

本資料のうち、枠囲みの内容は  
商業機密の観点から公開できま  
せん。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-08-0034_改0
提出年月日	2021年3月26日

### VI-3-3-6-1-4-3 原子炉格納容器配管貫通部ベローズの強度計算書

02 ③ VI-3-3-6-1-4-3 R1

2021年3月  
東北電力株式会社

## 目次

1.	概要	1
2.	一般事項	1
2.1	構造計画	1
2.2	評価方針	3
2.3	適用基準	3
2.4	記号の説明	4
2.5	計算精度と数値の丸め方	4
3.	評価部位	5
3.1	形状及び主要寸法	5
3.2	材料及び縦弾性係数	6
4.	強度評価	7
4.1	疲労評価方法	7
4.2	評価条件	7
4.3	設計繰返し回数	7
4.4	ベローズの全伸縮量	8
4.5	許容繰返し回数の計算	9
4.6	評価	9
5.	評価結果	11

## 1. 概要

本計算書は、原子炉格納容器配管貫通部ベローズ（以下「ベローズ」という。）の強度計算書である。

ベローズは、原子炉格納容器の配管貫通部に設けられており、設計基準対象施設の原子格納容器と同様に重大事故等クラス2容器として兼用する機器である。

以下、重大事故等クラス2容器として、添付書類「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」及び「VI-3-1-5 重大事故等クラス2機器及び重大事故等クラス2支持構造物の強度計算の基本方針」に基づき、ベローズの強度評価を示す。

## 2. 一般事項

### 2.1 構造計画

ベローズの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
ベローズは原子炉格納容器配管貫通部の一部に設けられる。	2層の複層板からなる断面蛇腹形状のステンレス製構造物である。	<p>The technical drawing consists of two parts. The upper part is a detailed cross-section of a bellows joint, showing a multi-layered structure with a corrugated (bellows) section. An arrow points to this section with the label 'ベローズ' (Bellows). The lower part is a schematic diagram of the reactor containment vessel, showing a central vertical vessel with two large circular penetrations at the top and bottom. Arrows point to the bellows at these penetrations, with the label 'ベローズ' and a circled 'A' indicating the detail shown in the upper drawing.</p> <p style="text-align: center;">A部詳細</p>

## 2.2 評価方針

ベローズの強度評価は、添付書類「VI-1-8-1 原子炉格納施設の設計条件に関する説明書」及び「VI-3-1-5 重大事故等クラス2機器及び重大事故等クラス2支持構造物の強度計算の基本方針」に基づき、「4. 強度評価」に示す方法にて疲労評価することで実施する。評価結果を「5. 評価結果」に示す。

ベローズの強度評価フローを図 2-1 に示す。

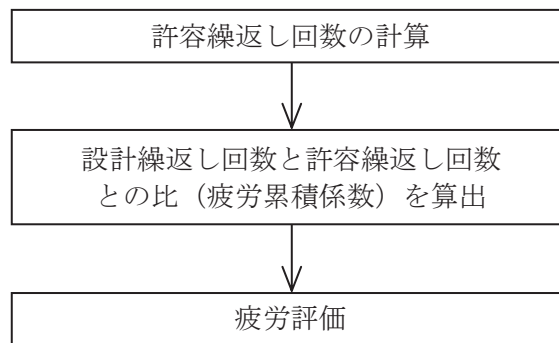


図 2-1 ベローズの強度評価フロー

## 2.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和 55 年 10 月 30 日 通商産業省告示第 501 号）（以下「告示第 501 号」という。）

## 2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
b	長さ	mm
c	層数	—
E	縦弾性係数	MPa
h	高さ	mm
N	設計繰返し回数	—
N <sub>s</sub>	許容繰返し回数	—
n	波数の2倍の値	—
P <sub>D</sub>	圧力 (最高使用圧力)	kPa
P <sub>SA</sub>	圧力 (SA 短期圧力)	kPa
T <sub>O</sub>	温度 (通常運転時)	°C
T <sub>D</sub>	温度 (最高使用温度)	°C
T <sub>SA</sub>	温度 (SA 短期温度)	°C
t	板厚	mm
δ	伸縮量	mm
σ	応力	MPa

## 2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりとする。

表2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
全伸縮量	mm	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容繰返し回数	—	有効数字5桁目	切捨て	有効数字4桁
疲労累積係数	—	有効数字4桁目	切上げ	有効数字3桁

### 3. 評価部位

#### 3.1 形状及び主要寸法

ベローズの形状を図 3-1 に、ベローズの主要寸法を表 3-1 に示す。



図 3-1 ベローズの形状

VI-3-3-6-1-4-3 R 1  
O 2 ③

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 3-1 ベローズの主要寸法

(単位：mm)

貫通部番号	形 状				
	b *	h *	t *	n *	c *
X-10A, B, C, D					
X-11					
X-12A, B					
X-31A, B, C					
X-32A, B					
X-33A, B					
X-34					
X-35					
X-36					
X-37					
X-50					

注記\*：記号の説明は図 3-1 参照

O 2 ③ VI-3-3-6-1-4-3 R 1

### 3.2 材料及び縦弾性係数

(1) 材料

ベローズ

SUS316L

(2) 縦弾性係数

縦弾性係数E

$1.93 \times 10^5$  MPa (57°C)

$1.86 \times 10^5$  MPa (171°C)

$1.83 \times 10^5$  MPa (200°C)



4. 強度評価

4.1 疲労評価方法

設計繰返し回数が、告示第501号第28条より算出した許容繰返し回数を超えないことを確認する。

設計繰返し回数は、通常運転、設計条件（地震時含む）及び重大事故条件の3種類であるため、設計繰返し回数と許容繰返し回数との比をそれぞれ加えた値（疲労累積係数）が許容値以下であることを確認する。

4.2 評価条件

(1) 設計基準対象施設としての圧力及び温度

通常運転温度	$T_O$	57℃
最高使用圧力	$P_D$	427 kPa
最高使用温度	$T_D$	171℃

(2) 重大事故等対処設備としての評価圧力及び評価温度

内圧	$P_{SA}$	854 kPa
温度	$T_{SA}$	200℃

(3) ベローズ設計変位量

重大事故条件のベローズ設計変位量を表4-1に示す。表4-1に示す変位量は、すべての貫通部を包絡する値を用いる。

表 4-1 ベローズの設計変位量

(単位：mm)

$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$

4.3 設計繰返し回数

設計繰返し回数Nを表4-2に示す。

表 4-2 設計繰返し回数

(単位：回)

通常運転 $N_1$	設計条件 $N_2$	重大事故条件 $N_3$

4.4 ベローズの全伸縮量

ベローズの全伸縮量  $\delta$  を表 4-3 に示す。

表 4-3 ベローズの全伸縮量

(単位：mm)

貫通部番号	全伸縮量 $\delta$		
	通常運転	設計条件	重大事故条件
X-10A			
X-10B			
X-10C			
X-10D			
X-11			
X-12A			
X-12B			
X-31A			
X-31B			
X-31C			
X-32A			
X-32B			
X-33A			
X-33B			
X-34			
X-35			
X-36			
X-37			
X-50			

全伸縮量  $\delta$  は、次の計算式より計算した値

$$\delta = \delta_x + \frac{3 \cdot D_b \cdot \sqrt{\delta_y^2 + \delta_z^2}}{L + \ell \{(\ell/L) + 1\}}$$

ここに、

$D_b$  : ベローズ平均径 (mm)

$L$  : ベローズ間距離 (mm)

$\ell$  : 中間パイプ長さ (mm)

$\delta_x$  : 貫通部軸方向の変位量 (mm)

$\delta_y, \delta_z$  : 互いに直交する貫通部軸直角方向の変位量 (mm)

#### 4.5 許容繰返し回数の計算

ベローズの許容繰返し回数は

$$N_s = \left( \frac{11032}{\sigma} \right)^{3.5}$$

ここに、 $\sigma$  はベローズに生じる応力であって次の計算式より計算した値

$$\sigma = \frac{1.5 \cdot E \cdot t \cdot \delta}{n \cdot \sqrt{b \cdot h^3}} + \frac{P \cdot h^2}{2 \cdot t^2 \cdot c} \quad (\text{調整リングが付いていない場合})$$

$$\sigma = \frac{1.5 \cdot E \cdot t \cdot \delta}{n \cdot \sqrt{b \cdot h^3}} + \frac{P \cdot h}{t \cdot c} \quad (\text{調整リングが付いている場合})$$

当該ベローズは調整リング付きであるものの、調整リングがベローズの外側に取付けられているので、通常運転時（外圧付加時）は調整リングが付いていない場合の式により計算する。設計条件及び重大事故条件（内圧付加時）は、調整リングが付いている場合の式によりベローズに生じる応力を計算する。

#### 4.6 評価

設計繰返し回数と許容繰返し回数との比をそれぞれ加えた値（疲労累積係数）が許容値以下であることを確認する。

$$\frac{N_1}{N_{s1}} + \frac{N_2}{N_{s2}} + \frac{N_3}{N_{s3}} < 1$$

表 4-4 ベローズの設計繰返し回数と許容繰返し回数の比

貫通部番号	$N_{S1}$	$\frac{N_1}{N_{S1}}$	$N_{S2}$	$\frac{N_2}{N_{S2}}$	$N_{S3}$	$\frac{N_3}{N_{S3}}$
X-10A		$3.12 \times 10^{-2}$		$6.94 \times 10^{-2}$		$3.11 \times 10^{-3}$
X-10B		$3.85 \times 10^{-2}$		$9.01 \times 10^{-2}$		$3.11 \times 10^{-3}$
X-10C		$4.69 \times 10^{-2}$		$1.30 \times 10^{-1}$		$3.11 \times 10^{-3}$
X-10D		$5.66 \times 10^{-2}$		$1.87 \times 10^{-1}$		$3.11 \times 10^{-3}$
X-11		$3.88 \times 10^{-1}$		$5.15 \times 10^{-1}$		$1.98 \times 10^{-3}$
X-12A		$8.86 \times 10^{-2}$		$1.30 \times 10^{-1}$		$2.25 \times 10^{-3}$
X-12B		$1.10 \times 10^{-1}$		$2.11 \times 10^{-1}$		$2.25 \times 10^{-3}$
X-31A		$9.65 \times 10^{-3}$		$4.91 \times 10^{-2}$		$1.17 \times 10^{-3}$
X-31B		$7.03 \times 10^{-3}$		$3.47 \times 10^{-2}$		$1.17 \times 10^{-3}$
X-31C		$7.49 \times 10^{-3}$		$3.96 \times 10^{-2}$		$1.17 \times 10^{-3}$
X-32A		$2.59 \times 10^{-3}$		$5.87 \times 10^{-3}$		$1.33 \times 10^{-3}$
X-32B		$4.28 \times 10^{-3}$		$1.13 \times 10^{-2}$		$1.33 \times 10^{-3}$
X-33A		$4.61 \times 10^{-3}$		$1.23 \times 10^{-2}$		$1.53 \times 10^{-3}$
X-33B		$3.64 \times 10^{-3}$		$6.86 \times 10^{-3}$		$1.53 \times 10^{-3}$
X-34		$7.97 \times 10^{-3}$		$3.24 \times 10^{-2}$		$1.17 \times 10^{-3}$
X-35		$3.64 \times 10^{-3}$		$1.08 \times 10^{-2}$		$1.17 \times 10^{-3}$
X-36		$1.81 \times 10^{-1}$		$3.83 \times 10^{-1}$		$2.31 \times 10^{-3}$
X-37		$1.18 \times 10^{-1}$		$3.01 \times 10^{-1}$		$2.31 \times 10^{-3}$
X-50		$1.40 \times 10^{-1}$		$1.35 \times 10^{-1}$		$1.02 \times 10^{-3}$

O 2 ③ VI-3-3-6-1-4-3 R 1

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. 評価結果

ベローズの重大事故等対処設備としての強度評価結果を以下に示す。

疲労累積係数は許容値を満足している。

表 5-1 評価結果

評価部位	$\frac{N_1}{N_{S1}}$	$\frac{N_2}{N_{S2}}$	$\frac{N_3}{N_{S3}}$	疲労累積係数 $(\frac{N_1}{N_{S1}} + \frac{N_2}{N_{S2}} + \frac{N_3}{N_{S3}})$	許容値	判定
X-10A				$1.04 \times 10^{-1}$	1	○
X-10B				$1.32 \times 10^{-1}$	1	○
X-10C				$1.80 \times 10^{-1}$	1	○
X-10D				$2.46 \times 10^{-1}$	1	○
X-11				$9.05 \times 10^{-1}$	1	○
X-12A				$2.20 \times 10^{-1}$	1	○
X-12B				$3.23 \times 10^{-1}$	1	○
X-31A				$5.99 \times 10^{-2}$	1	○
X-31B				$4.29 \times 10^{-2}$	1	○
X-31C				$4.82 \times 10^{-2}$	1	○
X-32A				$9.79 \times 10^{-3}$	1	○
X-32B				$1.69 \times 10^{-2}$	1	○
X-33A				$1.84 \times 10^{-2}$	1	○
X-33B				$1.21 \times 10^{-2}$	1	○
X-34				$4.15 \times 10^{-2}$	1	○
X-35				$1.56 \times 10^{-2}$	1	○
X-36				$5.65 \times 10^{-1}$	1	○
X-37				$4.21 \times 10^{-1}$	1	○
X-50				$2.76 \times 10^{-1}$	1	○