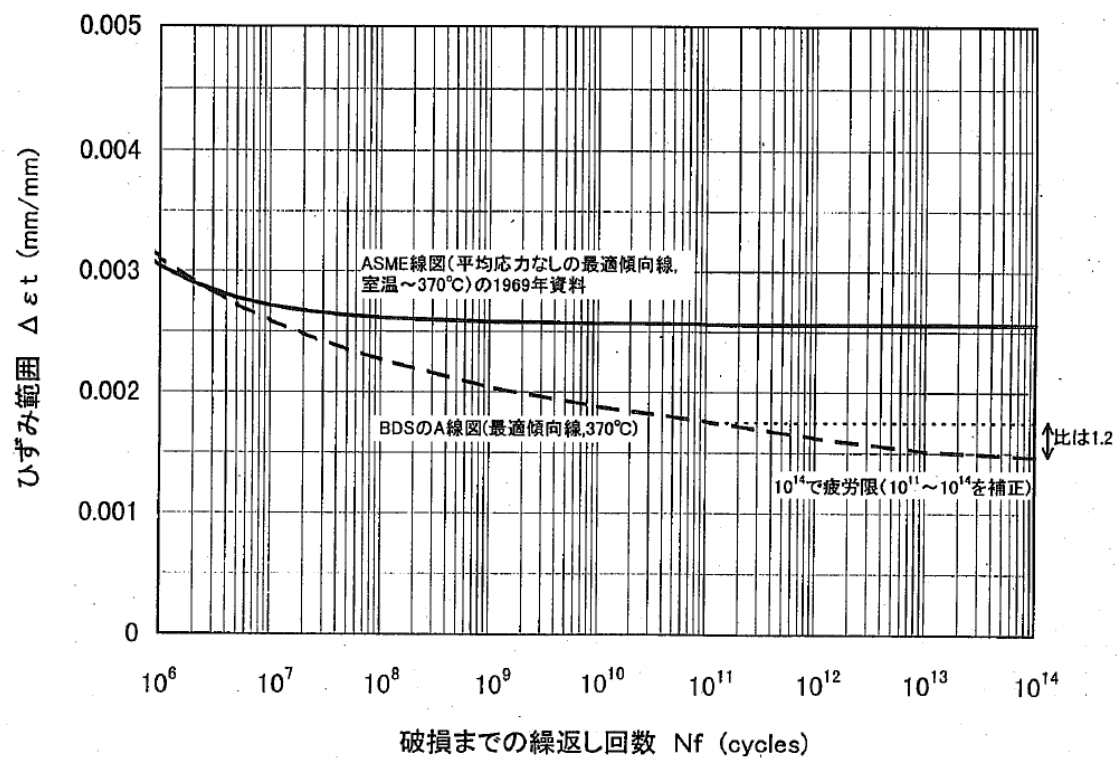
項目	備考	運転中 (MK-II 470℃)	停止中 (250℃)
流量 (100%流量)		0.3589	0.3378
流速 (100%流量) (m/s)		5.15	4.85
ウェル先端応答加速度	水流動試験結果	150	10
無次元変位振幅	水流動試験結果	0.015	0.001
最大変位振幅 (mm)		0.13	0.01
縦弾性係数 (kg/mm ²)		1.7876×10^4	1.9764×10^4
断面 2 次モーメント (mm ⁴)		260.27	260.27
細管部外径 (mm)		8.60	8.60
細管部長さ (mm)		100	100
断面係数 (mm ³)		60.53	60.53
発生応力	調和加振解析結果	2.79	0.21
ピーク応力	応力集中係数考慮	2.90	0.21
100%流量実績運転時間 (s)		1.8443×10^8	3.1639×10^8
100%流量運転時間 (s)	予定を含めた運転時間	2.1554×10^8	3.7860×10^8
BDS による疲労限 (kg/mm ²)		6.4	8.3
設計疲労限 σ_F (kg/mm ²)	BDS による疲労限/1.2	5.3	6.9
疲労損傷評価結果		疲労損傷なし	疲労損傷なし

第 3.2.2 表 材料の疲労限 (BDS)

温度 (°C)	2 1/4Cr-1Mo 鋼
20	8.8
⋮	
250	8.3
⋮	
450	6.8
475	6.3
⋮	



第 3.2.1 図 調和加振解析による応力算出



第 3.2.2 図 疲労曲線