

「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

1. もんじゅナトリウム漏えい事故の原因

「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。

「常陽」の2次系冷却系設備の設工認申請書では、当時の旧 ASME Power Test Code part 3 にしたがって交互渦に対する揚力方向のロックイン回避の判定を実施しているが、対称渦によるロックイン回避の規定はなかった。また1次系も、交互渦の流力振動評価を実施しているが、詳細は設工認申請書には記載されていない。

そこで当該事象を踏まえ、「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]。

2. 渦励振に対する設計基準

ASME BPVC Section III Div.1 Appendix N^[2]では、いくつかの励振メカニズムについて提示されており、N-1320 では渦放出について示されている。

直交する一様流れの中に鈍頭物体がある場合、第 2.1 図のように後流に渦が現れる。周期的に渦が放出されることで、物体に流れと直角の変動力が作用する。また、渦放出によって流れ方向にも抗力が作用するが、一般的に揚力方向よりも小さい。

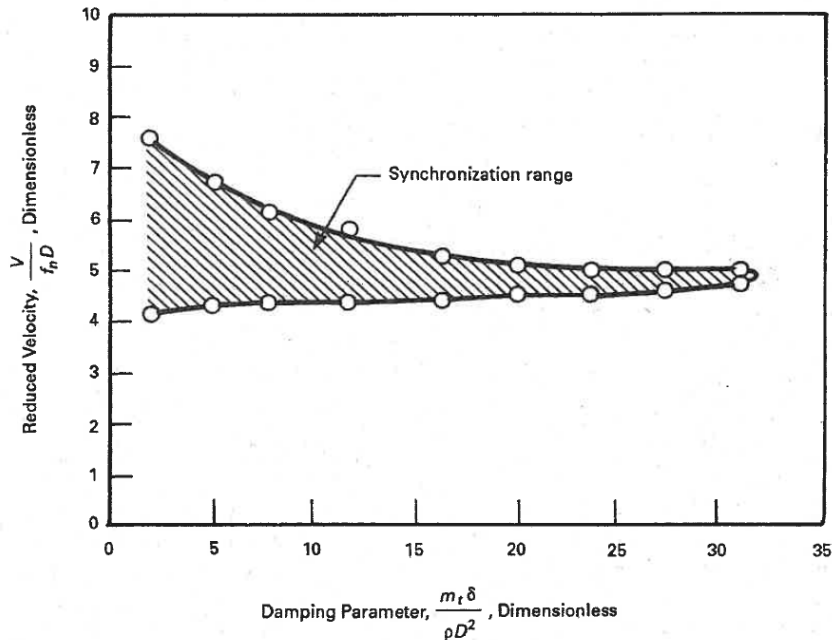
流速の増減があると、渦放出周波数が物体の固有振動数に近づく。その結果、渦放出周波数が物体の固有振動数にシフトする。すなわち、第 2.2 図に示す同期領域にあれば、流速や固有振動数が変わったとしても、固有振動数に同期する（ロックイン）。同期領域では、減衰の少ない物体では共鳴振動が起きる。

Figure N-1321-1
Vortices Shed From a Circular Cylinder



第 2.1 図 円筒からの渦放出^[2]

Figure N-1323-1
Synchronization of the Vortex Shedding Frequency and the Tube Natural Frequency for a Single, Flexibly-Mounted Circular Cylinder



GENERAL NOTE: Synchronization occurs within the shaded region. (Ref. [106])

第 2.2 図 渦放出周波数と単一可撓支持円筒の固有振動数の同期^[2]

ASME の N-1324.1 ではロックインを回避できるクライテリアが与えられており、単一円筒のロックインは次の 4 つの方法の 1 つで回避できるとされている。なお、運転状態を変えてもロックインの回避あるいは抑制できない場合は、共鳴渦誘起応答を計算しなければならない (N-1324.2) とされている。

- (a) 基本振動 (n=1) の無次元流速が以下を満足すれば、揚力方向及び抗力方向のロックインのどちらも回避できる。

$$V/f_1 D < 1$$

- (b) 与えられた振動モード (n 次) で、換算減衰係数が以下のように十分大きければ、ロックインは抑制される。

$$C_n > 64$$

- (c) 与えられた振動モード (n 次) で、以下を満たせば、揚力方向のロックインは回避され、抗力方向のロックインは抑制される。

$$V/f_n D < 3.3 \text{ and } C_n > 1.2$$

- (d) 固有振動数が以下の範囲にあれば、n 次モードで揚力方向のロックインは回避できる。

$$f_n < 0.7 f_s \text{ or } f_n > 1.3 f_s$$

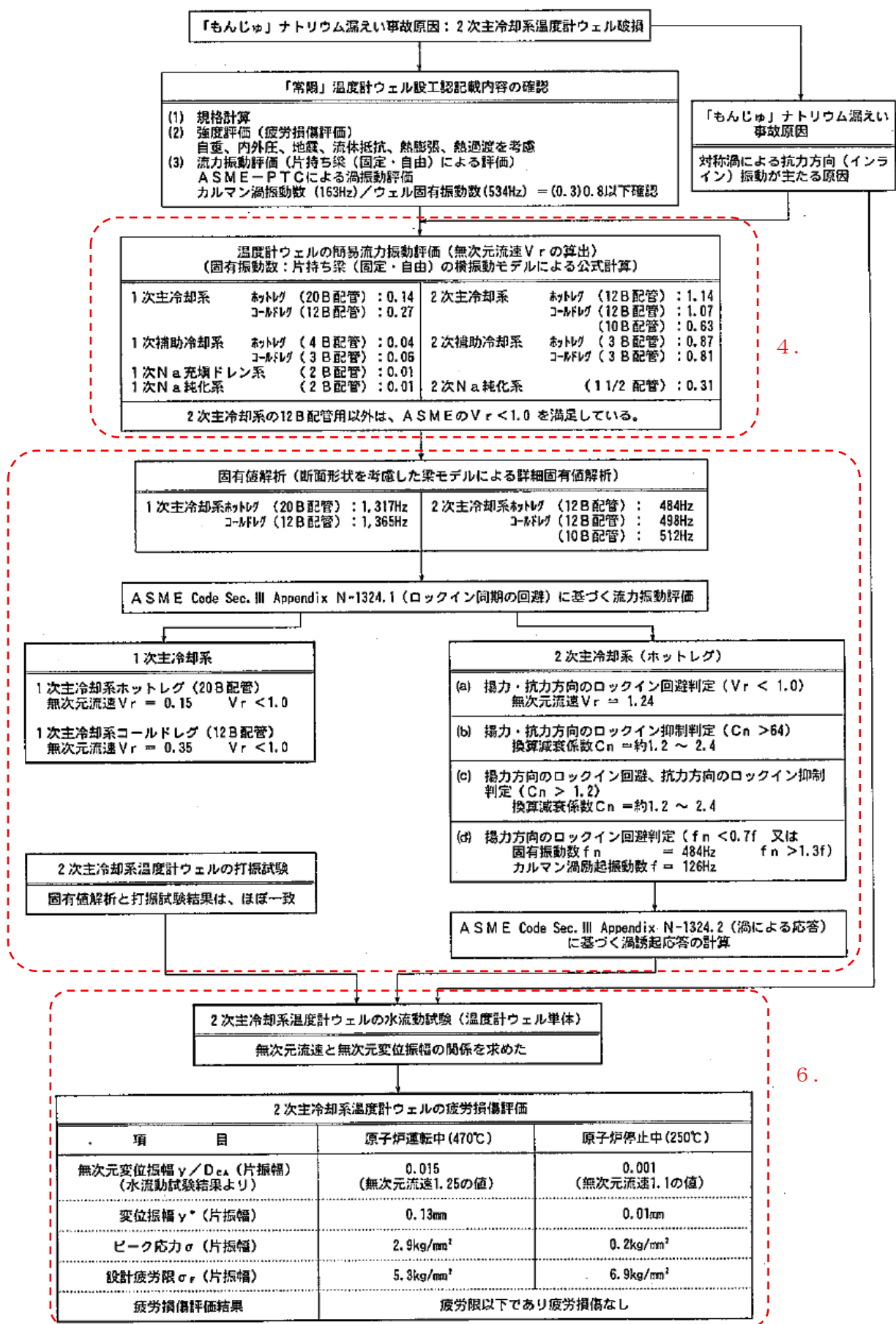
3. 「常陽」MK-II炉心条件での評価の概要

前項のASMEのN-1324.1のロックイン回避の基準にしたがい、まずは“温度計ウェ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”によりASMEのロックイン回避の基準の(a)項の揚力方向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)。

次に、簡易計算で(a)項を満足しない2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられた温度計ウェルについては、温度計ウェルを詳細にモデル化した固有値計算及び打振試験により温度計ウェルの固有振動数を評価し、ロックイン回避を判定した(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)。ASME N-1324では(a)～(d)項のいずれかを満足すればよいが、抗力方向のロックインを回避又は抑制するため、ここでは(a)～(c)のいずれかで判定した。詳細評価でも、2次主冷却系温度計ウェルは(a)項を満足せず、減衰定数約0.6%で(c)項を満足することから、抗力方向のロックインが抑制される下限近傍と考えられ、これより2次主冷却系温度計ウェルに対する渦誘起応答の計算を実施した。

渦誘起応答の計算では、水流動試験により、疲労損傷評価を行うための流力振動特性(無次元流速と無次元変位振幅)を把握し、調和加振解析によるウェル先端変位量-細管付根部応力の関係より、原子炉定格出力運転時の100%流量運転状態で、ウェ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。

評価の概要を第1図に示す。



第1図 温度計ウェル流力振動評価の概要^[1]

4. 簡易流力振動評価

1次主冷却系温度計ウエルの構造は第4.1図に、2次主冷却系温度計ウエルの構造は第4.2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) 温度計ウエルの固有振動数を、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、温度計ウエル壁面で算出。
- (3) ストローハル数は、温度計ウエルを単独円筒として算出。
- (4) 原子炉は100%流量運転とする。「常陽」は出力に応じて流量を変化させず、定格流量以外の振動に機器が長時間さらされないため)

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

V：ナトリウム流速

fn：ナトリウム中ウエル固有振動数

D_{CA}：ナトリウム中ウエル細管部の外径

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

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：ウエルの重量

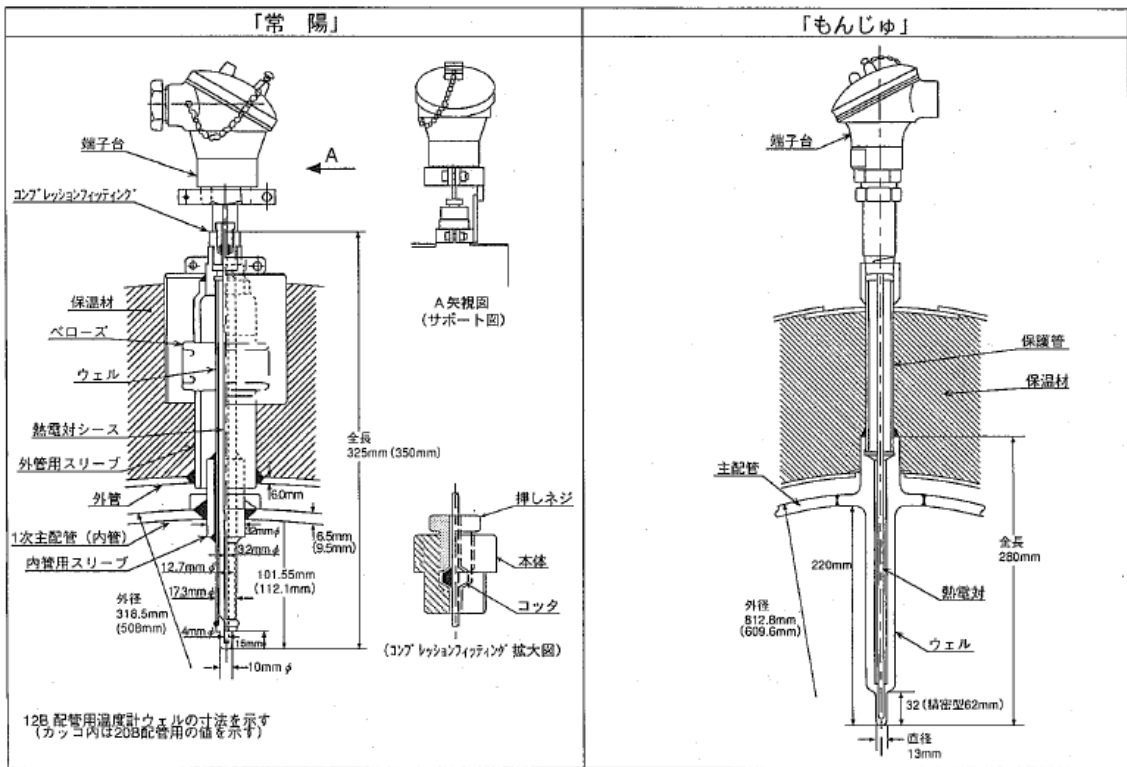
自励振動を回避できる条件の評価結果を第4.1表に、2次主冷却系配管の簡易流力振動評価を第4.2表に示す。2次主冷却系12B配管以外は自動振動を回避できる条件を満足しており、渦により共振することはない。2次主冷却系のうち12B配管に取り付けられている温度計ウエル（ナトリウム中長さ150mm）については、ロックイン回避の無次元流速 $Vr < 1.0$ を満足しないことから、詳細な流力振動評価（5.）を行った。

第 4.1 表 温度計ウェルの自励振動を回避できる条件

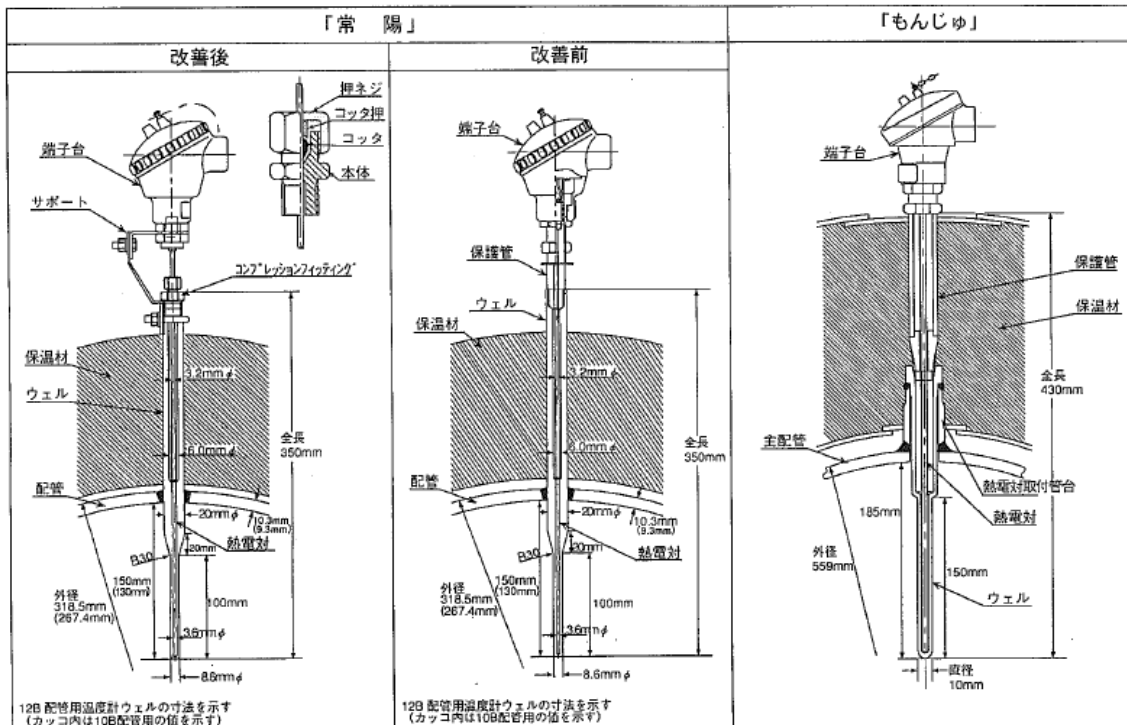
温度計ウェル			無次元流速 Vr
1 次主冷却系	ホットレグ	20B 配管	0.137
	コールドレグ	12B 配管	0.265
1 次補助冷却系	ホットレグ	4B 配管	0.033
	コールドレグ	3B 配管	0.053
1 次 Na 充填ドレン系		2B 配管	0.007
1 次 Na 純化系		2B 配管	0.010
2 次主冷却系	ホットレグ	12B 配管	<u>1.136</u>
	コールドレグ	12B 配管	<u>1.061</u>
		10B 配管	0.623
2 次補助冷却系	ホットレグ	3B 配管	0.866
	コールドレグ	3B 配管	0.807
2 次 Na 純化系		1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

第 4.2 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 4.1 図 1 次主冷却系温度ウェルの構造比較^[1]



第 4.2 図 2 次主冷却系温度ウェルの構造比較^[1]

5. 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

5.1 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。2次主冷却系 12B 配管用温度計ウェルの解析モデルを第 5.1.1 図に示す。固有値解析結果を第 5.1.1 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 5.1.2 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。

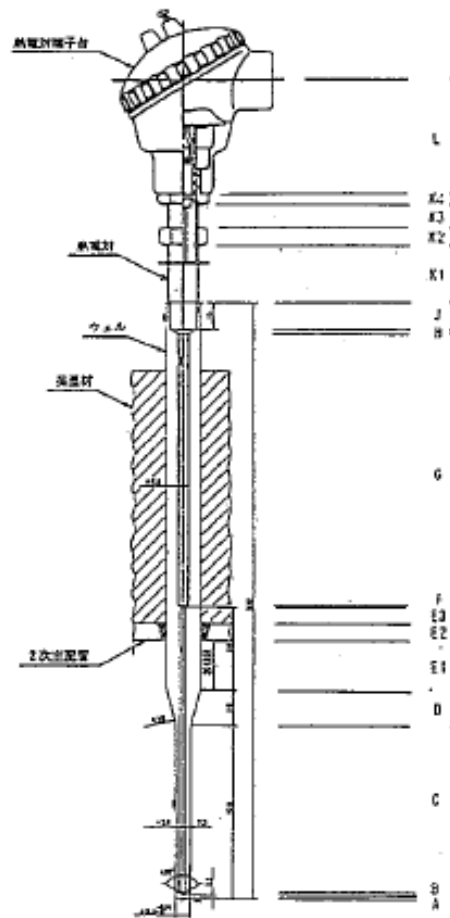
固有値解析結果と打振試験結果は一致しており、温度計ウェルの固有振動数は、1次：80Hz、2次：484Hz（原子炉運転中）、と判断した。

第 5.1.1 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 5.1.2 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

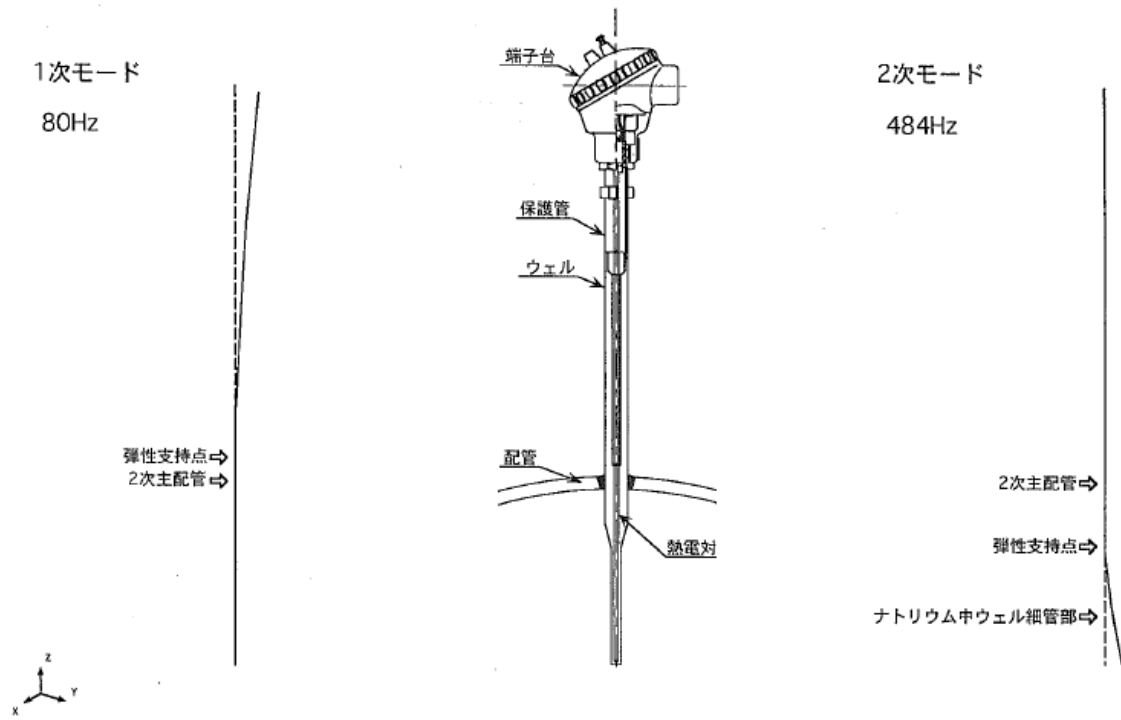


2次主冷却系ホットレグ温度計ウェルの解析条件（定格出力運転時）470℃

部材 記号	質点間 長さ (mm)	下端位置		上端位置		比重 (at 20℃) (kg/cm^3)	温度 (℃)	線弾性係数 (kg/cm^2)	伸び率	備考	
		内径 (mm)	外径 (mm)	内径 (mm)	外径 (mm)						
L	150~160	64.00	断面積を想定							端子台質量0.425kgを表中質量として考慮	
K 4	145~150	10.00	12.7	17.3	同左		8.0273E-05	100	1.9429E+04 (SUS304)	0.272	ナット質量0.02kgを表中質量として考慮
K 3	140~145	10.00	12.7	17.3	同左						ナット質量0.015kgを表中質量として考慮
K 2	130~140	10.00	12.7	17.3	同左						
K 1	120~130	42.00	12.7	17.3	同左						
J	110~120	16.00	12.7	20.0	同左						
H	109~110	1.75	6.0	20.0	12.7	20.0					
G	91~109	161.55	6.0	20.0	同左		7.9064E-05	250	1.9794E+04 (S7PA24)	0.300	
F	90~91	0.70	3.6	20.0	6.0	20.0					
E 3	80~90	9.70	3.6	20.0	同左						
E 2	70~80	10.30	3.6	20.0	同左						
E 1	60~70	30.00	3.6	20.0	同左						
D	50~60	20.00	3.6	8.6	3.6	20.0	1.7876E+04 (S7PA24)	470	0.294	RX, RY両性($8.745E+06\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{rad}$)	
C	14~50	96.00	3.6	8.6	同左					Na付加質量を考慮(Na比質量 $8.39473E-07\text{kg}/\text{cm}^3$)	
B	12~14	1.50	0.0	8.6	3.6	8.6				Na付加質量を考慮(Na比質量 $8.39473E-07\text{kg}/\text{cm}^3$)	
A	10~12	2.50	0.0	8.6	同左					Na付加質量を考慮(Na比質量 $8.39473E-07\text{kg}/\text{cm}^3$)	
合計		486.00									

部材記号C-K 4に熱電対シース質量を考慮(シース質量 $4.5E-05\text{kg}/\text{cm}$)

第 5.1 図 2次主冷却系温度計ウェルの解析モデル及び解析条件 (470℃) [1]



第 5.1 図 2 次主冷却系温度計ウェルの振動モード (スプリング式) [1]

5.2 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。「常陽」は出力に応じて流量を変化させず、定格流量以外の振動に機器が長時間さらされないため)
- (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 5.2.1 表及び第 5.2.2 表に示す。ASME N-1324 では (a)~(d) 項のいずれかを満足すればよいが、抗力方向のロックインを回避又は抑制するため、ここでは (a)~(c) のいずれかで判定した。

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 5.2.2 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。

なお、第 5.2.1 図に打振試験の模擬試験体で、スナップバック試験により測定した減衰定数を示す。温度計ウェルに熱電対シースが挿入されていた場合の減衰定数は、ほぼ一定値になっている約 3% 一定であれば、ASME の (c) 項、揚力方向ロックイン回避及び抗力方向ロックイン抑制を十分満足する。

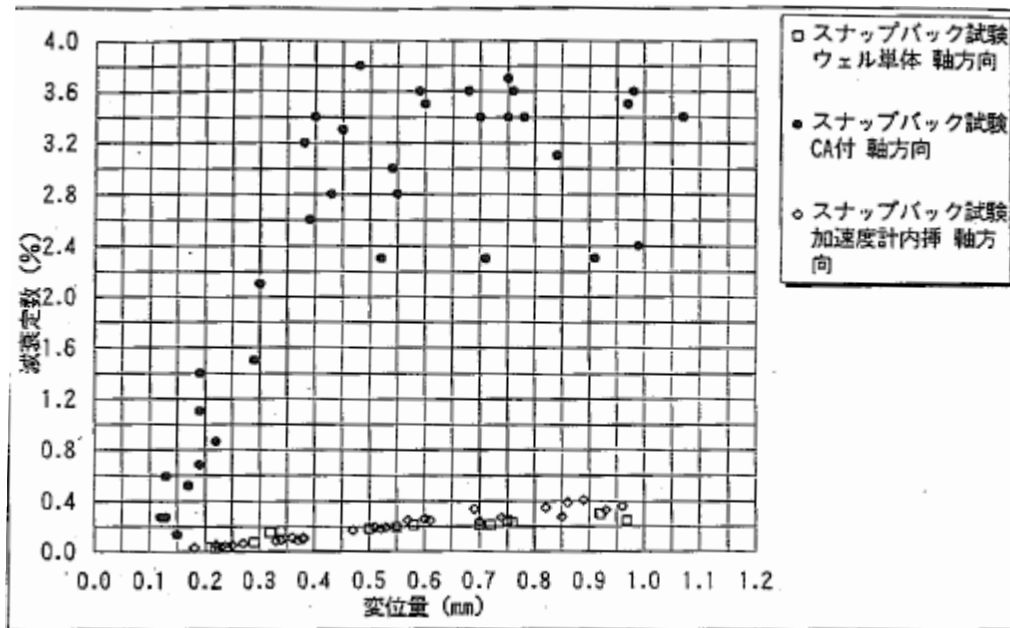
よって、抗力方向については、実機を模擬した水流動試験を行って応答特性を把握し、疲労損傷評価 (6.) を行うものとした。

第 5.2.1 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

第 5.2.2 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 固有振動数 f_n	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 $f_n > 1.3f$		



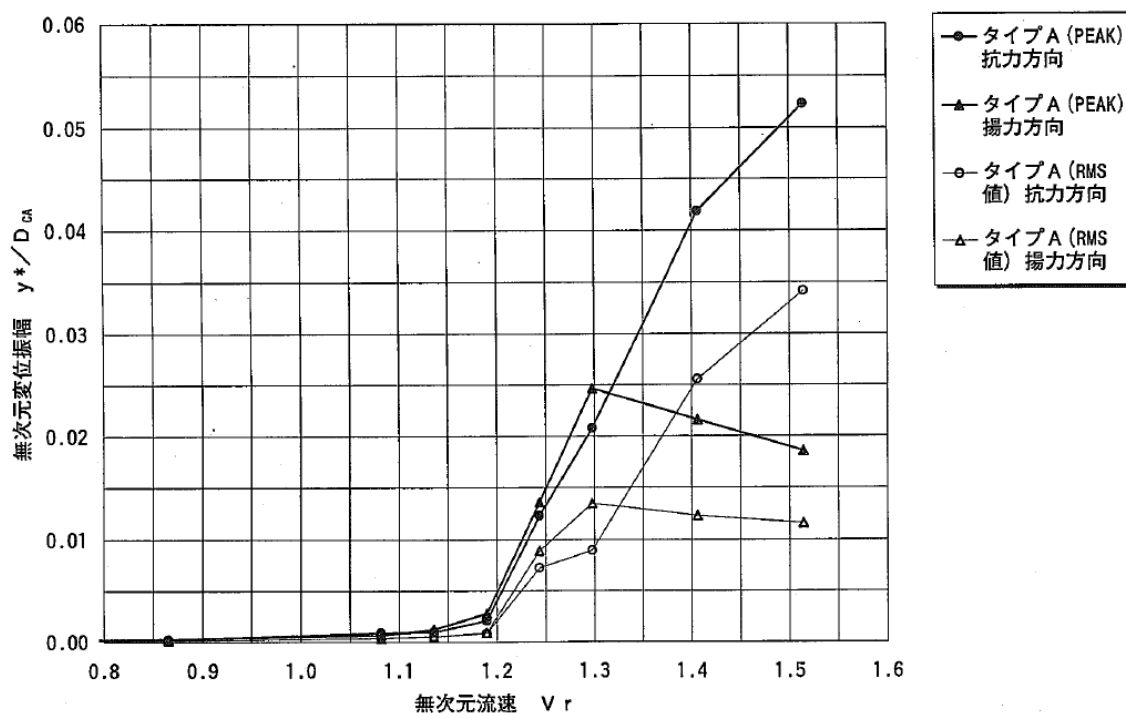
第 5.2.1 図 「常陽」 2 次主冷却系温度計ウエルの減衰定数^[1]

6. 2次主冷却系 12B 配管用温度計ウェルの疲労損傷評価

6.1 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 6.1.1 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 6.1.1 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）^[1]

6.2 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 6.2.1 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 6.2.1 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 6.2.2 表及び第 6.2.2 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。

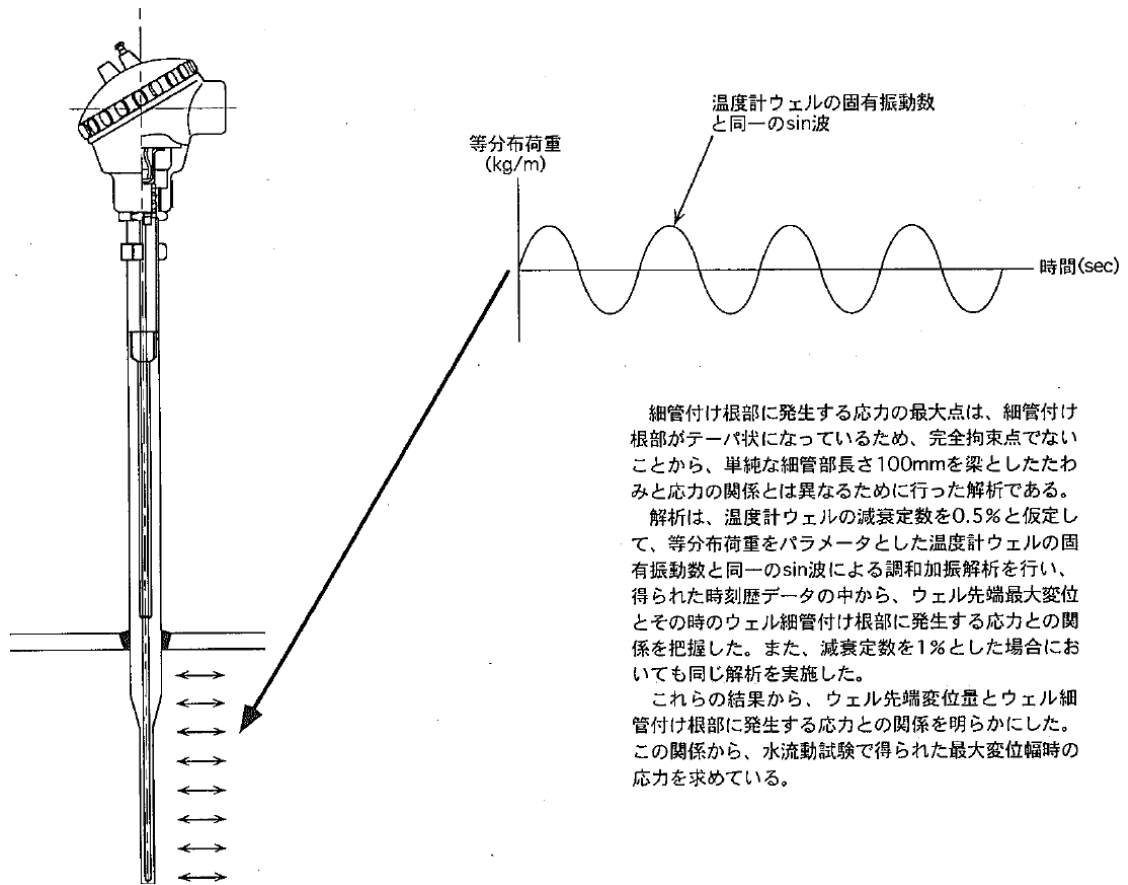
よって、「常陽」2 次主冷却系温度計ウェルが渦による振動によって損傷することはない、その構造健全性に問題ないことを確認した。

第 6. 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

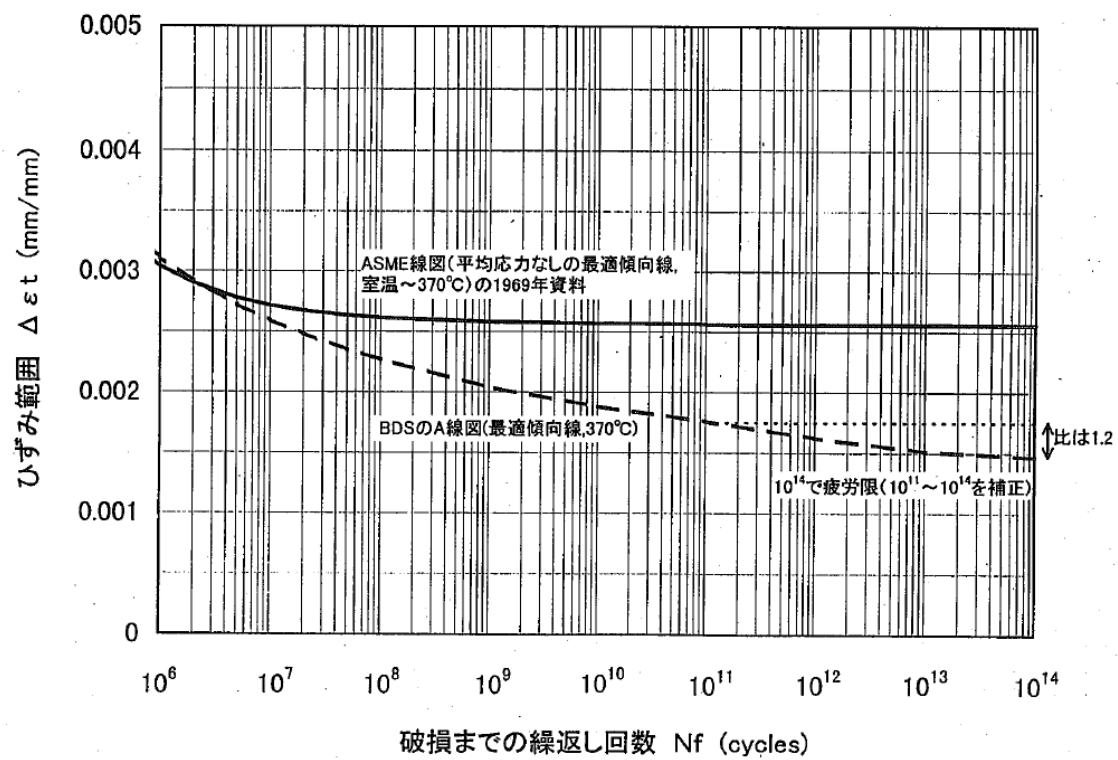
項目	備考	運転中 (MK-II 470℃)	停止中 (250℃)
流量 (100%流量)		0. 3589	0. 3378
流速 (100%流量) (m/s)		5. 15	4. 85
ウェル先端応答加速度	水流動試験結果	150	10
無次元変位振幅	水流動試験結果	0. 015	0. 001
最大変位振幅 (mm)		0. 13	0. 01
縦弾性係数 (kg/mm ²)		1. 7876×10 ⁴	1. 9764×10 ⁴
断面 2 次モーメント (mm ⁴)		260. 27	260. 27
細管部外径 (mm)		8. 60	8. 60
細管部長さ (mm)		100	100
断面係数 (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 6. 2. 2 表 材料の疲労限 (BDS)

温度 (℃)	2 1/4Cr-1Mo 鋼
20	8. 8
⋮	
250	8. 3
⋮	
450	6. 8
475	6. 3
⋮	



第 6. 2. 1 図 調和加振解析による応力算出^[1]



第 6. 2. 2 図 材料の疲労曲線^[1]

7. MK-III炉心以降での対策

MK-III改造工事により、1次主冷却系(約1100t/h→1350t/h)、2次主冷却系(約1100t/h→約1200t/h)ともループ流量は増加しており、ナトリウム流速はわずかに増加するが、2次主冷却系12B配管用温度計ウェル以外は、片持ち梁の横振動モデルによる公式計算で(a)項の揚力及び抗力方向のロックイン回避の判定($V_r < 1$)を満足することに変わりはない。

2次主冷却系12B配管用温度計ウェルは、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。短尺化により温度計ウェルの固有振動数は大きくなり、その結果無次元流速 V_r も小さくなるため、片持ち梁の横振動モデルによる公式計算で(a)項の揚力及び抗力方向のロックイン回避の判定($V_r < 1$)を満足できる。短尺化後のMK-III条件での評価結果を第7.1表に示す^[3]。第4.1表と比較すると、無次元流速 V_r はホットレグでは1.14→0.16、コールドレグでは1.07→0.15と大きく低下している。

第7.1表 短尺化後の2次主冷却系12B配管用温度計ウェルの評価結果

項目	主冷却器入口側 温度計ウェル (ホットレグ)	主冷却器出口側 温度計ウェル (コールドレグ)
渦による励振振動数 f	123 Hz	117 Hz
温度計ウェル固有振動数 f_n	3598 Hz	3721 Hz
無次元流速 V_r	0.16	0.15
判定 ($V_r < 1.0$)	合格	合格

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

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, BPVC-III.A-2021.

[3] 2次系冷却系配管の一部変更、設計及び工事の方法の認可申請書、平成11年8月。