

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

## ASME Code における単一管の 流力振動の防止指針について

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNCTN9420 96-048
決裁年月日	平成10年3月26日

1996年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

## ASME Code における単一管の流力振動の防止指針について

原因究明対策班 原因解析・試験グループ\*

### 要 旨

本報告書は、1995年12月8日に発生した「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明に関連して、ASME Codeにおける単一管の流力振動の防止指針についてまとめたものである。

---

\* 岩田 耕司 (大洗工学センター 基盤技術開発部)

## ASME Codeにおける単一管の流力振動の防止指針について

平成8年3月18日

## 1. 防止あるいは抑制すべき渦励起振動

## 1.1 揚力方向振動

2次元流れの中に撓性のある円筒が置かれた場合、円筒後流の渦は、基本的には次のストローハル関係式に従う周波数で放出される。

$$f_s = \frac{SV}{D} \quad (1)$$

ここで、 $f_s$ :渦放出周波数(ストローハル周波数),  $S$ :ストローハル数  
 $D$ :円管の外径,  $V$ :一様流速

流れのストローハル周波数が円筒の固有振動数に近い流速では、円筒の固有振動数に同期する現象、いわゆるロックイン現象が見られる(図1)。この同期振動により円筒は揚力方向に大きな振動を起こす。

Scruton(文献1)は、2次元流れの中の円筒に対して、次式で定義される無次元速度と無次元減衰パラメータを用いて図2のようにロックインが生じる不安定領域を示した。

$$\text{無次元速度: } V_r = \frac{V}{f_n D} \quad (2)$$

$$\text{無次元減衰パラメータ: } \frac{K_s}{2} = \frac{C_n}{2} = \frac{m_t \delta}{\rho D^2} \quad (3)$$

ここで、 $f_n$ :円筒の固有振動数,  $\rho$ :流体の密度,  
 $m_t$ :流体による付加質量を考慮した円筒の単位長さ当り全質量,  
 $\delta$ :円筒の対数減衰率(振動モードに対応),  
 $K_s$ :質量比・減衰パラメータ、あるいは安定性パラメータとも呼ばれるパラメータ  
 で、ASME Codeにおける $C_n$ と同一

$Re=10^3 \sim 2 \times 10^5$  ではストローハル数  $S=0.2$  であるので、 $V_r$  は  $V_r = 5(f_s / f_n)$  となり、ストローハル周波数と固有振動数の比に5を乗じた値である。

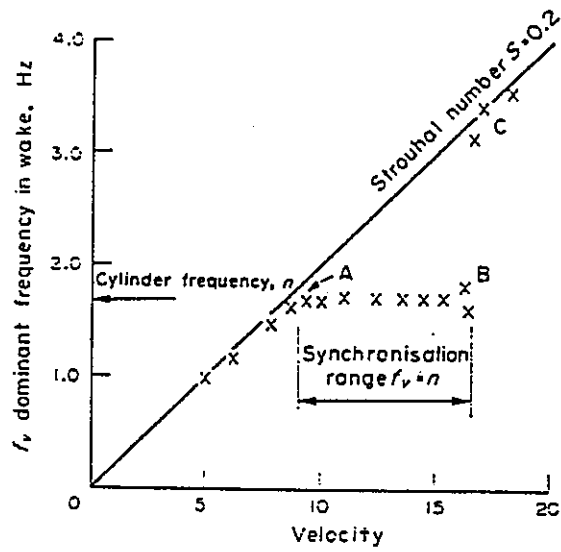


図1. 円管の放出渦のロックイン現象(文献 4)

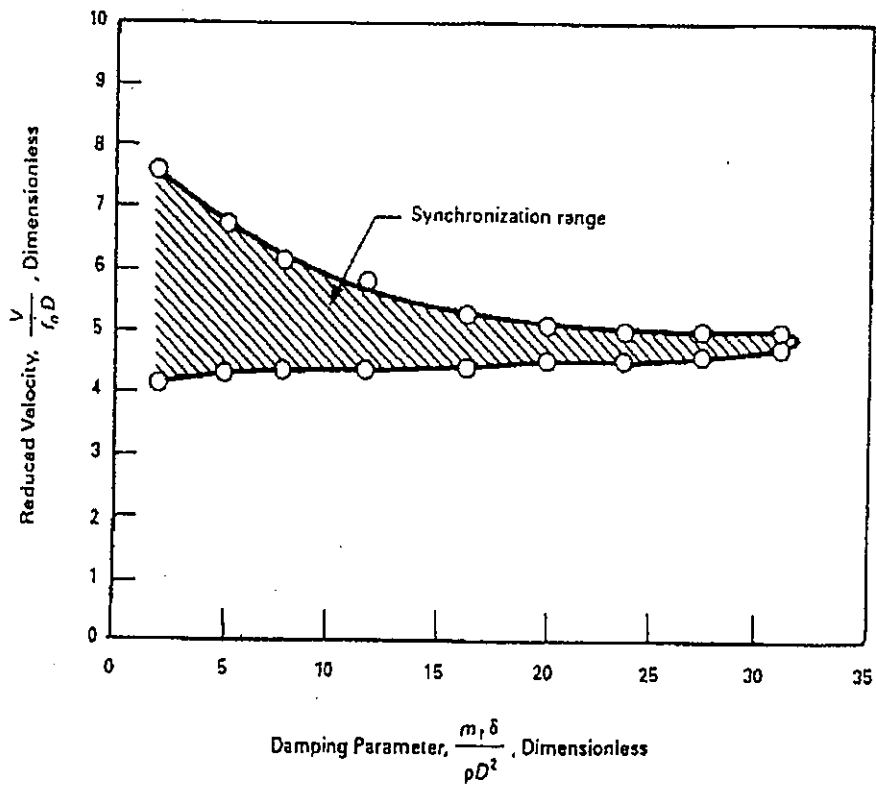


図2. ロックインの起きる領域 (ASME, 文献2)

図2より、減衰が小さい流体—構造系ではロックイン現象が起きる範囲は  $4 < V_r < 8$  であることが分かる。ロックイン範囲や最大振幅を生じる  $V_r$  は系の質量比と減衰の大きさに大きく依存する。

### 1. 2 インライン振動

渦放出周波数(ストローハル周波数)が円筒の撓み振動モードの固有振動数  $f_n$  に接近すると、 $f_n$  に同期する領域(図2)のほかに、その振動数より低い  $f_n/2$  および  $f_n/(2\sim 4)$  の近辺でも振動の励起(サブ・ハーモニック振動)が起きることが明らかにされている(文献4、5、図3参照)。これらの励起振動は流れ方向に生じ、インライン振動と呼ばれているが、その大きさは、 $f_n$  で同期したときに比べると、かなり小さいものであることが報告されている。King(文献4、5)は大気中および水中の実験から以下の特徴をもつ不安定振動領域があることを示した。

#### 第1不安定領域：対称渦

$V_r = 1.25\sim 2.5$  で流れ方向の振動が卓越し  $V_r \approx 2$  で最大となる。

このとき、円筒の両側から1サイクル当たり渦が対になって放出され、振動はほとんど流れ方向のみに生じる。

#### 第2不安定領域：交互渦

$V_r \approx 2.5$  で振動は一度小さくなり、 $2.5 < V_r < 3.8$  でまた大きくなる。

このとき、1サイクル当り渦1個が放出され、後流域に交互に渦列が生成される。振動は流れ方向(抗力方向)のほか、流れに直角方向(揚力方向)にも生じるが、流れ方向が支配的である。

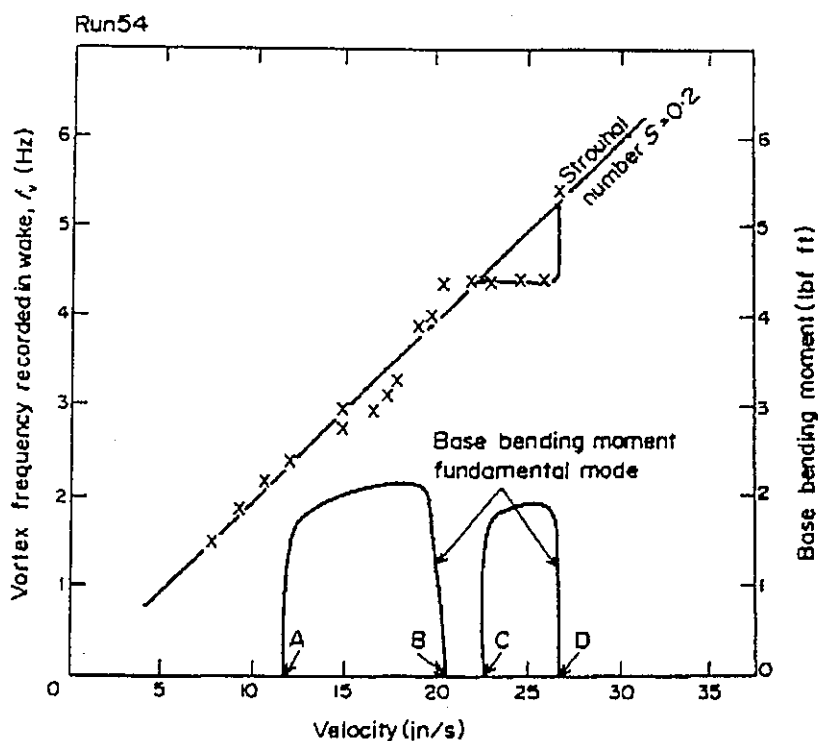


図3 円管の2つのインライン振動(Kingの実験、文献4)

1.3 渦による円管の不安定振動のまとめ

渦による円管の振動挙動において、上述のような3つのタイプの励振(不安定振動)領域が存在することが分かっているが、これらの全体の様相を模式的に示すと図4のようになる。

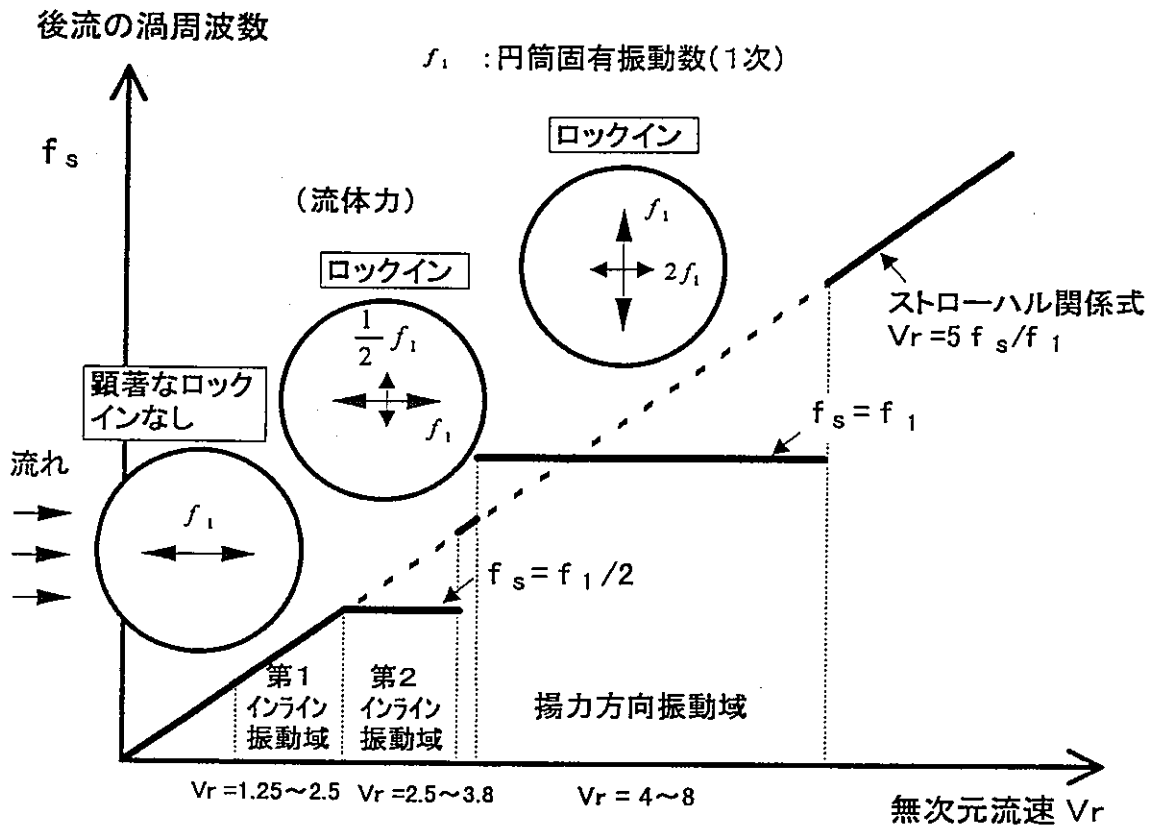


図4 円管の渦による3つの振動領域の模式図

2. ASME Code Sec. III Appendix N における取り扱い

米国の原子力プラント用の構造設計基準ASME Code Section IIIでは、1991年12月に動的解析法に関する付録(Appendix N)が新たに追加され、その中に円管や管群の流力振動に対する設計方法が、非強制(nonmandatory)という位置づけで整備された(文献2, 3)。そこでは、一様流れの中の単一の円管のロックインを回避するために(実際に応答を評価するならば必ずしもその必要はない)4つの設計対処方法が推奨されている。表1はこれらをまとめたもので、あわせて各制限式のバックグラウンドを示す。

渦によるロックイン振動を防止する方法は基本的には

- (1) 渦放出周波数と構造の固有振動数を十分離す。
- (2) 振幅を制限することでロックインを抑制する。

の2つの方法があり(文献6, 7)、ASMEの方法もそれによっている。

表1 ASME Code SecIII Appendix N における円筒のロックイン防止方法

防止基準	$V_r$ または $f$	$K_s$
(a) 揚力方向ロックインとインライン振動の回避	$V_r < 1$ * <sup>1</sup> (King)	—————
(b) 揚力方向ロックインとインライン振動の抑制	—————	$K_s > 64$ * <sup>2</sup> (Wooton, Conners)
(c) 揚力方向ロックイン回避およびインライン振動抑制	$V_r < 3.3$ * <sup>3</sup> (Scruton)	$K_s > 1.2$ * <sup>4</sup> (King)
(d) 揚力方向ロックイン回避	$f_n < 0.7f_s$ または $f_n > 1.3f_s$ * <sup>5</sup> ( $V_r < 3.85$ または $V_r > 7.14$ )	—————

\*<sup>1</sup> King ほか(1973)が、2つのインライン振動域が  $1.2 < V_r < 3.8$  にあることを実験で明らかにしたことを根拠にしている。Blevins(1977)の本にも見られる。

\*<sup>2</sup> Scruton(1981) は大気中、King ほか(1973)は水中の研磨した片持ちはりの実験から、 $K_s > 17$ で揚力方向ロックインは抑制できるとした。Wooton(1969)は表面粗さ等を考慮すれば  $K_s > 64$ が必要としている。Conners(1981)もこれを支持した。  
通常、液体の場合は  $K_s = 0.1 \sim 10$ なので役に立たない。

\*<sup>3</sup> Scruton(1963) が  $V_r < 4$  で揚力方向ロックインは回避されるとした。

\*<sup>4</sup> King ほか(1973)は  $K_s > 1.2$  により2つのインライン振動を抑制できるとした。

\*<sup>5</sup>  $f$ による表記は、ストローハル数を  $S = 0.2$  とすると、 $V_r = 5(f_s / f_n)$  が得られることから  $V_r$ による表記と等価である。ASME Performance Test Code の熱電対に関する設計ガイドでは  $f_s < 0.8f_n$  ( $f_n > 1.25f_s$ )となっているが、Appendix Nでは、これより若干厳しい制限式を採用する一方、ストローハル周波数以下での設計が許容されるようになった。



ここでの設計の考え方は、まず第1に振動数を離すこと、それが不可能な場合には、減衰パラメータをある制限値以上に取り、振動を問題のないレベルに抑えるということである。

表1から明らかなように、ASMEの方法は、前述の3つのタイプの不安定振動を防止することを意図して策定されているが、適用に当たっては、(a)～(d)の各制限式で防止できる振動のタイプに注意しなければならない。特に(d)に関しては、インライン振動は念頭に置かれていないことに注意する必要がある。

ASMEの4つの防止方法を、Scrutonの線図上に示すと図5のようになる。図中の(a)，(b)，(c)，(d)のいずれかの領域で設計すれば、円管の抗力方向および揚力方向の励振が回避あるいは抑制される。ここでは、参考のために、Kingの報告にあるインライン振動の不安定領域も重ねて示した。

「もんじゅ」2次系配管の健全な温度計ウェルは、定格100%流量条件(325℃)では、 $V_r = 2.1$ ， $K_s = 0.84$ となり、揚力方向振動を回避する条件(d)は満足しているが、インライン振動は起こり得る。40%流量条件(500℃)では $V_r = 0.86$ ， $K_s = 0.84$ となり、揚力方向振動、インライン振動とも回避されており問題とならない。

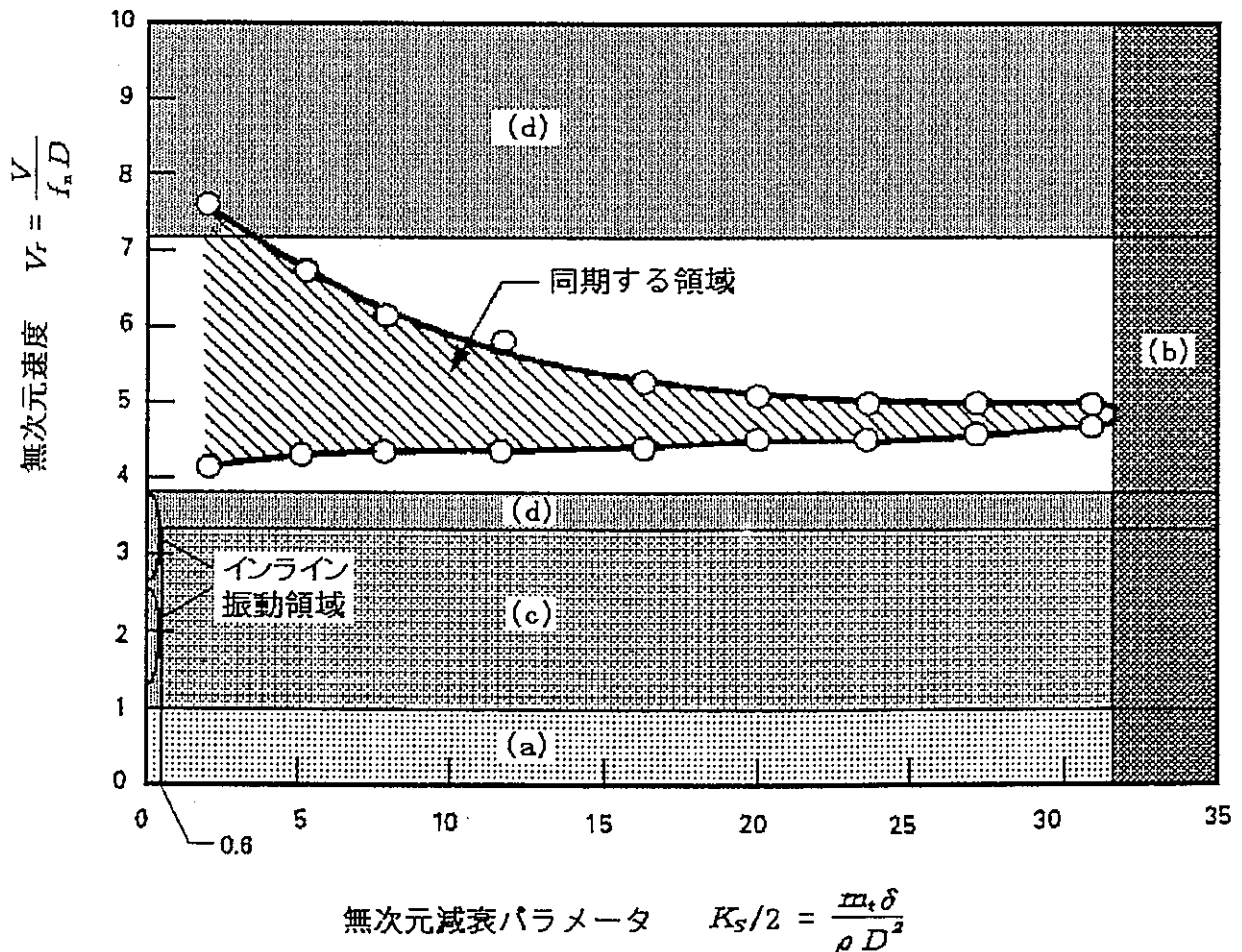


図5 インライン振動を含む渦励起不安定振動の領域図

参考文献

1. Scruton, C. : On the wind-excited oscillations of stacs, towers and masts, Proc. of the Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Paper 16, Teddington, 1963, pp. 798-833
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1, Appendix N-1300, ASME, 1995.
3. Au-Yang, M. K. : Design guides, codes, and standards in flow-induced vibration and fluid-structure interaction, Technology for the '90s, A Decade of Progress The ASME Pressure Vessels and Piping Division (ed. Au-Yang, M. K. ), ASME, 1993, p. 959
4. King, R. , Prosser, M. and Johns, D. J. : On vortex excitation of model piles in water, Journal of Sound and Vibration, 29(2), 1973, pp. 169-188
5. King, R. : A review of vortex shedding research and its application, Ocean Engng. Vol. 4, 1977, pp. 141-172
6. Blevins, R. D. : Flow-induced vibration, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977
7. Mulcahy, T. M. : Avoidance of the lock-in phenomenon in partial crossflow, Journal of Sound and Vibration, 112(3), 1987, pp. 570-574