

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 添-2-066 改0
提出年月日	2024年1月10日

VI-2-別添 3-4 可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備の耐震計算書

2024年1月

東京電力ホールディングス株式会社

## 目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 配置	1
2.2 構造概要	1
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格・基準等	6
3. 固有値解析	7
3.1 基本方針	7
3.2 解析方法	7
3.2.1 高圧窒素ガスポンベ	7
3.2.2 遠隔空気駆動弁操作用ポンベ	8
3.3 解析モデル及び諸元	9
3.4 固有値解析結果	14
4. 構造強度評価	15
4.1 基本方針	15
4.2 評価部位	15
4.3 荷重及び荷重の組合せ	16
4.4 許容限界	16
4.5 設計用地震力	17
4.6 評価方法	18
5. 波及的影響評価	21
5.1 基本方針	21
6. 評価条件	21
7. 評価結果	24
7.1 構造強度評価結果	24
7.2 波及的影響評価結果	24

## 1. 概要

本資料は、VI-2-別添3-1「可搬型重大事故等対処設備の耐震計算の方針」（以下「別添3-1」という。）に示すとおり、可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備が地震後において、基準地震動  $S_s$  による地震力に対し、十分な構造強度を有するとともに、当該設備による波及的影響を防止する必要がある他の設備に対して波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。その耐震評価は、固有値解析、構造強度評価及び波及的影響評価により行う。

7号機設備、6,7号機共用の可搬型重大事故等対処設備のうちポンベ設備の耐震性に関する説明は、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設計及び工事の計画のV-2-別添3-4「可搬型重大事故等対処設備のうちその他ポンベ設備の耐震計算書」による。

## 2. 基本方針

別添3-1の「2. 耐震評価の基本方針」に示す構造計画のとおり、ポンベ設備の「2.1 配置」及び「2.2 構造概要」を示す。

### 2.1 配置

ポンベ設備は、別添3-1の「2.1 評価対象設備」のうち構造計画に示すとおり、原子炉建屋（T.M.S.L. 4.8m, T.M.S.L. 18.1m, T.M.S.L. 31.7m）に保管する。

### 2.2 構造概要

ポンベ設備の構造は、別添3-1の「2.1 評価対象設備」に示す構造計画としており、ポンベ設備の構造計画を表2-1に、ポンベ設備の概略構造図を図2-1～図2-3に示す。

表 2-1 ポンベ設備の構造計画

設備名称	計画の概要		概略 構造図
	主体構造	基礎・支持構造	
高圧窒素ガス ポンベ	窒素ポンベ及びポンベの支持 構造物であるポンベラックに より構成する。	窒素ポンベは、容器として十 分な強度を有する構造とし、 固定ボルトによりポンベラッ クに固定し、ポンベラックを 溶接により床及び壁に据え付 ける。	図2-1 図2-2
遠隔空気駆動弁 操作ポンベ	窒素ポンベ及びポンベの支持 構造物であるポンベラックに より構成する。	窒素ポンベは、容器として十 分な強度を有する構造とし、 固定ボルトによりポンベラッ クに固定し、ポンベラックを 溶接により床に据え付ける。	図2-3

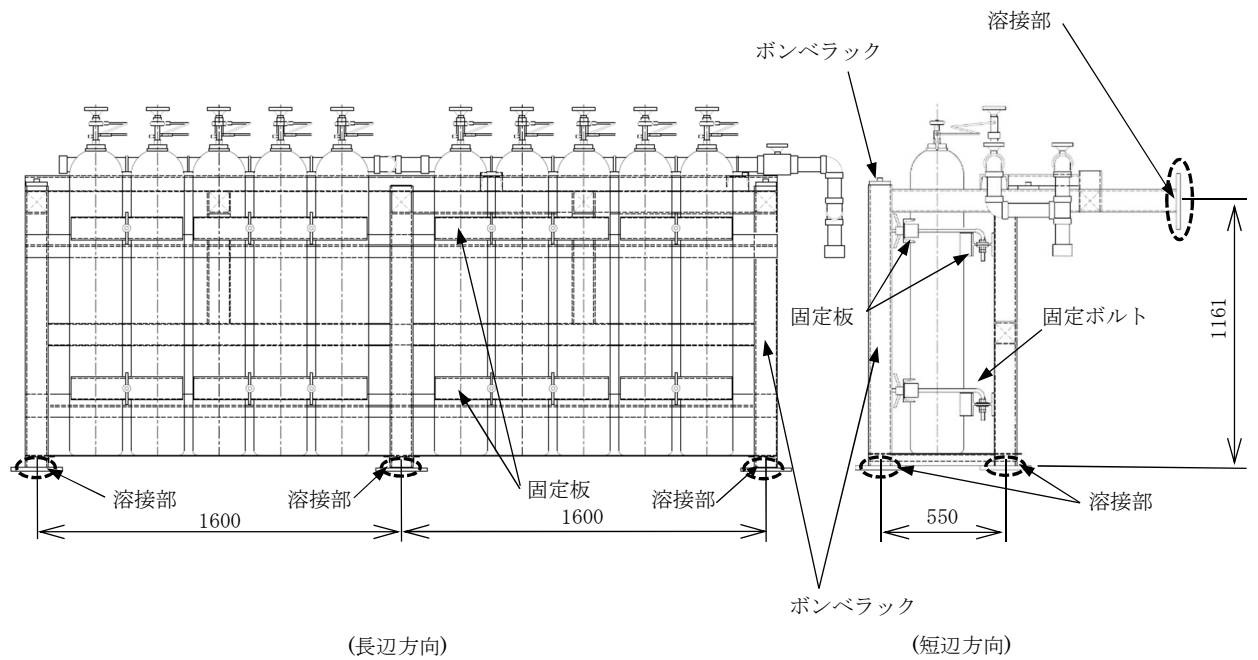


図2-1 高圧窒素ガスポンベ（10個組）の概略構造図（単位：mm）

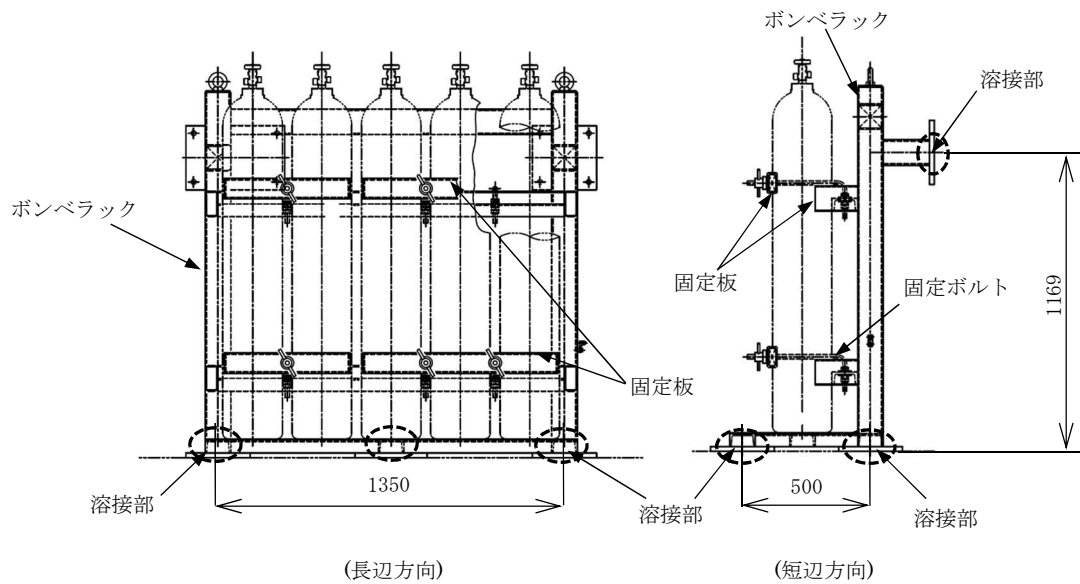


図2-2 高圧窒素ガスポンベ（5個組）の概略構造図（単位：mm）

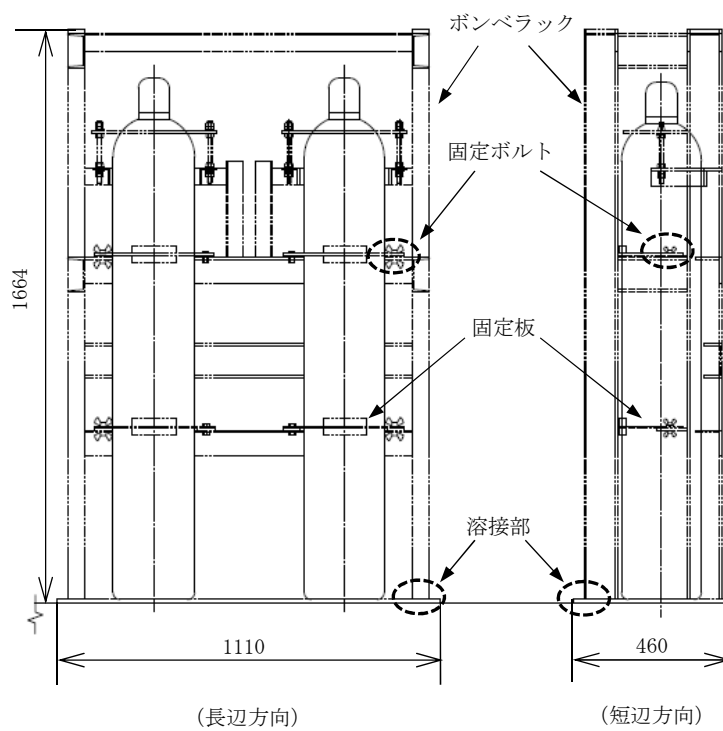


図2-3 遠隔空気駆動弁操作ポンベの概略構造図 (単位: mm)

## 2.3 評価方針

ポンベ設備の評価方針を以下に示し、耐震評価フローを図 2-4 に示す。

### (1) 構造強度評価

ポンベ設備は、別添 3-1 の「2.2(1) ポンベ設備」にて設定した構造強度評価の方針に従い、構造強度評価を実施する。

ポンベ設備の構造強度評価は、「3. 固有値解析」にて得られた固有周期を用い、「4. 構造強度評価」に示す方法により、ポンベ設備の評価部位に作用する応力が許容限界を満足することを確認する。確認結果を「7. 評価結果」に示す。

別添 3-1 の「2.2 評価方針」に示す評価部位のうち直接支持構造物としてのポンベラック、溶接部の構造強度評価については、J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 に規定されているその他の支持構造物の評価に従い実施する。

### (2) 波及的影響評価

ポンベ設備は、別添 3-1 の「2.2(1) ポンベ設備」にて設定した波及的影響評価の方針に従い、波及的影響評価を実施する。

ポンベ設備の波及的影響評価は、「5. 波及的影響評価」に示す方法により、基準地震動  $S_s$  による地震力に対し、当該設備による波及的影響を防止する必要がある他の設備に対して波及的影響を及ぼさないことを、「2.3(1) 構造強度評価」により確認する。確認結果を「7. 評価結果」に示す。

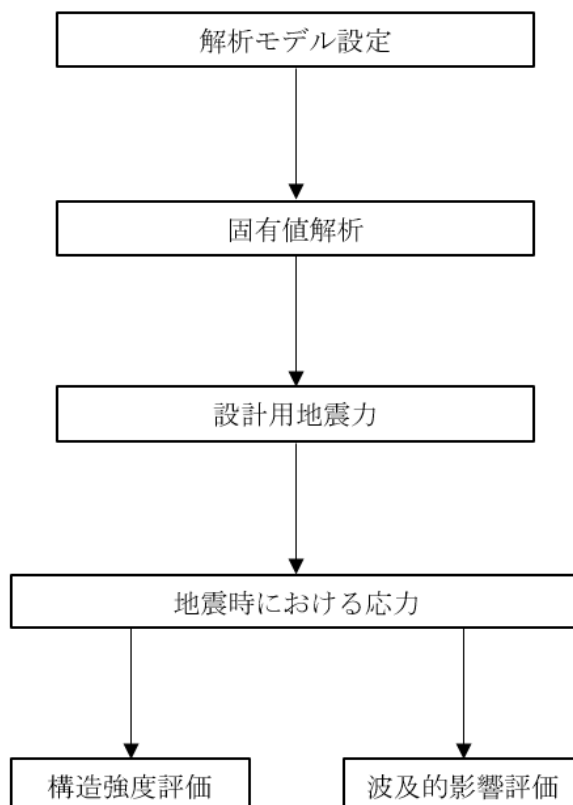


図 2-4 ポンベ設備の耐震評価フロー

#### 2.4 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984  
((社) 日本電気協会)
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- (4) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007)



### 3. 固有値解析

#### 3.1 基本方針

別添 3-1 の「4.1(1) 固有値解析」にて設定した基本方針に従い、固有値解析を実施する。  
固有値解析は、以下の「3.2 解析方法」に示す方法により、「3.3 解析モデル及び諸元」に示す解析モデルを用いて、「3.4 固有値解析結果」においてポンベ設備の固有周期を求める。

#### 3.2 解析方法

##### 3.2.1 高圧窒素ガスポンベ

- (1) ポンベラックを構成する鋼材をはり要素（形鋼等）としてモデル化した有限要素モデルによる固有値解析を実施する。
- (2) 拘束条件として、ポンベラックは、溶接により X, Y, Z の 3 方向を固定として設定する。
- (3) ポンベ本体は、基準地震動  $S_s$  による地震力に対して転倒しないことを目的としたポンベラックに、固定ボルト及び固定板にて固定され収納されている。
- (4) ポンベラックに収納・固定されるポンベ及び配管・弁等の機器重量は、各々組込む位置に相当する各質点に付加する。
- (5) 各ポンベからヘッダーへの連絡管は、接続を容易にするため可とう性をもつ形状としており、地震時にはポンベとヘッダーの相対変位は微小であることから、地震時の変位を十分吸収できるものである。
- (6) 解析コードは、「NX NASTRAN」を使用する。なお、解析コードの検証、妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。
- (7) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

### 3.2.2 遠隔空気駆動弁操作用ポンペ

- (1) ポンペラックを構成する鋼材をはり要素（形鋼等）としてモデル化した有限要素モデルによる固有値解析を実施する。
- (2) 拘束条件として、ポンペラックは、溶接により X, Y, Z の 3 方向を固定として設定する。
- (3) ポンペ本体は、基準地震動  $S_s$  による地震力に対して転倒しないことを目的としたポンペラックに、固定ボルト及び固定板にて固定され収納されている。ここで、ポンペ本体は高圧ガス適用品であり、一般的な圧力容器に比べ、高い耐圧強度を有することから、はるかに剛性が高いものであるが、解析上、断面性状を考慮したはり要素としてモデル化する。
- (4) 各ポンペから配管への連絡管は、接続を容易にするため可とう性をもつ形状としていること、地震時にはポンペと配管の相対変位は微小であることから、地震時の変位を十分吸収できるものである。
- (5) 解析コードは、「NAPF」を使用する。なお、解析コードの検証、妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。
- (6) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

### 3.3 解析モデル及び諸元

#### (1) 高圧窒素ガスポンペ

高圧窒素ガスポンペは、ボンベラックにポンペを立て掛け、固定ボルト及び固定板で固定し、ボンベラックは、溶接により床及び壁に据え付ける。

ポンペは、固定ボルトにて切欠きを設けた固定板を締め込むことで、短辺方向、長辺方向及び上下方向に拘束している。

高圧窒素ガスポンペの解析モデルは、ボンベラックを構成する鋼材をはり要素として、以下のとおりモデル化した有限要素モデルである。

解析モデルを図 3-1 及び図 3-2 に、解析モデルの諸元を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

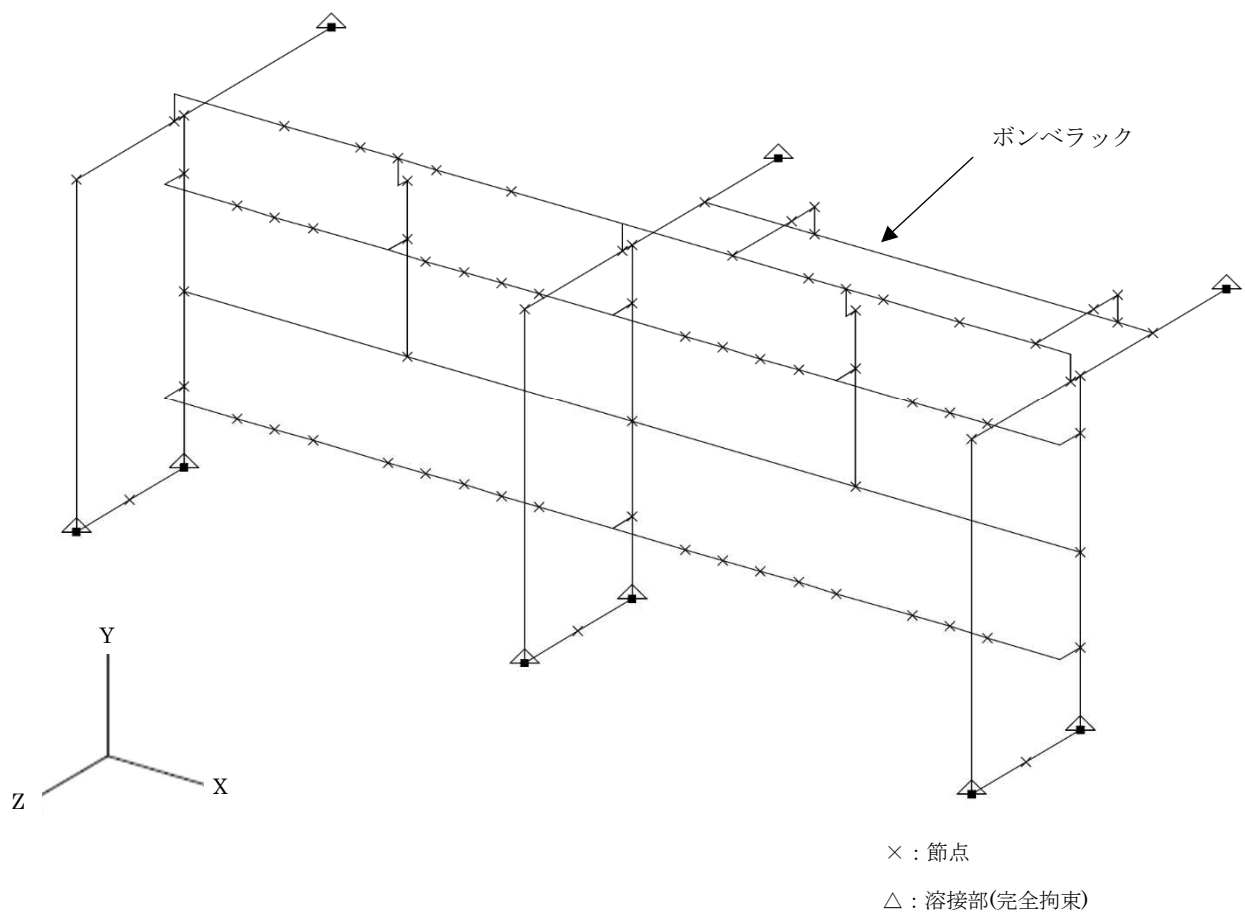


図 3-1 解析モデル (高圧窒素ガスボンベ (10 個組))

表 3-1 解析モデル (高圧窒素ガスボンベ (10 個組)) の諸元

項目	記号	単位	入力値
材料 (ボンベラック)	—	—	SS400 /STKR400
温度条件 (周囲環境温度)	T	°C	40
縦弾性係数 (ボンベラック)	E	MPa	$2.02 \times 10^5$
ポアソン比	$\nu$	—	0.3
質量	m	kg	1750
ボンベ数	—	■	10
要素数	—	■	100
節点数	—	■	85

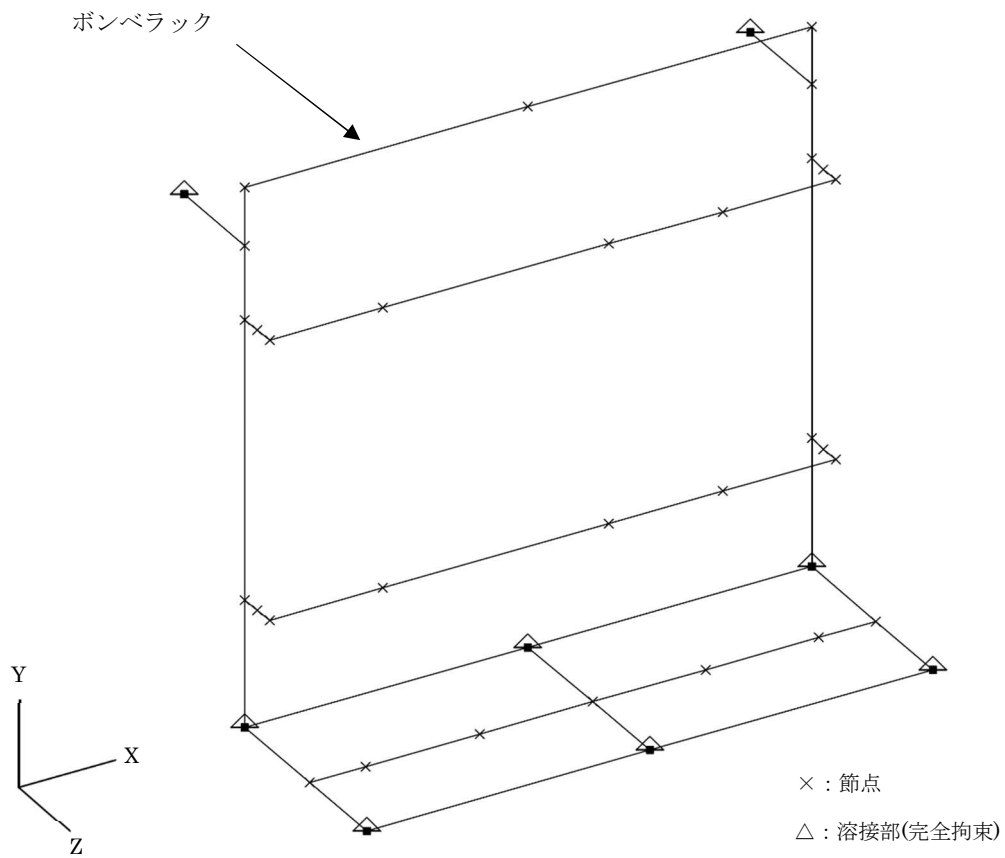


図 3-2 解析モデル (高圧窒素ガスポンペ (5 個組))

表 3-2 解析モデル (高圧窒素ガスポンペ (5 個組)) の諸元

項目	記号	単位	入力値
材料 (ボンベラック)	—	—	SS400 /STKR400
温度条件 (周囲環境温度)	T	°C	40
縦弾性係数 (ボンベラック)	E	MPa	$2.02 \times 10^5$
ポアソン比	$\nu$	—	0.3
質量	m	kg	620
ポンペ数	—	■	5
要素数	—	■	44
節点数	—	■	38

## (2) 遠隔空気駆動弁操作用ポンペ

遠隔空気駆動弁操作用ポンペは、ボンベラックにポンペを立て掛け、固定ボルト及び固定板で固定し、ボンベラックは、溶接により床に据え付ける。

ポンペ背面の固定板は、ボンベラックに溶接で固定し、ポンペ背面の固定板とポンペ前面の固定板を固定ボルトで締結することにより、ポンペをボンベラック短辺方向に拘束している。ここで、ボンベラックには切欠きを設けているため、ポンペをボンベラック長辺方向に拘束している。また、ポンペ上部押さえにより、ポンペをボンベラック上下方向に拘束している。

遠隔空気駆動弁操作用ポンペの解析モデルは、ボンベラックを構成する鋼材をはり要素として、以下のとおりモデル化した有限要素モデルである。

解析モデルを図 3-3 に、解析モデルの諸元を表 3-3 に示す。

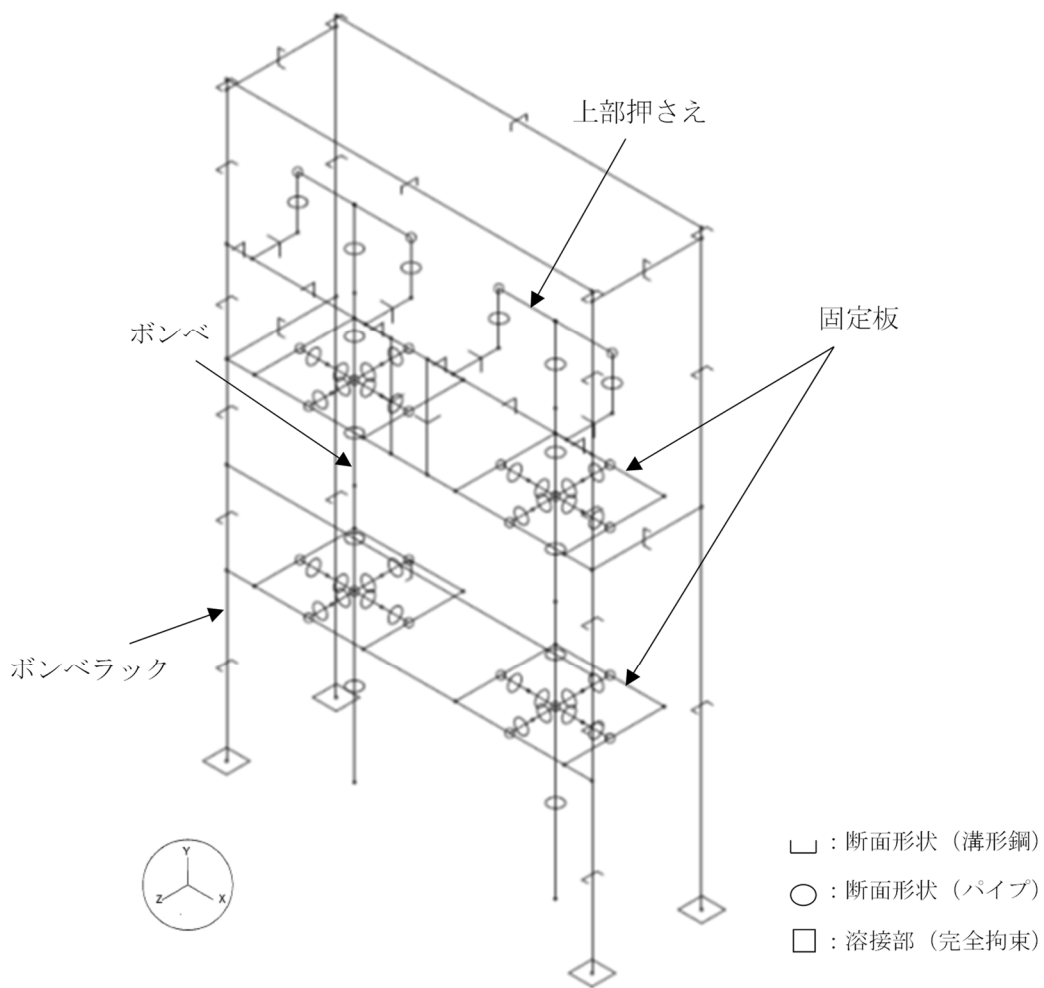


図 3-3 解析モデル (遠隔空気駆動弁操作ポンベ)

表 3-3 解析モデル (遠隔空気駆動弁操作ポンベ) の諸元

項目	記号	単位	入力値
材料 (ポンベ)	—	—	マンガン鋼
材料 (ポンベラック)	—	—	SS400
材料 (固定板)	—	—	SS400
温度条件 (周囲環境温度)	T	°C	40
縦弾性係数 (ポンベ)	E	MPa	$2.01 \times 10^5$
縦弾性係数 (ポンベラック)	E	MPa	$2.02 \times 10^5$
縦弾性係数 (固定板)	E	MPa	$2.02 \times 10^5$
ポアソン比	$\nu$	—	0.3
質量	m	kg	253
ポンベ数	—	■	2
要素数	—	■	127
節点数	—	■	100

### 3.4 固有値解析結果

ポンベ設備の固有値解析結果を表 3-4 に示す。固有周期は、0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。

表 3-4 固有値解析結果

設備名称	ポンベラック 支持構造	モード	卓越方向	固有周期(s)
高圧窒素ガスポンベ (10 個組)	溶接	1 次	鉛直	0.019
高圧窒素ガスポンベ (5 個組)	溶接	1 次	鉛直	0.022
遠隔空気駆動弁操作用ポンベ	溶接	1 次	水平	0.049



#### 4. 構造強度評価

##### 4.1 基本方針

ポンベ設備の構造強度評価は、別添 3-1 の「2.2 評価方針」で設定した評価方針に従って、構造強度評価を実施する。

ポンベ設備の構造強度評価は、「4.2 評価部位」に示す評価部位が、「4.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す荷重及び荷重の組合せに対し、「4.4 許容限界」に示す許容応力を満足することを、「4.5 設計用地震力」に示す設計用地震力及び「4.6 評価方法」に示す方法を用いて評価を行う。

##### 4.2 評価部位

ポンベ設備の評価部位は、別添 3-1 の「2.2 評価方針」で設定した評価部位に従って設定する。評価部位を表 4-1 に示す。

表 4-1 ポンベ設備の評価部位

設備名称	ボンベラック 支持構造	評価部位	図
高圧窒素ガスポンベ	溶接	ボンベラック	図 2-1
		溶接部	図 2-2
遠隔空気駆動弁操作用ポンベ	溶接	ボンベラック	図 2-3
		溶接部	

#### 4.3 荷重及び荷重の組合せ

ポンベ設備の構造強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、別添 3-1 の「3.1 荷重及び荷重の組合せ」で設定した荷重及び荷重の組合せを用いる。

ポンベ設備の構造強度評価に用いる荷重の組合せを表 4-2 に示す。

表 4-2 荷重の組合せ

設備名称	評価部位	荷重の組合せ
ポンベ設備	ボンベラック	D + S <sub>s</sub>
	溶接部	

#### 4.4 許容限界

ポンベ設備の許容限界は、「4.2 評価部位」にて設定した評価部位の破断延性限界を考慮し、別添 3-1 の「3.2 許容限界」で設定した許容限界に従い、許容応力状態 IV<sub>A</sub>S の許容応力とする。

評価部位の許容限界を表 4-3～表 4-4 に示す。

表 4-3 ボンベラックの許容限界

評価部位	荷重の組合せ	許容応力状態	許容限界*1, *2
			一次応力
			組合せ
ボンベラック	D + S <sub>s</sub>	IV <sub>A</sub> S	1.5 · f <sub>t</sub> *

注記\*1 : f<sub>t</sub>\*は、J S M E S N C 1-2005/2007 SSB-3121.1(1)a.本文中 S<sub>y</sub> 及び S<sub>y</sub> (R T) を 1.2 · S<sub>y</sub> 及び 1.2 · S<sub>y</sub> (R T) と読み替えて算出した値 (J S M E S N C 1-2005/2007 SSB-3121.3)。ただし、S<sub>y</sub> 及び 0.7 · S<sub>u</sub> のいずれか小さい方の値とする。

\*2 : J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984の「その他の支持構造物の許容応力」に準じて設定する。

表 4-4 溶接部の許容限界

評価部位	荷重の組合せ	許容応力状態	許容限界*1, *2
			一次応力
			せん断
溶接部	D + S <sub>s</sub>	IV <sub>A</sub> S	1.5 · f <sub>s</sub> *

注記\*1 : f<sub>s</sub>\*は、J S M E S N C 1-2005/2007 SSB-3121.1(1)a.本文中 S<sub>y</sub> 及び S<sub>y</sub> (R T) を 1.2 · S<sub>y</sub> 及び 1.2 · S<sub>y</sub> (R T) と読み替えて算出した値 (J S M E S N C 1-2005/2007 SSB-3121.3)。ただし、S<sub>y</sub> 及び 0.7 · S<sub>u</sub> のいずれか小さい方の値とする。

\*2 : J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984の「その他の支持構造物の許容応力」に準じて設定する。

#### 4.5 設計用地震力

基準地震動  $S_s$  による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。耐震評価に用いる設計用地震力を表 4-5～表 4-7 に示す。

表 4-5 設計用地震力（高压窒素ガスポンベ（10 個組））

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)	基準地震動 $S_s$	
		水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
原子炉建屋 T. M. S. L. 31.7 (T. M. S. L. 38.2*)	0.019	1.62	1.20

注記\*：基準床レベルを示す。

表 4-6 設計用地震力（高压窒素ガスポンベ（5 個組））

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)	基準地震動 $S_s$	
		水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
原子炉建屋 T. M. S. L. 31.7 (T. M. S. L. 38.2*)	0.022	1.62	1.20

注記\*：基準床レベルを示す。

表 4-7 設計用地震力（遠隔空気駆動弁操作用ポンベ）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)	基準地震動 $S_s$	
		水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
原子炉建屋 T. M. S. L. 4.8 T. M. S. L. 18.1*	0.049	1.13	1.09

注記\*：基準床レベルを示す。

#### 4.6 評価方法

ポンベ設備の構造強度評価は、別添 3-1 の「4.1(2) 構造強度評価」で設定した計算式に従って、評価部位の発生応力を算出し、許容応力以下であることを確認する。

##### (1) 評価に使用する記号及び計算モデルの説明

構造強度評価に使用する記号を表4-8に、計算モデル例を図4-1及び図4-2に示す。

表 4-8 構造強度評価に使用する記号

記号	単位	記号の説明
$\sigma_a$	MPa	はり要素の軸応力
$\sigma_b$	MPa	はり要素の曲げ応力
$\tau$	MPa	はり要素のせん断応力
$\sigma$	MPa	はり要素の組合せ応力
$\tau_w$	MPa	溶接部に生じるせん断応力
S	N	溶接部に作用するせん断力
$M_1$	N・mm	$R_1$ 軸廻りのモーメント
$M_2$	N・mm	$R_2$ 軸廻りのモーメント
$A_w$	mm <sup>2</sup>	溶接部の有効断面積
$Z_w$	mm <sup>3</sup>	溶接部の断面係数
$R_2$	N	$R_2$ 軸方向の発生力
$R_3$	N	$R_3$ 軸方向の発生力

K6 ① VI-2-別添 3-4 R0

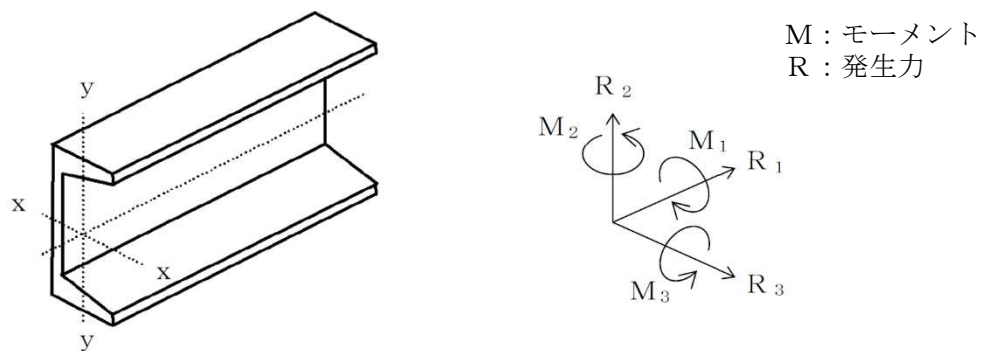


図 4-1 計算モデル例 (ボンベラック (はり要素))

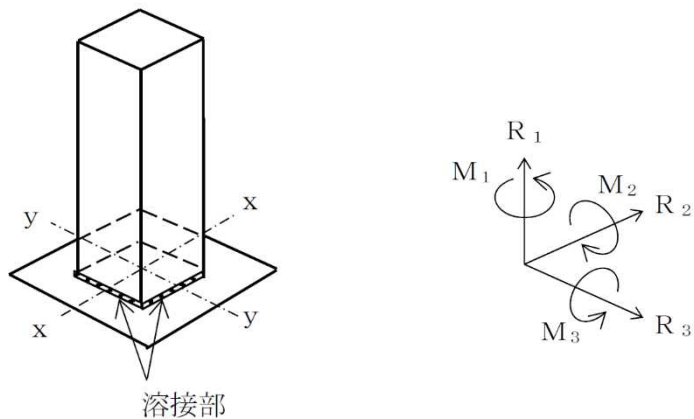


図 4-2 計算モデル例 (溶接部)

(a) 計算式

イ. ボンベラック (はり要素)

ボンベラックのうち, はり要素の組合せ応力を以下のとおり計算する。

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_b)^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (4.1)$$

ロ. 溶接部

解析により得られた, 溶接部に作用するせん断力及び曲げモーメントから, 溶接部のせん断応力を以下のとおり計算する。

$$\tau_w = \frac{S}{A_w} + \frac{M_1}{Z_w} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで, せん断力 S は,

$$S = \sqrt{R_2^2 + R_3^2} \dots\dots\dots (4.3)$$

## 5. 波及的影響評価

### 5.1 基本方針

ポンベ設備は、別添 3-1 の「2.2 評価方針」にて設定した評価方針に従い、当該設備による波及的影響を防止する必要がある他の設備への波及的影響評価を実施する。

ポンベ設備の波及的影響評価は、「4.2 評価部位」に示す評価部位が、「4.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す荷重及び荷重の組合せに対し、「4.4 許容限界」に示す許容応力を満足することを、「4.5 設計用地震力」に示す設計用地震力及び「4.6 評価方法」に示す方法を用いて評価を行う。

## 6. 評価条件

「4. 構造強度評価」及び「5. 波及的影響評価」に用いる評価条件を表 6-1～表 6-4 に示す。

表 6-1 高圧窒素ガスポンベ (10 個組) の評価条件

記号	単位	評価部位
		溶接部
S	N	6777
M <sub>1</sub>	N・mm	56370
A <sub>w</sub>	mm <sup>2</sup>	1273
Z <sub>w</sub>	mm <sup>3</sup>	47820

表 6-2 高圧窒素ガスポンベ (5 個組) の評価条件

記号	単位	評価部位
		溶接部
S	N	2771
M <sub>1</sub>	N・mm	154200
A <sub>w</sub>	mm <sup>2</sup>	1096
Z <sub>w</sub>	mm <sup>3</sup>	45390

表 6-3 遠隔空気駆動弁操作ポンベの評価条件

記号	単位	評価部位
		溶接部
S	N	322
M <sub>2</sub>	N・mm	31040
A <sub>w</sub>	mm <sup>2</sup>	524
Z <sub>w</sub>	mm <sup>3</sup>	5440



表 6-4 使用材料の許容応力評価条件

設備名称	ボンベラック 支持構造	評価部位	材料	温度条件 (°C)		S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (MPa)
高圧窒素ガスボンベ (10 個組)	溶接	ボンベラック	STKR400	周囲環境温度	40	245	400
		溶接部	SS400 (16 < t ≤ 40)	周囲環境温度	40	235	400
			STKR400	周囲環境温度	40	245	400
高圧窒素ガスボンベ (5 個組)	溶接	ボンベラック	SS400 (t ≤ 16)	周囲環境温度	40	245	400
		溶接部	SS400 (16 < t ≤ 40)	周囲環境温度	40	235	400
			STKR400	周囲環境温度	40	245	400
遠隔空気駆動弁操作ボンベ	溶接	ボンベラック	SS400 (t ≤ 16)	周囲環境温度	40	245	400
		溶接部	SS400 (t ≤ 16)	周囲環境温度	40	245	400

7. 評価結果

ポンベ設備の基準地震動  $S_s$  による地震力に対する評価結果を以下に示す。

構造強度評価及び波及的影響評価の結果、発生値は許容応力を満足しており、基準地震動  $S_s$  による地震力に対して評価部位の健全性が維持されるとともに、当該設備による波及的影響を防止する必要がある他の設備に対して波及的影響を及ぼさないことを確認した。

以上より、ポンベ設備は地震後において、基準地震動  $S_s$  による地震力に対し、重大事故等に対処するために必要な機能を維持するとともに当該設備による波及的影響を防止する必要がある他の設備に対して波及的影響を及ぼさないことを確認した。

7.1 構造強度評価結果

ポンベ設備の構造強度評価結果を表 7-1 に示す。

また、ボンベラックの最大応力発生箇所を図 7-1～図 7-3 に示す。

7.2 波及的影響評価結果

ポンベ設備の波及的影響評価結果を表 7-1 に示す。

表 7-1 構造強度評価及び波及的影響評価結果

(単位：MPa)

設備名称	ボンベラック 支持構造	評価部位	応力分類	発生値	許容応力	評価 結果
高圧窒素ガスボ ンベ (10個組)	溶接	ボンベラック	組合せ	38	280	○
		溶接部	せん断	7	161	○
高圧窒素ガスボ ンベ (5個組)	溶接	ボンベラック	組合せ	46	280	○
		溶接部	せん断	6	161	○
遠隔空気駆動弁操 作用ボンベ	溶接	ボンベラック	組合せ	142	280	○
		溶接部	せん断	7	161	○

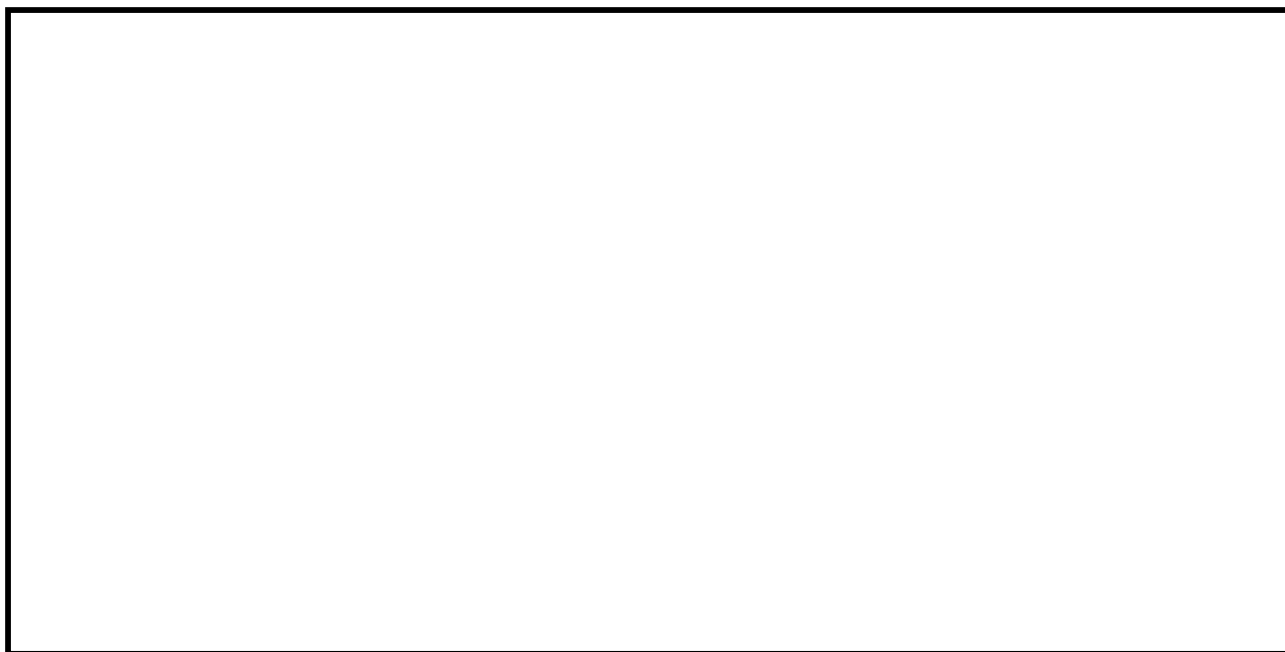


図7-1 高圧窒素ガスポンベ（10個組）の最大応力発生箇所



図7-2 高圧窒素ガスポンベ（5個組）の最大応力発生箇所

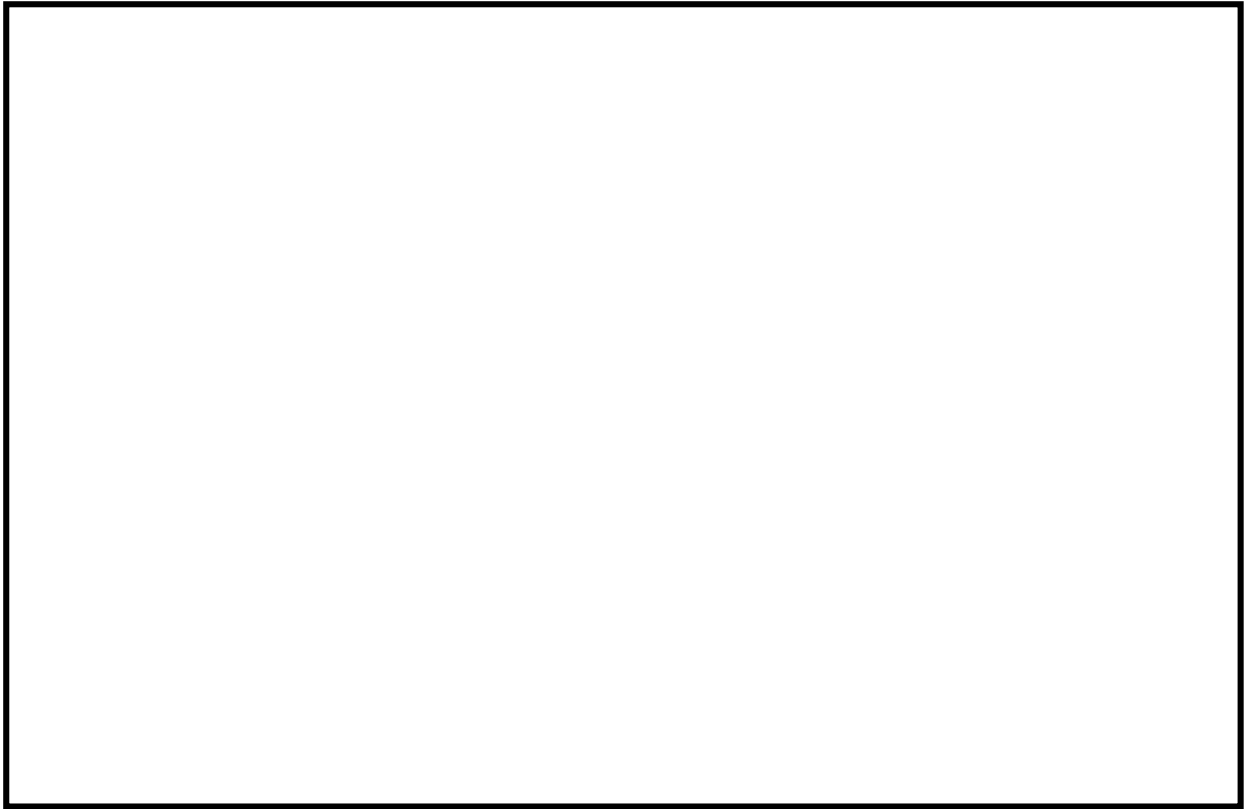


図 7-3 遠隔空気駆動弁操作ポンベの最大応力発生箇所