

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

TK-1-1835 改0

補足説明

(東海第二発電所 工事計画認可申請に係る論点整理について)

平成 30 年 8 月 20 日

日本原子力発電株式会社

目 次

【論点 19】 ペデスタル排水系に設置する安全弁について	1
【論点 15】 ベント管の強度計算書	10

ペDESTAL排水系に設置する安全弁について

1. 安全弁の設置概要

原子炉圧力容器の破損によりデブリがスリットに流入した際、スリット内部の水がデブリにより加熱され水蒸気が発生すると、水蒸気は配管勾配の上方である導入管側に流れ、格納容器床ドレンサンプ側に抜けると考えられる。また、スリット内部でデブリが凝固停止する際には、体積減少により圧力パスが形成され、蒸気発生による配管内部の著しい圧力上昇は起こらないと考えられる。ただし、万が一スリットが閉塞し、デブリによるペDESTAL排水系内の流体が急激に膨張し圧力上昇した場合に、ペDESTAL排水系内の配管及び格納容器外側隔離弁の損傷を防止するため、安全弁を設ける設計とする。(図1参照)

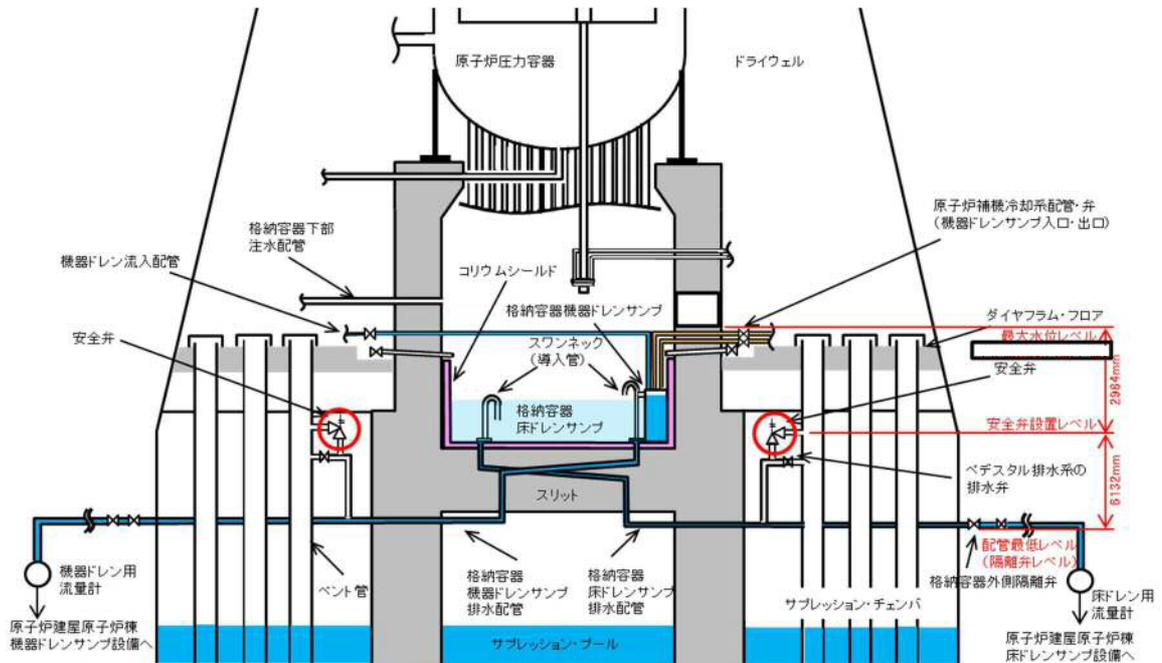


図1 安全弁設置位置概要図

2. 安全弁の吹出し圧力について

安全弁の吹出し圧力については格納容器バウンダリの最高圧力である 0.62 MPa (2Pd) 時でもペDESTAL内の最大水位維持に影響無いように 0.67 MPa (セット値) とする。

最大水位時の水頭圧については、安全弁設置レベル (EL. mm) とペDESTAL内の最大水位時レベル (人通用開口部下端: EL. mm) の差は 2,984 mm であり、その水頭差は圧力換算で約 0.0293 MPa となる。(図1寸法参照)

弁の作動圧力範囲は % であり 0.67 MPa のときで約 MPa の範囲となる。水位維持に対する安全弁の影響については、最大水位と安全弁の作動圧力範囲の関係か

ら、弁の作動圧力範囲のプラス側及び水頭差を考慮して $0.62 + \square + 0.0293 = \square$ MPa となることから、安全弁の作動圧力以下であり安全弁が水位維持に悪影響を及ぼすことは無い。

また、安全弁に係る排水配管（隔離弁含む）の最高使用圧力は、安全弁が吹出す際の圧力に安全弁からの水頭差（格納容器外側隔離弁：EL. \square mm）6,132 mm（圧力換算で 0.0601 MPa）及び作動圧力範囲を考慮して $0.67 + 0.0601 + \square = \square$ MPa より、安全弁が作動する際に排水配管に作用する圧力以上の 0.76 MPa とする。

3. 安全弁の吹出し量について

3.1 安全弁の吹出し量の計算

【安全弁から液体が吹出す場合】

安全弁の吹出し量（液体）の計算は J S M E S N C 1 - 2005/2007 に基づき以下のとおり計算される。

$$W = 5.04An\sqrt{(1.1\Delta PG)} = 5.04 \times \square \times 0.5 \times \sqrt{(1.1 \times 0.05 \times \square)}$$

$$= \square \text{ (kg/h)} \div \square \text{ (m}^3\text{/h)}$$

ここで、

W：弁の容量（kg/h）

A：安全弁内流路断面積（mm²）

流路径： \square mm，リフト量 \square mm とすると

$$3.14159 \times \square \times \square = \square \text{ mm}^2$$

n：流量係数 0.5

ΔP ：逃し弁入口の圧力と逃し弁出口の圧力の差 $0.67 - 0.62 = 0.05$ （MPa）

G：入り口側の液体の密度 \square （kg/m³）（吹出し圧力の飽和温度 169℃時）

計算された吹出し量は約 \square m³/h である。

【安全弁から気体が吹出す場合】

安全弁の吹出し量（ガス）の計算は J S M E S N C 1 - 2005/2007（JIS B 8210）に基づき以下のとおり計算される。

$$Q_m = C' K_d A P_1 \sqrt{(M/ZT)} \times 0.9 = 14.3 \times 0.805 \times \square \times \{(0.67 + 0.101) \times 1.1\}$$

$$\times \sqrt{\{28.01 / (1 \times 473)\}} \times 0.9 = \square \text{ (kg/h)}$$

200℃の窒素比容積 0.195 m³/kg をかけて、 $\square \times 0.195 = \square \div \square \text{ (m}^3\text{/h)}$

ここで、

Q_m：公称吹出し量（kg/h）

C'：κ と P₂/P₁ とによる係数で P₂ 及び P₁ が MPa の値である場合は付属書図 2 に

よる。 κ : 断熱指数 (c_p/c_v), 不明の場合は $\kappa = 1.0$ とする。

P_1 : 公称吹出し量決定圧力の絶対圧力 (MPa) で, 設定圧力の 1.1 倍の絶対圧力とする。

P_2 : 背圧の絶対圧力 0.62 (MPa)

K_d : 公称吹出し係数 0.805

M : ガスの分子量 28.01

Z : 付属書図 3 よる圧縮係数 1

T : 公称吹出し量決定圧力におけるガスの絶対温度 473 (K)

計算された気体の吹出し量は m^3/h であり, 吹出し量の妥当性の評価には吹出し量の少ない液体の吹出し量 m^3/h を使用する。また, 最終的に配管内の水がなくなり蒸気が吹出すようになると, 吹出し量が増えるため吹出し量の裕度は増加する。

3.2 安全弁の吹出し量の妥当性

原子炉圧力容器の破損直後は, デブリがスリット内に侵入し, 1m 程度侵入したところで凝固停止することを評価しており, スリット流入開始から凝固停止までの時間は 1 秒未満である。この凝固停止までの間は, **デブリと水の接触により発生した蒸気は流動性のあるデブリ内を逆流するとともに, デブリと水の接触部分に水蒸気の膜が生成され, デブリが水蒸気の膜及びその下流の水を押し込みながらスリット内を進むと考えられる。したがって, 短時間に水蒸気の膜を介して水に伝わるデブリの熱量は少なく, ペDESTAL排水系内はデブリによる水頭差による圧力上昇が支配的と考えられる。**この場合, 全量のデブリ落下を想定しても安全弁設置レベルに対する水頭圧は約 0.13 MPa であり, 有効性評価における RPV 破損時の D/W 圧力: 高々約 0.3 MPa を考慮しても, 安全弁の吹出し圧力: 0.67 MPa を下回るため, 安全弁は動作しない。

➤デブリからの入熱による蒸気発生を想定した場合の吹出し量評価

上記のとおり, デブリの凝固停止までの間安全弁は動作しないため, デブリの凝固停止 (**固相線温度 °C**) 以降の状態において安全弁が動作する状態を想定し, 必要な吹出し量を計算した。

- **デブリが凝固停止すると, デブリと水の接触部分に生成された水蒸気の膜を介してデブリの熱が下流の水に伝わることで蒸気が発生するとともに, 発生した蒸気がデブリにより加熱されることで体積膨張し, これらによりペDESTAL排水系の圧力が上昇することで安全弁が動作し, 水が安全弁から排出されると考えられる (図 2 参照)。**
- 保守的に, デブリから蒸気に伝わる熱が全て下流の水 (保守的に飽和状態を想定) に移行し, 水から蒸気への状態変化に使われる場合を仮定する。表 1 で計算したデ

ブリから蒸気への熱伝達係数を基に表 2 にてデブリから蒸気への入熱量を計算しており、この入熱量が全て水に移行した場合の蒸気発生速度を表 3 にて計算した。

- 蒸気発生速度の計算結果は約 m³/h であり、安全弁の水の吹出し容量 m³/h よりも小さいため、ペDESTAL排水系内で増加した体積を安全弁で吹出すことでペDESTAL排水系内の過圧を防止可能である。
- ペDESTAL排水系の体積膨張速度を保守的に評価するために、デブリから蒸気に伝わる熱が全て下流の水に移行する想定としているが、実際は蒸気の温度上昇による体積膨張にも用いられること、蒸気からスリットへの熱移行も考えられることから、体積膨張速度はさらに遅くなり、必要な吹出し量はさらに少ないと考えられる。
- なお、最終的に蒸気が安全弁から吹出すことになった場合、蒸気の加熱による体積膨張によりペDESTAL排水系内は加圧されることとなるが、より厳しい条件の上記評価結果に包含される。

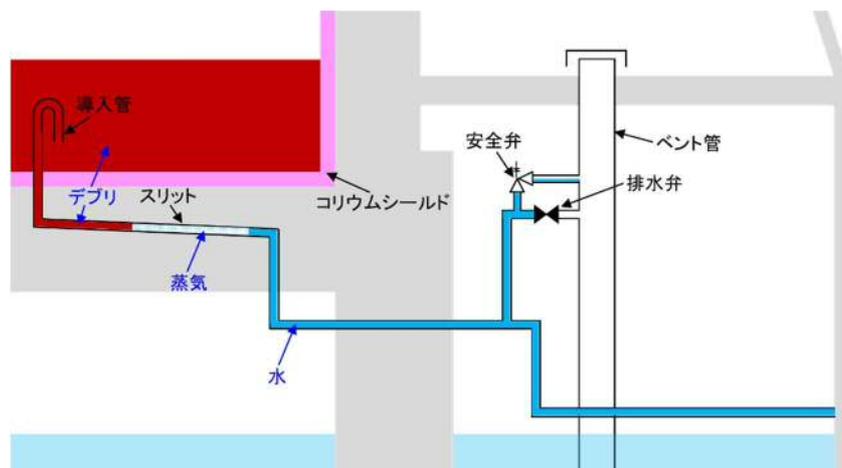


図 2 スリット内に蒸気が発生した状態

表1 デブリから蒸気への熱伝達係数の計算

項目	単位	値	備考
重力加速度 (g)	m/s ²	9.80665	
水の温度 (T _∞)	°C	169	保守的に 0.67MPa 時の飽和温度として設定*1
デブリの温度 (T _w)	°C	<input type="text"/>	デブリの固相線温度 (V-1-8-1 別添 2 5.3 参照)*2
比体積	m ³ /kg	0.639	蒸気表より計算 (800°C *3 の値)
導粘性係数 (ν)	m ² /s	0.00003	蒸気表より計算
熱伝導率 (λ)	W/mK	0.1081	蒸気表より計算
線膨張係数 (β)	1/K	0.000969	蒸気表より計算 (=1×体積変化量 / (比体積×温度変化量))
プラントル数 (Pr)	—	0.879	蒸気表より計算
代表長さ (x)	m	1	単位長さを設定 (熱伝達係数の算出にあたっては、代表長さは影響しない)
グラスホフ数 (Gr)	—	<input type="text"/>	= g β (T _w - T _∞) x ³ / ν ²
ヌセルト数 (Nu)	—	<input type="text"/>	= 0.046 (PrGr) ^{1/3} *4
デブリから蒸気への熱伝達係数	W/m ² ・K	<input type="text"/>	= Nu λ / x

*1：保守的にデブリからの入熱が全て蒸気への状態変化に使われるよう、水温度を安全弁吹出し時の飽和温度と想定。

*2：デブリが凝固停止する前は、蒸気が発生しても流動性のあるデブリ内を逆流し格納容器床ドレンサンプ側に抜けると考えられる。

*3：蒸気の平均温度として、デブリと水の平均温度 ((-169)/2 ≒ 800) を設定。実際は周囲のスリットへの熱移行により、さらに温度は低くなると考えられる。

*4：伝熱工学 (裳華房) における密閉層内の自然対流伝熱における乱流域の平均ヌセルト数の式。スリット内のような極小密閉層では対流が起こりにくい、保守的に乱流の対流が起こるとして算出。

表 2 デブリから蒸気への入熱量の計算

項目	単位	値	備考
デブリから蒸気への熱伝達係数 (h)	W/m ² ・K	<input type="text"/>	表 1 の値から有効数字 1 桁で切上げ
デブリの温度 (T _w)	°C	<input type="text"/>	デブリの固相線温度 (V-1-8-1 別添 2 5.3 参照) *1
デブリ接触面積 (A ₃)	m ²	<input type="text"/>	接触面積の不確かさを考慮し、スリット断面積：高さ <input type="text"/> m × 幅 <input type="text"/> m の 10 倍を想定 *2
デブリから蒸気への入熱量	W (J/s)	<input type="text"/>	=hA ₃ (T _w -T _∞) T _∞ : 表 1 より

*1 : デブリが凝固停止する前は、蒸気が発生しても流動性のあるデブリ内を逆流し格納容器床ドレンサンプ側に抜けると考えられる。

*2 : デブリの表面にはある程度凹凸が生じると考えられることから、保守的にスリット断面積の 10 倍と想定した。

表 3 発生蒸気速度の計算

項目	単位	値	備考
比エンタルピー	J/kg	2,050,000	安全弁の吹出し圧力 (0.67MPa) 時の飽和温度 169°C における値 (蒸気表より)
比体積	m ³ /kg	0.248	安全弁の吹出し圧力 (0.67MPa) 時の飽和温度 169°C における値 (蒸気表より)
蒸気発生速度	m ³ /h	約 <input type="text"/>	=デブリからの入熱量 (表 2) × 比体積 × 3600 / 比エンタルピー *

* : デブリから蒸気に伝わる熱が全て水に移行し、その熱が水から蒸気への状態変化に使用されると仮定した値。

4. 安全弁のベント管への影響について

①安全弁内流路における流速

安全弁内流路における流速は以下となる。

$$V_1 = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \times 9.80665 \times 68.0} = 36.6 \text{ m/s}$$

ここで、

V_1 : 安全弁内流路における速度 (m/s)

g : 重力加速度 9.80665 (m/s²)

H : 圧力 (m) 0.67MPa \approx 68.3m

②安全弁排出ラインにおける流速

$$V_2 = V_1 \cdot (A_1 / A_2) = 36.5 \times \boxed{} = \boxed{} \text{ m/s}$$

ここで、

V_2 : 安全弁排出ラインにおける流速 (m/s)

A_1 : 安全弁内流路断面積 $A \times 10^{-6}$ (m²)

A_2 : 安全弁排出ライン断面積 (m²)

$$\boxed{} A \text{ Sch80配管 (内径: } \boxed{} \text{ mm)}$$

$$3.14159 \times (\boxed{} / 2)^2 = \boxed{} \text{ m}^2$$

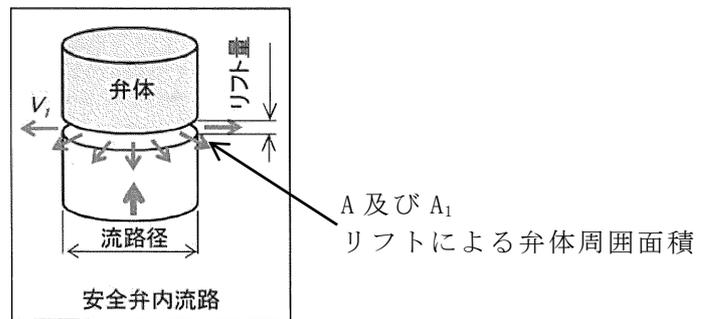


図5 安全弁内流路概略図 (①式)

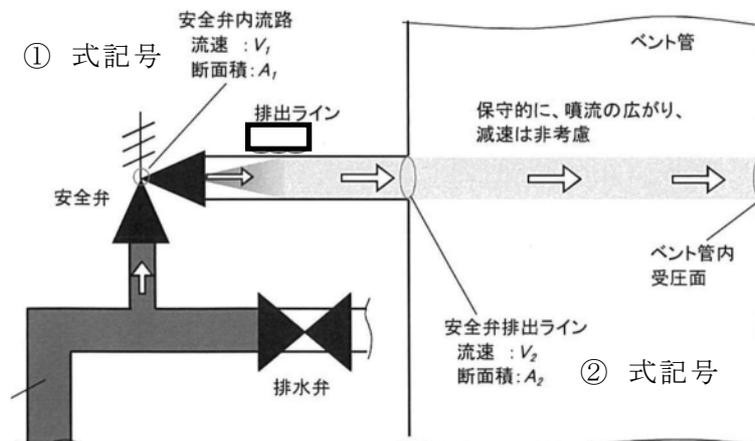


図6 安全弁排出ライン概略図 (②式)

③安全弁の吹出しによるベント管への影響（荷重）

$$F = \rho A_2 V_2^2 = 1000 \times \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \text{ N}$$

ここで、

F : ベント管内面が受ける荷重 (N)

ρ : 密度

④安全弁の吹出しによるベント管への影響（圧力）

安全弁の吹出しによって発生する噴流によりベント管内面が受ける圧力について、保守的に噴流の広がりや減速は考慮せずに、安全弁排出ラインと同じと仮定した。

安全弁の吹出しによりベント管内側が受ける圧力

$$P = F/A_2 = \boxed{} / \boxed{} = \boxed{} \text{ Pa} = \boxed{} \text{ kPa}$$

P : 噴流による水圧 (Pa)

噴流による圧力は、ベント管の最高使用圧力 173kPa の $\boxed{}$ %程度であり、ベント管への影響は無い。

なお、本評価では、保守的に噴流の広がりや減速を考慮していないが、実際にはベント管内側に到達するまでに流体は減速するとともに、流れが広がり受圧面積が大きくなるため、ベント管内面が受ける圧力は大幅に小さくなる。

また、安全弁が吹き出すのは短時間であり、時間的な影響も小さい。

5. 安全弁作動時の吹出し反動力による配管設計への配慮について

安全弁作動時の吹出し反動力の配管への影響については、配管解析時の安全弁自重を入力する質点に吹出し反動力値を入力し、ペDESTAL排水系の配管が健全であるように設計する。【図書番号 V-3-9-2-2-5-2 の荷重として含む】

安全弁動作時における吹出し反動力 F_f （水平方向）の算出は、反動力が大きくなる飽和蒸気を内包する際の値で評価を行う。

$$\begin{aligned} F_f &= W_a \cdot g \cdot \sqrt{\{kT_1 / (k+1) M\} / 274} \\ &= \boxed{} \times 9.80665 \times \sqrt{\{ \boxed{} \times 473 / \{ (\boxed{} + 1) \times 18.02 \} \}} / 274} \\ &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ [N]} \end{aligned}$$

F_f : 水平方向の反動力 [N] {JIS B8210(1994)より}

W_a : 吹出し量 $\boxed{}$ [kg/h] (反動力が大きい背圧無し蒸気時)

k : 断熱指数 $\boxed{}$

T_1 : 流体の温度 200°C = 473 [K]

M : 流体の分子量 18.02

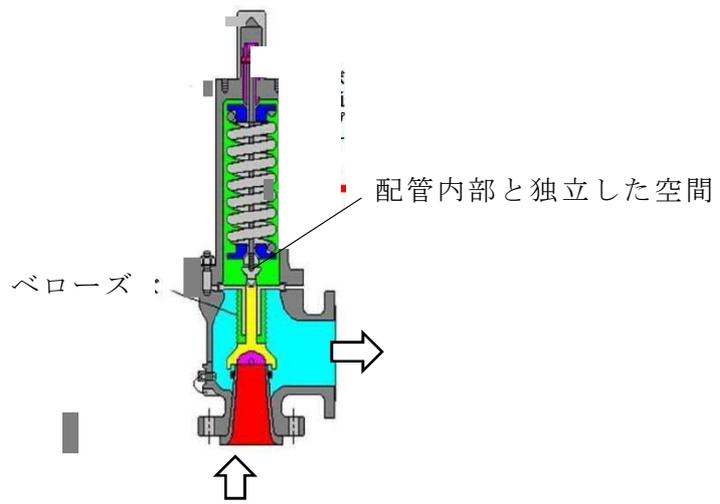


図 7 安全弁構造概略図

V-3-9-2-1 ベント管の強度計算書

目次

1. 概要	1
2. 構造説明	2
2.1 構造計画	2
2.2 評価方針	3
3. 形状及び主要寸法	4
4. 設計条件	5
4.1 設計荷重	5
4.2 材料及び許容応力	6
5. 応力計算	7
5.1 応力評価点	7
5.2 計算方針	8
6. 評価結果	9
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果	9

1. 概要

本計算書は、ベント管の強度計算書である。

ベント管は、設計基準対象施設のベント管を重大事故等クラス2管として兼用する管である。

設計基準対象施設としては、東海第二発電所 昭和48年10月22日付け48公第8316号にて認可された工事計画書の添付書類「Ⅲ-2-2-1 ベント管の規格計算書」、「Ⅲ-3-2-2 ベント管の耐震性についての計算書」に評価結果があり、強度が十分であることを確認している。

以下、重大事故等クラス2管としての強度評価を示す。

2. 構造説明

2.1 構造計画

ベント管の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

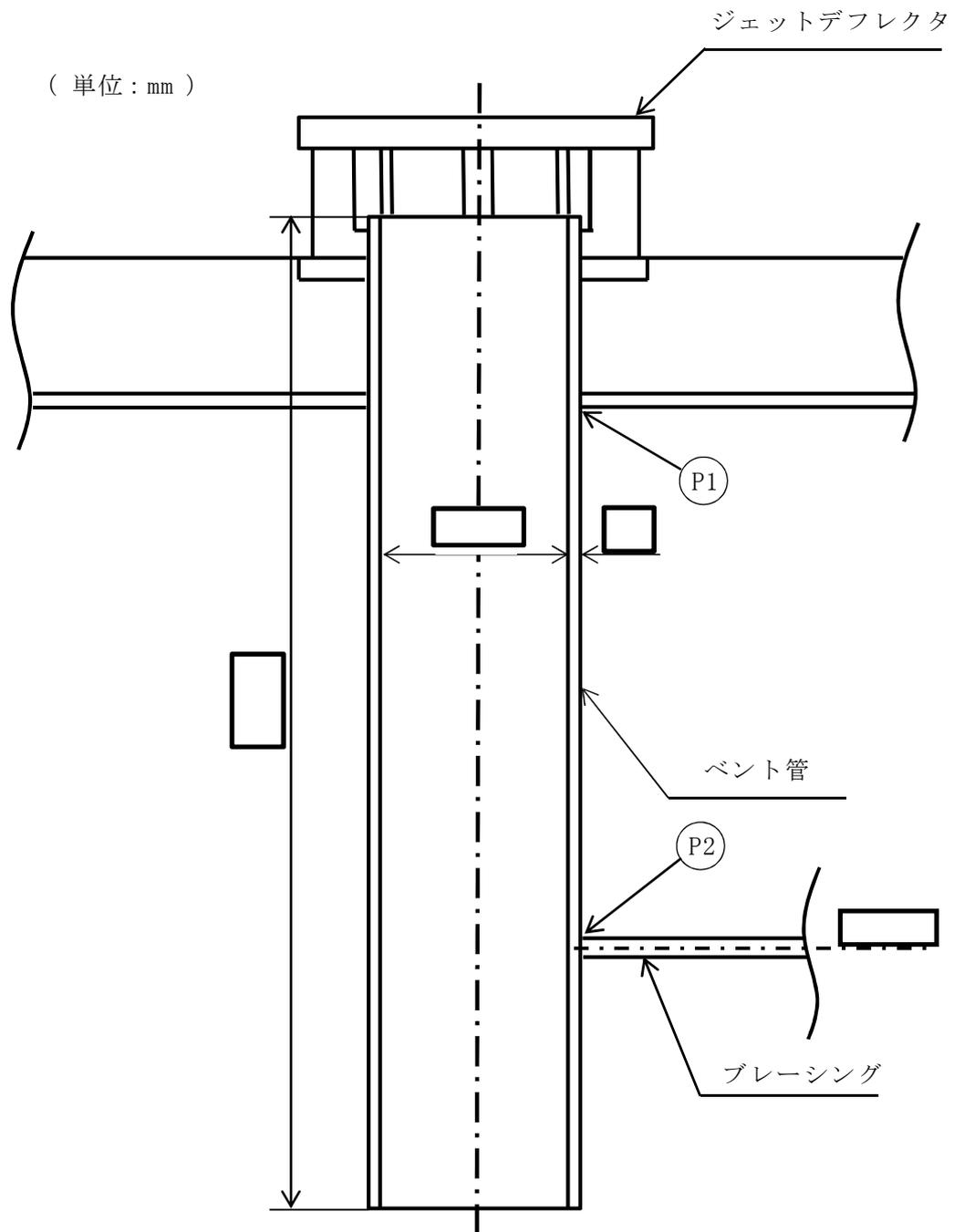
計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>ベント管上部をダイヤフラムフロアに固定し、下部には水平ブレースにて支持している。</p>	<p>ベント管は内径 <input type="text"/> mm, 板厚 <input type="text"/> mm, 長さ <input type="text"/> mm の管でできている。</p> <p>ベント管の上部には配管破断時の防護のためジェットデフレクタが取付けた構造である。</p>	

2.2 評価方針

ベント管の応力評価は，東海第二発電所 昭和 48 年 10 月 22 日付け 48 公第 8316 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。

3. 形状及び主要寸法

ベント管の形状及び主要寸法を図 3-1 に示す。



Ⓐ P1 及び Ⓑ P2 応力評価点

図 3-1 ベント管の形状及び主要寸法 (単位: mm)

4. 設計条件

4.1 設計荷重

- (1) 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} 173 kPa

温度 T_{SA} 200 °C

- (2) 自重

ベント管

- (3) 逃がし安全弁作動時荷重

逃がし安全弁作動時空気泡圧力による荷重としては、気泡差圧による荷重と気泡速度によるドラッグ力が作用する。

$$P = \sqrt{(\Delta P_{\max})^2 + (P_{D\max})^2}$$

ここに、

$$\Delta P_{\max} = P_{0\max} \cdot R_0 \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1 + a} \right)$$

$$P_{D\max} = \frac{\gamma}{2 \cdot g} \cdot C_D \cdot V_{0\max}^2 \cdot \left(\frac{R_0}{r_1} \right)^4$$

$P_{0\max}$: 最大気泡圧力

R_0 : 気泡半径

r_1 : 気泡中心と構造物前面までの距離

a : 構造物の厚さ

$V_{0\max}$: 最大気泡表面速度

C_D : ドラッグ係数

γ : 比重量

g : 重力加速度

- (4) 冷却材喪失事故時蒸気ブローダウンによる荷重

ベント管に加わる水平方向荷重

$$F_1 = \boxed{} \cdot \sin(\pi \cdot t/3) \quad (\times 10^3 \text{ N}) \quad 0 \leq t \leq 3 \text{ ms}$$

4.2 材料及び許容応力

(1) 材料

表 4-1 使用材料表

使用部位	使用材料		備考
ベント管	SGV49 相当		SGV480*

注記 * : 新 JIS を示す。

(2) 荷重の組合せ及び許容応力

重大事故等対処設備の評価における荷重の組合せ及び供用状態を表 4-2 に、供用状態に対する許容応力を表 4-3 に示す。

表4-2 荷重の組合せ及び供用状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	供用状態
原子炉 格納施設	圧力低減設備 その他の安全設備	ベント管	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス 2管	$D + P_{SA} + M_{SA}$	E (Eとして D_S の許容 限界を準用 する)

注記 * : 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備, 「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備, 「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4-3 許容応力（重大事故等対処設備）

(単位 : MPa)

材料	供用状態	許容応力		
		一次応力		一次+二次応力
		P_m	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$
SGV480	E	—	379	—

5. 応力計算

5.1 応力評価点

ベント管の形状及び応力レベルを考慮して設定した応力評価点を表 5-1, 図 3-1 に示す。

表 5-1 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
P 1	上部
P 2	ブレーシング部

5.2 計算方針

ベント管の応力評価は，東海第二発電所 昭和 48 年 10 月 22 日付け 48 公第 8316 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。

6. 評価結果

6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

ベント管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。発生値は評価基準値を満足している。

(1) 供用状態Eに対する評価

供用状態Eに対する応力評価結果を表 6-1 に示す。

表 4-2 に示す荷重の組合せについて記載している。

表 6-1 供用状態Eに対する評価結果 (D + P_{SA} + M_{SA})

評価対象設備	評価部位		応力分類	E		判定	備考
				発生値	評価基準値		
				MPa	MPa		
ベント管	P 1	上部	一次膜応力+一次曲げ応力	98	379	○	
	P 2	ブレーシング部	一次膜応力+一次曲げ応力	139	379	○	