

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3
提出年月日	2021年10月21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10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
6.	参照図書	12

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。

なお、本計算書においては、重大事故等時における荷重に対して、平成2年5月24日付け元資庁第14466号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)）（以下「既工認」という。）に示す手法に従い強度評価を行う。

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	
<p>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ており、貫通部は原子炉格納容器外側で原子炉建屋にアンカされ、ベローズによって原子炉建屋とドライウエルの相対変位を吸収する構造となっている。</p>	<p>ベローズは、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>	

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。

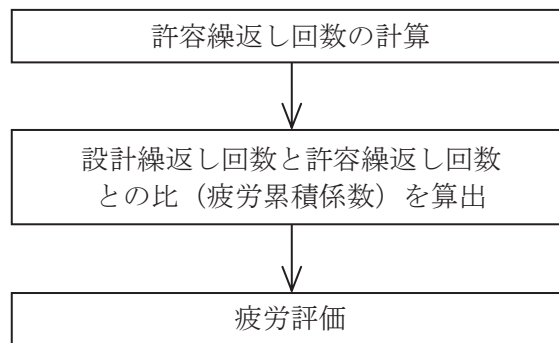


図 2-1 ベローズの強度評価フロー

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	ベローズの波のピッチの2分の1	mm
c	ベローズの層数	—
E	縦弾性係数	MPa
h	ベローズの波の高さ	mm
N	設計繰返し回数	—
N _s	許容繰返し回数	—
n	ベローズの波数の2倍の値	—
P _D	圧力 (最高使用圧力)	kPa
P _{SA}	圧力 (SA 短期圧力)	kPa
T _O	温度 (通常運転時)	°C
T _D	温度 (最高使用温度)	°C
T _{SA}	温度 (SA 短期温度)	°C
t	厚さ	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

貫通部番号	記 号				
	b (mm)	h (mm)	t (mm)	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					

O 2 ③ VI-3-3-6-1-4-3 R 2

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

1.93×10^5 MPa (57°C)

1.86×10^5 MPa (171°C)

1.83×10^5 MPa (200°C)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

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。

なお、設計条件に用いる地震動として、弾性設計用地震動 S_d の等価繰返し回数と変位量を用いた疲労累積係数よりも、基準地震動 S_s の等価繰返し回数と変位量を用いた疲労累積係数の方が大きくなることから、基準地震動 S_s による条件を用いる。

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)

δ_x	δ_y	δ_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 δ 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 δ		
	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 δ 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)

ℓ : 中間パイプ長さ (mm)

δ_x : 貫通部軸方向の変位量 (mm)

δ_y, δ_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

$$N_s = \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5}$$

ここに、 σ 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り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		3.12×10^{-2}		6.94×10^{-2}		3.11×10^{-3}
X-10B		3.85×10^{-2}		9.01×10^{-2}		3.11×10^{-3}
X-10C		4.69×10^{-2}		1.30×10^{-1}		3.11×10^{-3}
X-10D		5.66×10^{-2}		1.87×10^{-1}		3.11×10^{-3}
X-11		3.88×10^{-1}		5.15×10^{-1}		1.98×10^{-3}
X-12A		8.86×10^{-2}		1.30×10^{-1}		2.25×10^{-3}
X-12B		1.10×10^{-1}		2.11×10^{-1}		2.25×10^{-3}
X-31A		9.65×10^{-3}		4.91×10^{-2}		1.17×10^{-3}
X-31B		7.03×10^{-3}		3.47×10^{-2}		1.17×10^{-3}
X-31C		7.49×10^{-3}		3.96×10^{-2}		1.17×10^{-3}
X-32A		2.59×10^{-3}		5.87×10^{-3}		1.33×10^{-3}
X-32B		4.28×10^{-3}		1.13×10^{-2}		1.33×10^{-3}
X-33A		4.61×10^{-3}		1.23×10^{-2}		1.53×10^{-3}
X-33B		3.64×10^{-3}		6.86×10^{-3}		1.53×10^{-3}
X-34		7.97×10^{-3}		3.24×10^{-2}		1.17×10^{-3}
X-35		3.64×10^{-3}		1.08×10^{-2}		1.17×10^{-3}
X-36		1.81×10^{-1}		3.83×10^{-1}		2.31×10^{-3}
X-37		1.18×10^{-1}		3.01×10^{-1}		2.31×10^{-3}
X-50		1.40×10^{-1}		1.35×10^{-1}		1.02×10^{-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				1.04×10^{-1}	1	○
X-10B				1.32×10^{-1}	1	○
X-10C				1.80×10^{-1}	1	○
X-10D				2.46×10^{-1}	1	○
X-11				9.05×10^{-1}	1	○
X-12A				2.20×10^{-1}	1	○
X-12B				3.23×10^{-1}	1	○
X-31A				5.99×10^{-2}	1	○
X-31B				4.29×10^{-2}	1	○
X-31C				4.82×10^{-2}	1	○
X-32A				9.79×10^{-3}	1	○
X-32B				1.69×10^{-2}	1	○
X-33A				1.84×10^{-2}	1	○
X-33B				1.21×10^{-2}	1	○
X-34				4.15×10^{-2}	1	○
X-35				1.56×10^{-2}	1	○
X-36				5.65×10^{-1}	1	○
X-37				4.21×10^{-1}	1	○
X-50				2.76×10^{-1}	1	○

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。

6. 参照図書

(1) 女川原子力発電所第2号機 第2回工事計画認可申請書

添付書類「IV-3-1-2-6 原子炉格納容器配管貫通部ベローズの強度計算書」