

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。

補足説明

柏崎刈羽原子力発電所 第7号機
工事計画認可申請に係る論点整理について

2020年3月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

竜巻への配慮に関する説明書に係る補足説明資料	3
5. 飛来物の選定について	5
8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の K6/7 原子炉設置変更許可 への影響確認について	62
ブローアウトパネル関連設備の設計方針に係る補足説明資料	88
4-2 ブローアウトパネル関連設備の配置と構造	90
4-4 ブローアウトパネルの開放機能を担保する設計条件について	106
4-8 ブローアウトパネル開放時の他設備への影響について	111
4-10 ブローアウトパネル機能確認試験要領について	112
4-11 ブローアウトパネル機能確認試験結果について	134
4-17 燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験要領について	150
4-19 燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験結果について	174
4-20 燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置（自主対策設備）の配置と構造に ついて	182
4-21 ブローアウトパネル関連設備の先行電力との差異について	190
-1-1-3-1-1 発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本 方針	199
-1-1-3-1-2 防護対象の範囲	219
工事計画に係る説明資料（発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に 関する説明書）	224
1. 外部事象の重畳の考え方について	226
2. 自然現象の組合せによる荷重の考え方について	247

竜巻への配慮に関する説明書に係る補足説明資料

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 設計竜巻の最大風速 92m/s の設定について
2. 外部事象防護対象施設のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出について
3. 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設の選定について
4. 建屋開口部の調査結果について
5. 飛来物の選定について
6. 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について
7. 屋外の重大事故等対処設備の竜巻防護設計について
8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について

5. 飛来物の選定について

5. 飛来物の選定について

5.1 概要

柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号炉 原子炉設置変更許可申請書(以下、「K6/7 設置許可」という。)では、設計飛来物を、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさから、鋼製材、角形鋼管(大)、足場パイプ及び鋼製足場板を飛来物の発生防止対策に応じて選定した。

これらのうち、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機 工事計画認可申請書(以下、「K7 工認」という。)に用いる設計飛来物の選定について説明する。

また、発電所構内において屋外に保管している資機材及び駐車している車両等については、外部事象防護対象施設及び防護対策施設への影響の有無を確認し、影響を及ぼすおそれがあるものについては、飛来物として選定し、固定、固縛又は離隔するなどの飛来物発生防止対策を講じることから、飛来物発生防止対策の要否判定について説明する。

なお、鋼製材、角形鋼管(大)、足場パイプ及び鋼製足場板に包含できない砂利については、補足説明資料「6. 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について」にて説明する。

5.2 設計飛来物の選定について

K7 工認に用いる設計飛来物は、K6/7 設置許可で選定した鋼製材、角形鋼管（大）、足場パイプ及び鋼製足場板から、飛来物の発生防止対策に応じて選定する。K6/7 設置許可の添付資料八に記載している設計飛来物及び諸元（砂利を除く。）を表 5 - 1 に示す。

表 5 - 1 K6/7 設置許可の添付資料八に記載している設計飛来物及び諸元

飛来物の種類	鋼製材	角形鋼管（大）	足場パイプ	鋼製足場板
				
サイズ (m)	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行き 4×0.1×0.1	長さ×幅×奥行き 4×0.05×0.05	長さ×幅×奥行き 4×0.25×0.04
質量 (kg)	135	28	11	14
最大水平速度 (m/s)	10	16	42	55
最大鉛直速度 (m/s)	7	7	38	18
浮き上がり高さ (m)	0.08	0.15	0.57+(148) ^{*1,*2}	52+(148) ^{*1,*2}
飛散距離 (m)	9	20	261	373

注記 *1 : () 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

*2 : 5～7号機側で最も高所の5号機主排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定

K6/7 設置許可における設計飛来物（表 5 - 1）の選定理由として、仮設足場板（足場パイプ、鋼製足場板）については、設計飛来物候補の中で、足場パイプが運動エネルギー（鉛直）、コンクリートに対する貫通力（鉛直）及び鋼板に対する貫通力が最大であり、鋼製足場板が、運動エネルギー（水平）及びコンクリートに対する貫通力（水平）が最大であることから選定した。

また、仮設足場に飛散防止対策を講じる場合を考慮し、運動エネルギー及び貫通力が仮設足場材（足場パイプ、鋼製足場板）に次ぐ飛来物として、鋼製材については、運動エネルギー及びコンクリートに対する貫通力が最大であり、角形鋼管（大）については、鋼板に対する貫通力が最大であることから選定した。

表 5 - 1 に記載の諸元から算出した運動エネルギー及び貫通力を表 5 - 2 に示す。

なお、算出方法については、別紙 1 に示す。

表 5 - 2 運動エネルギー及び貫通力の算出結果

飛来物の種類	仮設足場材		仮設足場材に次ぐ飛来物	
	足場パイプ	鋼製足場板	鋼製材	角型鋼管（大）
運動エネルギー （水平）(kJ)	10	21	6	4
運動エネルギー （鉛直）(kJ)	8	3	3	0.55
コンクリートの 貫通限界厚さ （水平）(cm)	11	12	6	6
コンクリートの 貫通限界厚さ （鉛直）(cm)	10	5	4	3
鋼板の 貫通限界厚さ （水平）(mm)	17	6	4	6
鋼板の 貫通限界厚さ （鉛直）(mm)	15	2	2	2

注記：色塗り箇所は最大値を示す。

柏崎刈羽原子力発電所における飛散防止対策の運用において、仮設足場に飛散防止対策を講じないことから、K7 工認に用いる設計飛来物は、足場パイプ及び鋼製足場板とする。

なお、K6/7 設置許可において、高所の建屋開口部等への影響を及ぼす飛散高さについて、鋼製材及び角形鋼管（大）は原則地上高 10m まで飛散するものとし、足場パイプ及び鋼製足場板は 5～7 号機側で最も高所の 5 号機主排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定していることから、K7 工認における竜巻防護設計については、足場パイプ及び鋼製足場板が高所の建屋開口部等へ飛散するものとして影響評価及び防護対策を講じる設計とする。

5.3 対策要否の判定について

以下に示す観点から設計飛来物に包含されていない物品については、5.2 項にて示した設計飛来物の運動エネルギー又は貫通力との比較により、飛来物発生防止対策（固縛，固定又は離隔）を行う。

飛来物源である資機材及び車両等に対して，飛来物として選定し，飛来物発生防止対策の要否を判定するフローを，図 5 - 1 に示す。

[飛来物発生防止対策要否の観点]

- ・運動エネルギーが設計飛来物に設定している鋼製足場板の 21kJ（水平方向），又は足場パイプの 8kJ（鉛直方向）より大きいもの。
- ・コンクリートに対する貫通力（貫通限界厚さ）が設計飛来物に設定している鋼製足場板の 12cm（水平方向）又は足場パイプの 10cm（鉛直方向）より大きいもの。
- ・鋼板に対する貫通力（貫通限界厚さ）が設計飛来物に設定している足場パイプの 17mm（水平方向）又は 15mm（鉛直方向）より大きいもの。

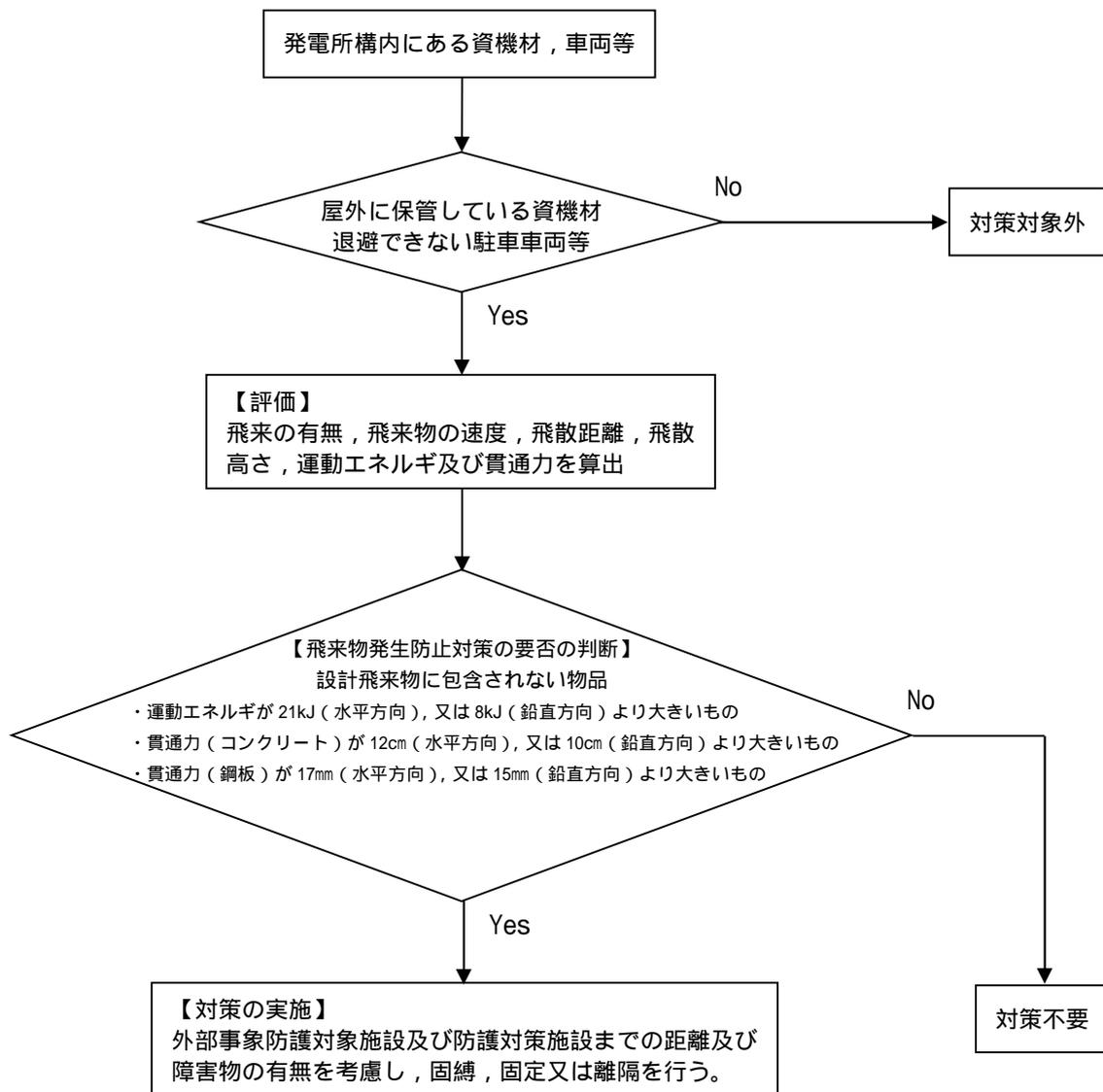


図 5 - 1 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

飛散評価方法について

1. はじめに

飛来物源である資機材及び車両等が，設計竜巻により飛来物化し，飛散した評価を行う。

飛散評価は，寸法，質量，形状並びにこれらの値より算出する空力パラメータ，並びに初期高さにより，解析コード「TONBOS」によって最大飛来速度，飛散高さ，水平飛散距離を算出する。以下に飛散評価に用いる数値を説明する。

なお，「TONBOS」で用いる設計竜巻の風速場モデルはフジタモデルとし，竜巻影響評価へのフジタモデルの適用については，別紙 2 に示す。

1.1 空力パラメータの算出 ($C_D A / m$ (m^2/kg))

空力パラメータは飛来物の各寸法 (長さ×幅×奥行き(高さ)) より受圧面積を算出し，飛来物の質量及び抗力係数より算出する。(1)項に算出式，(2)項に計算例を示す。

(1) 算出式

空力パラメータの算出は下式によって算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m}$$

m : 質量 (kg)

c : 1/3

C_{D1} , C_{D2} , C_{D3} : 抗力係数 (表 1, 図 1)

A_1 , A_2 , A_3 : 受圧面積 (m^2) (図 1)

表1 飛来物の抗力係数

飛来物形状	c	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
塊状物体	1/3	2.0	2.0	2.0
板状物体	1/3	1.2	1.2	2.0
棒状物体	1/3	2.0	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)

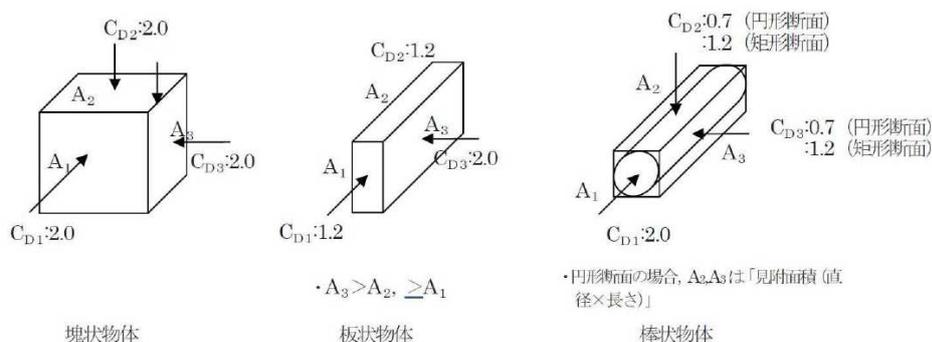


図1 飛来物形状と受圧面積，抗力係数の関係

(2) 計算例

a. 足場パイプ (棒状物体) (図2)

長さ: 4m 幅: 0.05m 高さ: 0.05m 質量: 11kg

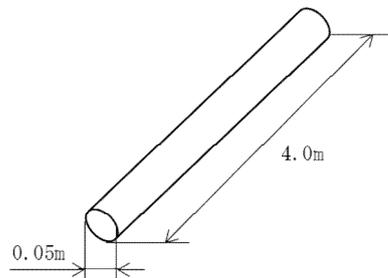


図2 足場パイプ

円形断面なので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1} = 2.0$ 、 $C_{D2} = 0.7$ 、 $C_{D3} = 0.7$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \quad \text{より,}$$

空力パラメータは,

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times \pi/4 \times 0.05 \times 0.05 + 0.7 \times 4 \times 0.05 + 0.7 \times 4 \times 0.05)}{11} = 0.0087 \quad [m^2/kg]$$

b. 鋼製足場板 (板状物体) (図3)

長さ: 4m 幅: 0.25m 高さ: 0.04m 質量: 14kg

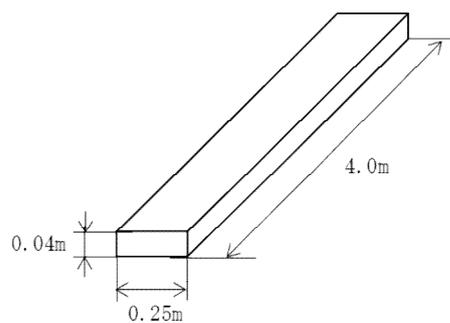


図3 鋼製足場板

板状物体なので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1} = 1.2$ 、 $C_{D2} = 1.2$ 、 $C_{D3} = 2.0$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \quad \text{より,}$$

空力パラメータは,

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (1.2 \times 0.04 \times 0.25 + 1.2 \times 4 \times 0.04 + 2.0 \times 4 \times 0.25)}{14} = 0.0525 \quad [m^2/kg]$$

c. 車両（塊状物体）（図4）

長さ：4.9m 幅：1.88m 高さ：1.87m 質量：2150kg

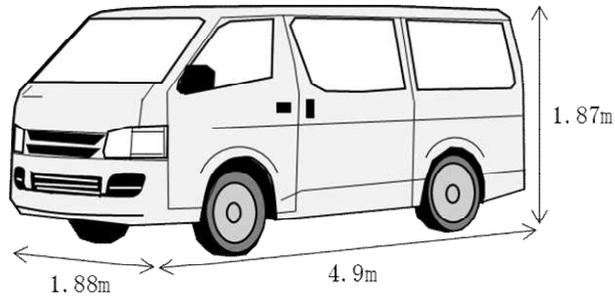


図4 車両

塊状物体なので，抗力係数 C_D は， $C_{D1} = 2.0$ ， $C_{D2} = 2.0$ ， $C_{D3} = 2.0$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \quad \text{より，}$$

空力パラメータは，

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times 1.88 \times 1.87 + 2.0 \times 4.9 \times 1.87 + 2.0 \times 4.9 \times 1.88)}{2150} = 0.0068 \quad [m^2 / kg]$$

1.2 初期高さ

飛散評価に必要な初期高さは、図5に示すとおり評価対象の飛来物と地表面との高低差である。現地調査結果を踏まえて設定するか、配置位置が特定できず高所にも配置される可能性のある評価対象は、発電所の配置等を考慮し適切に設定する。

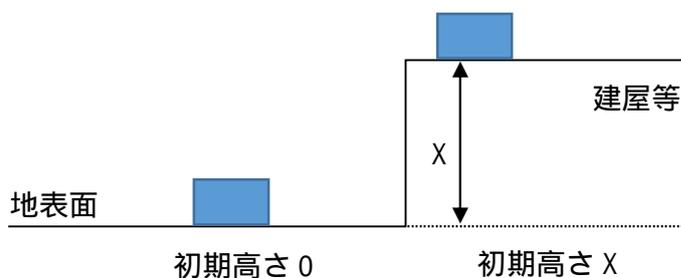


図5 初期高さのイメージ図

1.3 飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離の算出

飛来物の仕様による入力条件をもとに、解析コード「TONBOS」を用いて、飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離を求める。図6に飛散距離及び飛散高さの飛跡のイメージを示す。

解析コード「TONBOS」の詳細については、-1-1-3-3 別紙1「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

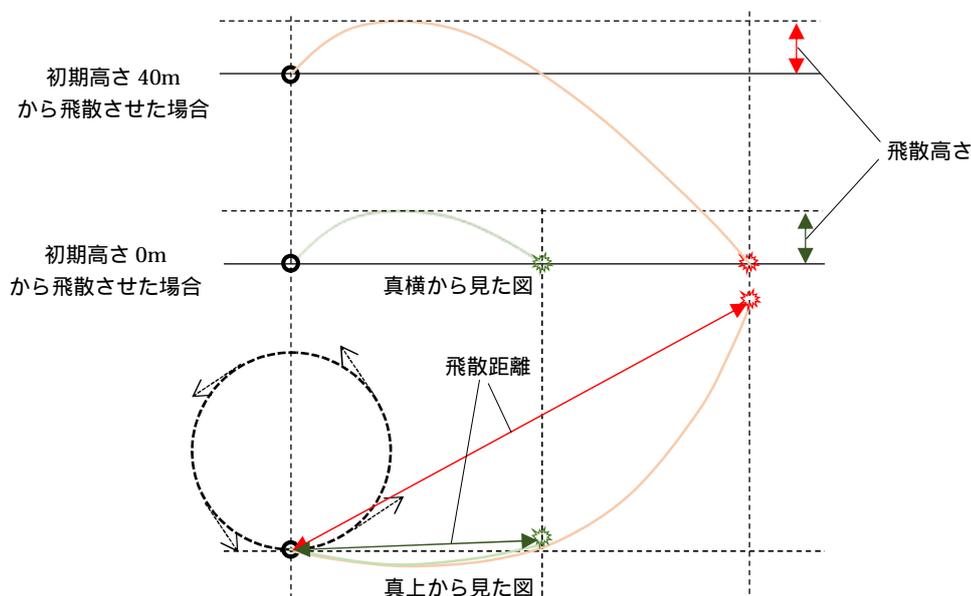


図6 飛散評価における飛跡イメージ

表 2 に、1.1(2)項の計算例に示した、足場パイプ、鋼製足場板及び車両の最大速度等の算出結果を示す。

表 2 飛来物例の最大速度等の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	足場パイプ	鋼製足場板	車両
寸法 (m)	長さ×幅×高さ 4×0.05×0.05	長さ×幅×高さ 4×0.25×0.04	長さ×幅×高さ 4.9×1.88×1.87
質量 (kg)	11	14	2150
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0087	0.0525	0.0068
初期高さ (m)	148	148	0
飛来物の 最大水平速度 (m/s)	41.309	54.806	38.181
飛来物の 最大鉛直速度 (m/s)	37.642	17.298	23.148
飛散高さ* (m)	0.57+ (148)	52+ (148)	4
飛散距離 (m)	261	373	143

注記* : () 内の値は飛来物初期高さ(地面から物品の高さ)

1.4 運動エネルギーの算出

飛散評価によって算出された飛来物の最大速度により，運動エネルギーを算出する。

(1)項に算出式，(2)項に表2に示した足場パイプ，鋼製足場板及び車両の諸元を用いた計算例を示す。

(1) 運動エネルギーの算出式

飛来物の運動エネルギーEは下式によって算出する。

$$E = \frac{1}{2} M \cdot V^2$$

M：飛来物の質量 (kg)

V：飛来物の最大速度 (m/s)

(2) 計算例

a. 足場パイプ (棒状物体)

質量：11kg 最大水平速度 41.309m/s

$$\cdot E = 1/2 \cdot 11 \cdot (41.309)^2 = 10 \text{ [kJ]}$$

b. 鋼製足場板 (板状物体)

質量：14kg 最大水平速度 54.806m/s

$$\cdot E = 1/2 \cdot 14 \cdot (54.806)^2 = 21 \text{ [kJ]}$$

c. 車両 (塊状物体)

質量：2150kg 最大水平速度 38.181m/s

$$\cdot E = 1/2 \cdot 2150 \cdot (38.181)^2 = 1568 \text{ [kJ]}$$

1.5 貫通力の算出

飛来物の貫通力を、以下のコンクリートに対する貫通限界厚さの算出式に使用されている修正 NDRC 式 () 及び Degen 式 () , 鋼板に対する貫通限界厚さの算出式に使用されている BRL 式から算出する。

< 修正NDRC式及びDegen式 >

$$\left. \begin{array}{l} \frac{X_c}{\alpha_c d} \leq 2 \quad \text{の場合} \quad \frac{X_c}{d} = 2 \left\{ \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5} \\ \frac{X_c}{\alpha_c d} \geq 2 \quad \text{の場合} \quad \frac{X_c}{d} = \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1 \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{X_c}{\alpha_c d} \leq 1.52 \quad \text{の場合} \quad t_p = \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{X_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{X_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\} \\ 1.52 \leq \frac{X_c}{\alpha_c d} \leq 13.42 \quad \text{の場合} \quad t_p = \alpha_p d \left\{ 0.69 + 1.29 \left(\frac{X_c}{\alpha_c d} \right) \right\} \end{array} \right\}$$

t_p : 貫通限界厚さ (cm)

X_c : 貫入深さ (cm)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (= 330kgf/cm²)

d : 飛来物の直径 (cm)

(飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)

M : 飛来物の重量 (kg)

V : 飛来物の最大水平速度 (m/s)

N : 飛来物の先端形状係数 (=1.14)

(保守的な評価となる、非常に鋭い場合の数値を使用)

c : 飛来物の低減係数 (=1.0)

p : 飛来物の低減係数 (=1.0)

< BRL式 >

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

T : 貫通限界厚さ (m)

d : 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m)

(最も投影面積が小さくなる衝突断面の等価直径)

K : 鋼板の材質に関する係数 (=1.0)

m : 飛来物の質量 (kg)

v : 飛来物の飛来速度 (m/s)

表3に、1.1(2)項の計算例に示した足場パイプ、鋼製足場板及び車両の貫通力の算出結果を示す。

表3 飛来物例の貫通力の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	足場パイプ	鋼製足場板	車両
寸法(m)	長さ×幅×高さ 4×0.05×0.05	長さ×幅×高さ 4×0.25×0.04	長さ×幅×高さ 4.9×1.88×1.87
飛来物の最大水平速度 (m/s)	41.309	54.806	38.181
飛来物の最大鉛直速度 (m/s)	37.642	17.298	23.148
コンクリートの貫通限界厚さ (水平)(cm)	11	12	35
コンクリートの貫通限界厚さ (鉛直)(cm)	10	5	23
鋼板の貫通限界厚さ (水平)(mm)	17	6	5
鋼板の貫通限界厚さ (鉛直)(mm)	15	2	3

竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾（以下「ガイド」という。）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽²⁾⁽³⁾」及び原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている「LES(Large-eddy simulation)」の数値解析⁽⁴⁾があるが、当社の竜巻影響評価においては、地面に置かれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデル DBT-77(DBT: Design Basis Tornado)⁽⁵⁾を選定する。

図 1 に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また、図 2 に竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所を示す。

次節以降にてフジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

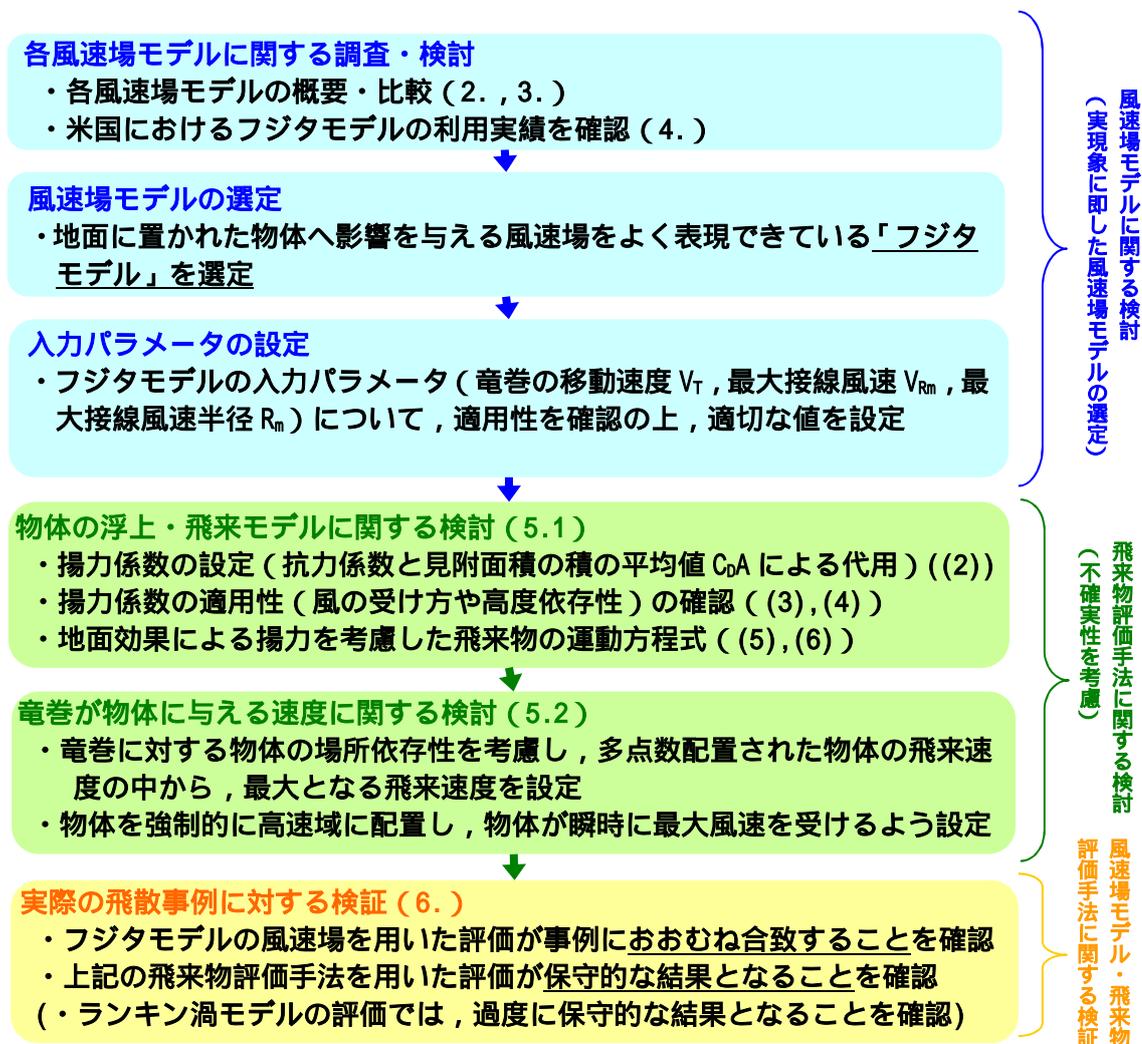


図 1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー
(括弧内の数字は、本資料の節番号)

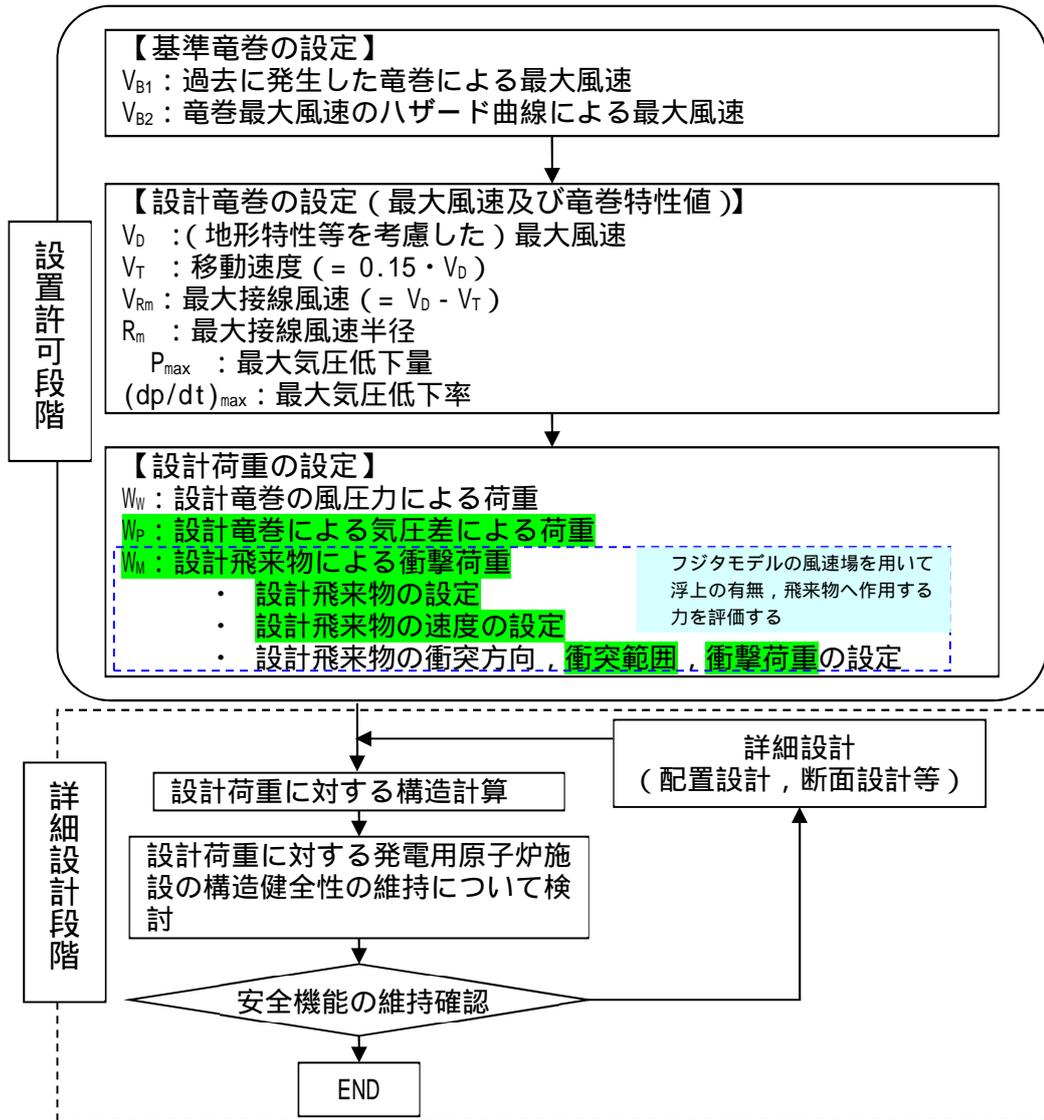


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2. 各風速場モデルの概要

2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国 NRC の実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録をもとに考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974 年 8 月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻（図 3）の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査、被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図をもとに作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している（図 4）。

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ、及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



図 3 Ash Valley 竜巻（1974.8.30）のビデオ画像

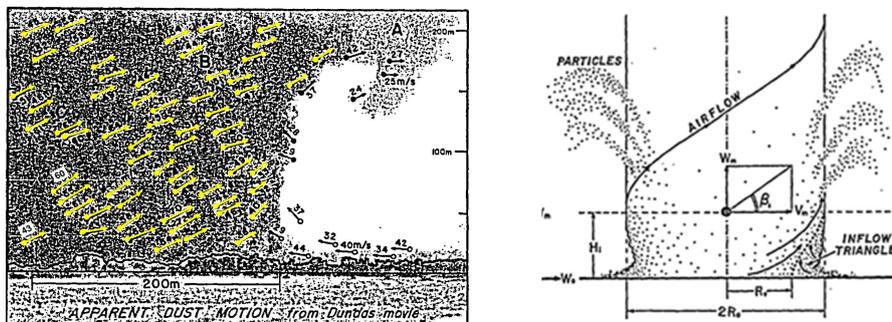


図 4 分析によって作成した風速ベクトル（左）、ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）（5）に一部加筆）

フジタモデルの風速場は図 5 に示すように半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）で構成され、内部コアと外部コアの接線（周）方向風速 V は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_z や半径方向風速 V_r は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心方向に向かう半径方向風速 V_r があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。フジタモデルは、流体の連続式を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book⁽⁵⁾の

Chapter6 に下記のとおり記載されている。(Chapter6 では、単一渦型のモデルであるフジタモデル DBT-77 を引用しているが、多重渦型のモデルであるフジタモデル DBT-78 は引用されていない。)

無次元座標 $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-\nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速 $V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-\nu^2} A(16z^6 - 7z^3) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-\nu^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$

k_0, k, ν, η, A, B は定数

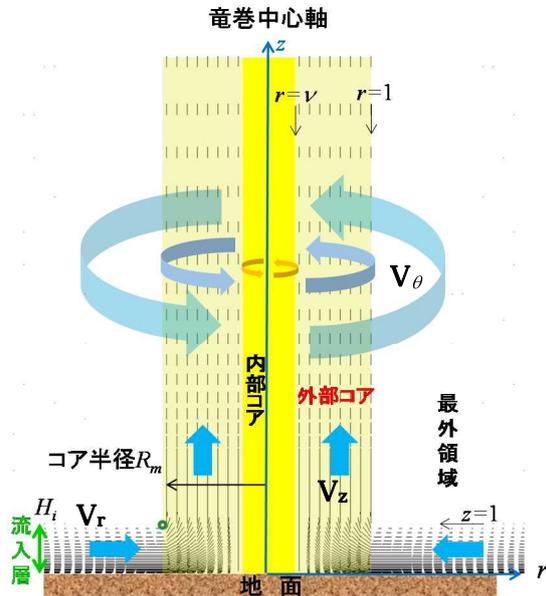


図5 フジタモデルの概要

連続の式: $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$

フジタモデルでは $c = 0$ となり連続の式を満たす。

V_θ	接線(周)方向風速
V_r	半径方向風速(中心方向が正)
V_z	上昇風速
V_m	最大接線風速
R_m	外部コア半径

内部コアの半径 R_i と外部コアの半径 R_m の比 $\nu = R_i/R_m$ については, Fujita⁽⁵⁾ が以下の経験式を提案しているため、これを用いる。

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \tag{1}$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita⁽⁵⁾ は、流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ(外部コア半径) R_m に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いる。

$$H_i = \eta R_m \tag{2}$$

ここで、 η は 1 以下の正の値であり、Fujita Work Book⁽⁵⁾ の (6.4) 式より $\eta = 0.55(1-\nu^2)$ で定義される。

上記式において、外部コア半径 $R_m = 30(\text{m})$ の場合、 $\eta = 0.501(H_i = 15(\text{m}))$ となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾ の図 2.2.3.10 における流入層高さ と竜巻半径の比 ($\eta = 0.4$ 程度) や、Kosiba⁽⁶⁾ により示されている流入層高さ ($H_i = 10 \sim 14(\text{m})$ 以下) とおおむね同じである。

なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁵⁾ の提案している値として、 $k_0 = 1/6, k = 0.03, A = 0.75, B = 0.0217$ を用いる。

フジタモデルでは、図 6 に示す通り、流入層高さ未満の接線風速をモデル化する際に、高さのべき乗に比例するとしており、そのべき乗の指数を k_0 としている。 k_0 は地表面粗度と関係が

あり、フジタモデルで用いている 1/6 乗の曲線を、図 7 の対数表示の図中に表現しようとした場合、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の間に相当する計算結果となることから、海水や積雪面などの凹凸の小さい地面状態の地表面粗度に相当する（表 1）。

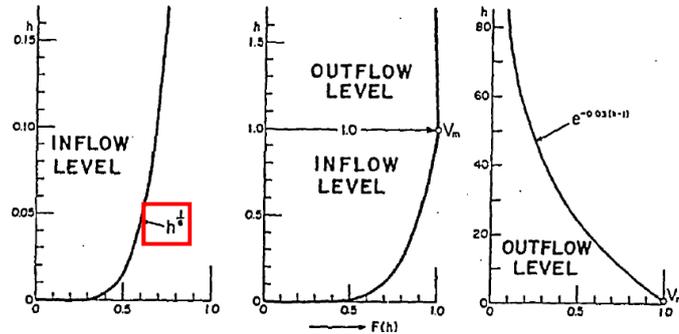


図 6 フジタモデルにおける流入層高さ未満の風速分布（左）と流入層高さ以上の風速分布（右）

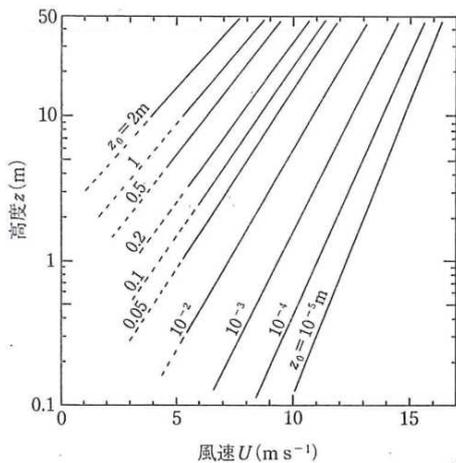


表 1 代表的な地表面状態の地表面粗度 z_0 の概略値

地面状態	地表面粗度 (m)
大都市	1~3
森林	0.3~1
田園集落	0.2~0.5
畑や草地 (草丈 1 m)	0.1~0.3
同 (草丈 0.1 m)	0.01~0.03
水田	0.01~0.05
海水や積雪面	$10^{-4} \sim 10^{-2}$
湖や海面	$10^{-5} \sim 10^{-3}$

近藤純正 地表面に近い大気の科学より

図 7 地表面粗度 z_0 による風速と高度の関係

一方で、柏崎刈羽原子力発電所の敷地内には、建屋等の構造物や樹木が林立しており、海水や積雪面などの地表面粗度よりも大きく、地表面付近の減速も大きい(図 8)。これらを踏まえると、柏崎刈羽原子力発電所にフジタモデルを適用するにあたり、 k_0 は 1/6 より大きい値を入力の方がより現実に近いと考えられるが、不確かさ等を考慮し実際より地表面付近での減速の小さい 1/6 を用いるのは妥当と考える。

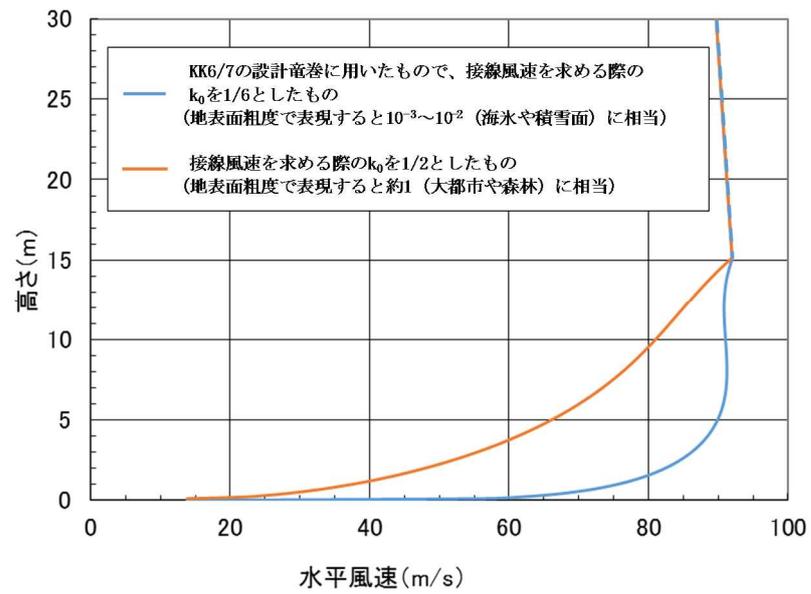


図8 地表面粗度による高さ と 水平風速の関係

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル⁽³⁾は、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加している(図 9)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、図 10 に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

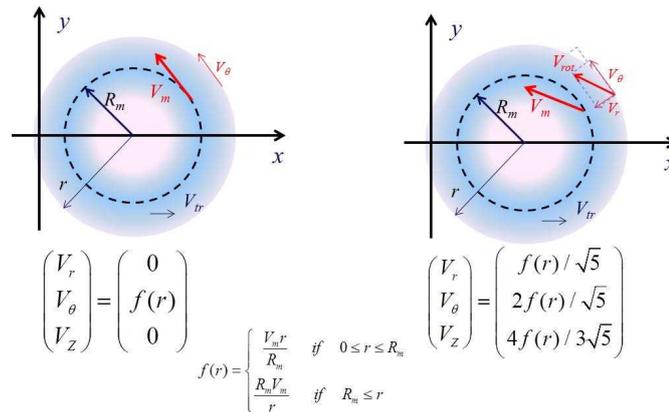


図 9 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

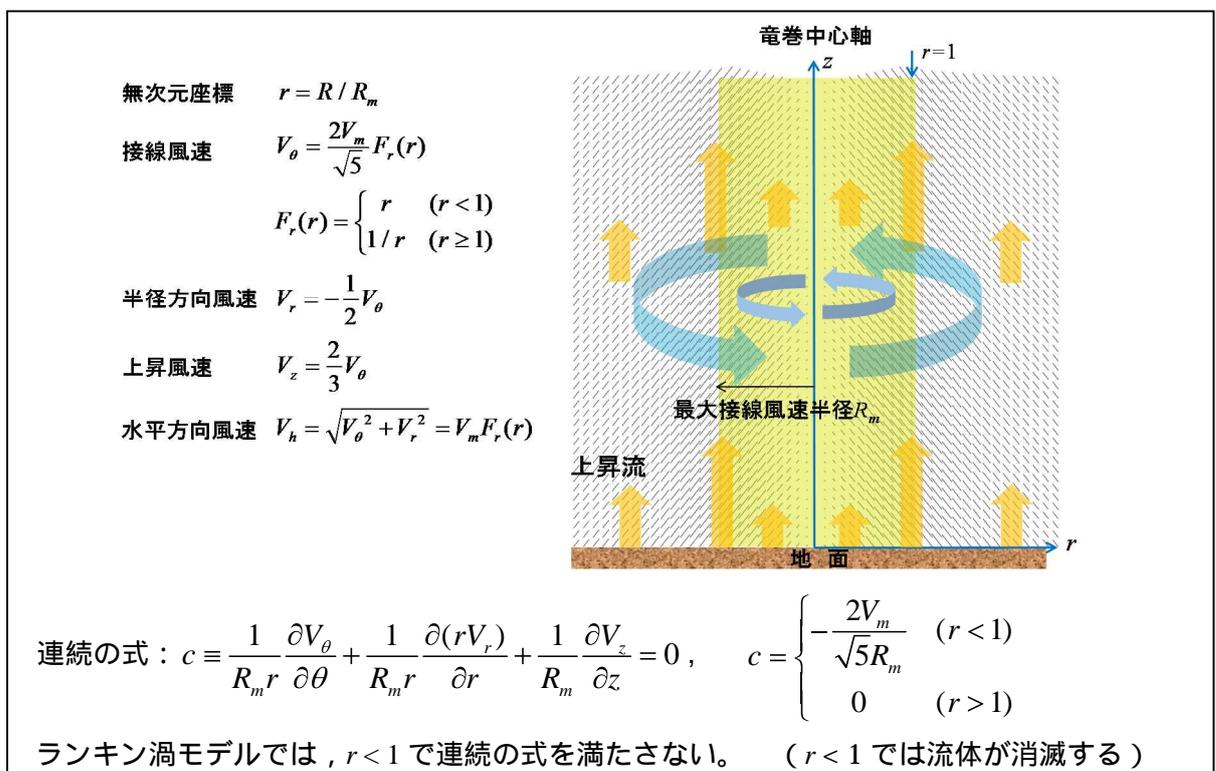


図 10 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。図 11 に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式 (運動量保存式及び質量保存式) は、流体が非圧縮性であると仮定する場合、以下ようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

ここで、 U_i 及び P は、 i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また、 x_i は i 方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (5)$$

ここで、 h は解像スケール (メッシュ幅相当)、 C_s は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij}=0.5(\partial U_i/\partial x_j + \partial U_j/\partial x_i)$ で定義される。

以上のとおり、LES は風速の時間的な変動 (乱流) を考慮できる点が特長となっている。

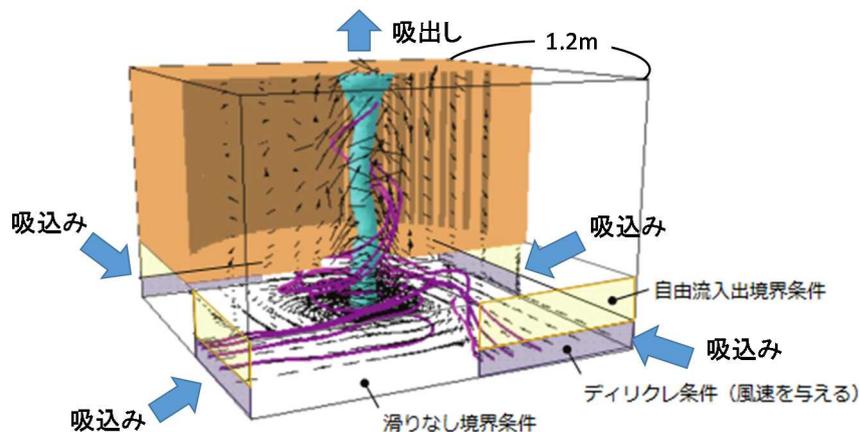


図 11 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況 ((4) に一部加筆)

以上が一般的な LES の説明となる。LES の手法自体は、広く活用されているものであるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また、ガイドで例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

ガイドで例示されている LES による解析では、境界条件 (側面からの流入風速の分布等) や解析領域の形状 (流入箇所を局所的に配置等) を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を

生成している。渦の生成に当たって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所・局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。

風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s（風速 + 移動速度）に設定している。Maruyama⁽⁷⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。

流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

（参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡）

図 12 にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析（長さ 6m × 幅 2.4m × 高さ 2.6m, 2300kg, $C_D A/m=0.0105$, 最大風速 100m/s）における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ H_i は、外部コア半径 $R_m=30$ (m) の場合、 $H_i=15$ (m) であり、2.1 に記載のとおり他の文献⁽⁴⁾⁽⁶⁾ともおおむね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ H_i を ±10% 変化させた場合の飛跡も示す。

$H_i=15$ (m) の際のコンテナの最大飛散距離 189.4(m) に対し、流入層高さ H_i を ±10% 変化させた場合の最大飛散距離は 183.4(m) (-3.2%)、194.7(m) (+2.8%) となり、流入層高さ H_i に対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。

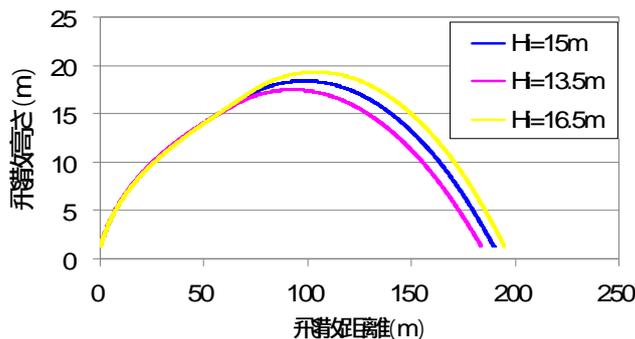


図 12 流入層高さを变化させた場合のコンテナの飛跡（最大風速 100m/s）

3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表2に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図13に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含め、より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的良好に表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析するには適切でない。ガイドで例示されているLESで生成した風速場も、2.3の通り人為的な境界条件を設定していることや、小規模領域での計算結果を定数倍して実スケールサイズの値に変換している⁽⁴⁾⁽⁷⁾ことから、地上付近での風速場が実現象と乖離していると考えられるため、地上からの飛散挙動を解析するには適切でない。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点もないことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表2 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている【対象施設の例】Pantex Plant(テキサス州)、Oak Ridge(X-10, K-25, Y-12)(テネシー州)、Savannah River Site(サウスカロライナ州) 	<ul style="list-style-type: none"> 実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している 比較的簡易な代数式により風速場を表現できる 流体の連続式を満たす定式化 <p>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> 特になし (ランキン渦モデルと比較すると、解析プログラムが複雑になるが、計算機能力の向上、および評価ツールの高度化により問題とならない)
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> 米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている ガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる 	<ul style="list-style-type: none"> 風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離 流体の連続式を満たしていない <p>地上からの飛散挙動を解析するには適切でない</p>
非定常乱流モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> ガイドにおいて、飛来物および最大速度の設定例に使用されている 	<ul style="list-style-type: none"> 風速の時間的な変動、乱れをある程度模擬できる 	<p>ガイドに例示されているLESで生成した風速場で飛散解析を行う場合、以下の問題がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> 小規模領域での計算結果を、実スケールサイズに規格化するため、粘性の影響が実現象と乖離(特に地表面付近) 人為的な境界条件を設定しており、地面や境界近傍で実現象と乖離 実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため、飛来物評価が非常に保守的な場合がある(瞬間的な最大値は160m/s程度) <p>地上からの飛散挙動を解析するには適切でない</p> <ul style="list-style-type: none"> 実スケールでの解析は、膨大な計算機資源が必要になるため、現実的ではない

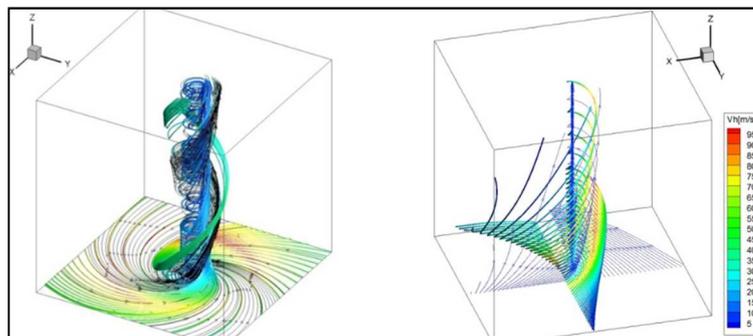


図13 フジタモデル(左)とランキン渦モデル(右)の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁸⁾において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾（文献(8)のD.4節：Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.）。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ0から4まで分類し、カテゴリ0～2は一般的な建築物、カテゴリ3、4は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ3、4に該当する施設として、Pantex Plant、Oak Ridge(X-10、K-25、Y-12)、Savannah River Siteが挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国DOE管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾にてまとめられている。この報告書では、フジタモデルDBT-77を他の風速場モデルと比較検討しており、流体力学の連続の式を満足する（Fluid mechanics equations of continuity are satisfied）こと、モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する（Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies）こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978年12月3日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生したF4竜巻による鋼製材の飛来について、フジタモデルDBT-77で再現した事例⁽⁹⁾がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾及び米国気象学会論文集⁽¹²⁾に掲載されている。

なお、米国LES（Louisiana Energy Services）の濃縮施設（NEF：National Enrichment Facility）では、上記のDOE施設の基準に基づき竜巻飛来物（鋼鉄パイプや木材の板等）を設定しており、米国NRCは当該施設に対する安全評価報告書（NUREG-1827）⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対するLESの竜巻設計を是認している。

（Based on the review of the information concerning tornados and tornado - generated missiles,NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii)the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.）

4.2 NRCガイドでの取扱い

2.1でも述べたとおり、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国NRCの要請を受けて考案されたものであるが、米国NRC Regulatory Guide 1.76⁽²⁾では、フジタモデルについて“The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).”と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRCスタッフ自

身で水平方向の飛来物速度 (Simiu らの運動方程式⁽³⁾) を計算するプログラムを開発している (The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.) ことが明記されている。

したがって、米国 NRC ガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

(参考) 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国 NRC では、竜巻防護対策の追加を検討している実用炉に対し、確率論的竜巻飛来物評価手法 TORMIS の利用を承認している。

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル (統合風速場モデル) が利用されていることから、米国 NRC においても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない。

5. 飛来物評価における不確定性の考慮

前節まででは、フジタモデルの風速場を適用することの妥当性について述べてきた。フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動に関する不確定性や、竜巻が物体と衝突する際の竜巻風速に関する不確定性等について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかを説明する。

5.1 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方と、その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

(1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、ガイドの飛来物運動モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と同様に、飛来物は図 14 - 1 のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力) F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力(次頁参照)を考慮している⁽¹⁴⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図 14 - 2 に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力 F_L として考慮する。

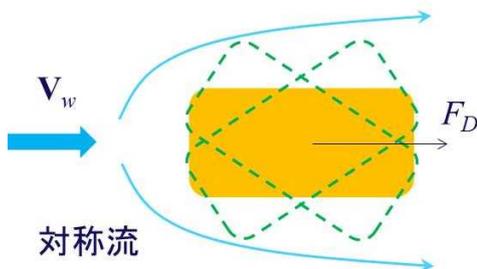


図 14 - 1 空中で飛来物へ作用する力

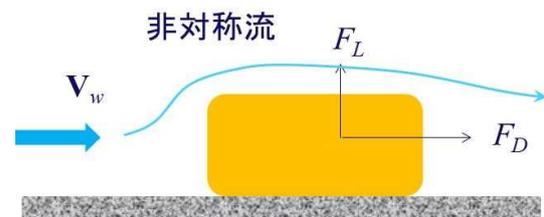


図 14 - 2 地面付近で飛来物へ作用する力

このような揚力 F_L は地面での揚力係数 C_L 、地上での物体の見附面積(風向方向から見た投影面積) a を用いて、以下のように表される⁽¹⁵⁾。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (6)$$

ここで、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_M は飛来物の速度ベクトル、 \mathbf{V}_w は風速ベクトル、 $|\cdot|_{x,y}$ は \cdot の x,y 成分(水平成分)の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし、物体と地面の完全接触面積を s とした場合、無風時(図 15 の左)は物体が流体に接する全表面で圧力は一定(p_0)とみなせ

るため、鉛直方向（上向き）に作用する揚力 F_{L0} は、以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0(A-s) = -p_0 s \quad (7)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s=A$ となるため、大気圧 p_0 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用し、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、大気圧 p_0 に完全接触面積 s を乗じた力が下向きに作用することになるため、いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時（図 15 の右）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力 p_1 、下面での圧力 p_2 と仮定）する場合、鉛直方向の流体力 F_L は、以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能）。

$$F_L = -p_1 A + p_2(A-s) \quad (8)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s=A$ となるため、上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。

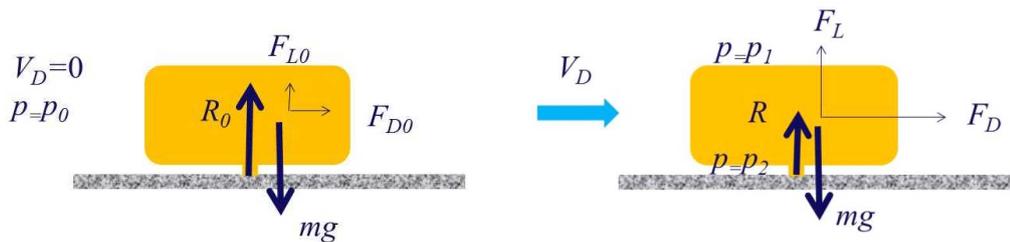


図 15 部分的に地面に接する物体に作用する力（左：無風時，右：強風時，
 R_0, R ：無風時，強風時における垂直抗力）

(2) 揚力係数の設定

(6)式の C_{La} は風洞実験から求められる値であるが、実験条件(風を受ける方向等)により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。本評価では、条件によらず保守性を確保できるよう、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 C_{DA} を用いることとする。

$$C_{DA} = \frac{1}{3}(C_{Dx}A_x + C_{Dy}A_y + C_{Dz}A_z) \quad (9)$$

ここで、 C_{Dx} は空中での x 軸方向流れに対する抗力係数、 A_x は x 軸方向流れに対する見附面積であり、その他も同様である。

飛来物の運動モデルを図 16 に示す。上記(9)式の考え方は、図 16 に当てはめ整理すると以下のとおり。

- ・物体がある程度浮き上がった後の状態(図 16 の状態 B)であれば、物体はランダム回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。
- ・物体が地面に置かれた状態(図 16 の状態 A)から、実際に浮き上がる際には、物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。
そのため、これに準ずる方法として、評価に用いる係数は、地面から浮かせた状態で実測された C_{La} のうち、物体が地面に置かれた状態(図 16 の状態 A)にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで、保守性は確保できると考えられること。
- ・物体が地面に置かれた状態(図 16 の状態 A)と物体がある程度浮き上がった状態(図 16 の状態 B)での評価にて、共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。

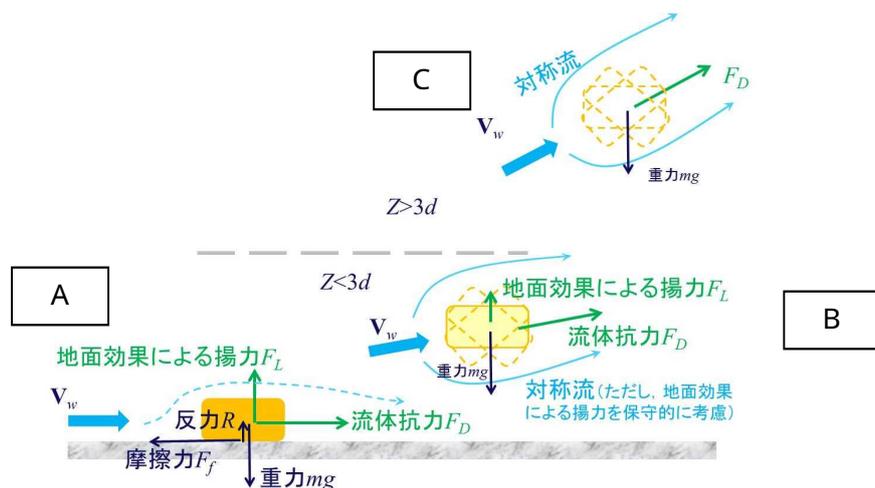


図 16 飛来物の運動モデルの模式図
(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高度範囲, C : $Z > 3d$ の高度範囲, ただし, $Z = z - d/2$, d : 物体高さ)

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_{La} をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は、一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{La} \quad (10)$$

これを变形すると、 $C_{La} = 2F_L / \rho U^2$ となり、風速、風向及び物体の向きが一定であれば、揚力 F_L 及び速度圧 $q = \frac{1}{2} \rho U^2$ は見附面積 a の取り方には無関係の物理量であるので、 C_{La} も見附面積 a の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。一方、同じ風速 U が同じ物体に作用する場合であっても、地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積 C_{La} は変化する。（例えば、円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが、直角の場合には最大となる）

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の C_{La} の最大値（又は、それに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される C_{DA} の値を比較する。（表3）

表3より、 $C_{DA} > C_{La}$ の関係が成立しており、 C_{La} の代用として C_{DA} の利用が適切であることが確認できる。なお、 C_{DA} は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば、一辺 d の立方体では $C_{DA} = 2d^2$ 、一辺 d の平板では $C_{DA} = 0.66d^2$ となる。両者には約3倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の C_{La} 値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして C_{La} 値の代わりに C_{DA} を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（図16の状態A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの3倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図16の状態A、B、Cの全領域で揚力の連続性が確保されている。

表 3 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係(1/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3 ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 22 ~ 31m/s, $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4.0 \times 10^6$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (セダン:長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.42m, 質量 1633kg)	12.07m ²	7.76m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²²⁾ (風速 0 ~ 150m/s, $Re=0 \sim 3.0 \times 10^6$) 4 つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から C_{La} 値を計算 ($C_{La}=2mg/U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン:長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.69m, 質量 2086kg)	14.58m ²	7.89m ²	
立方体		一辺の長さ D	$2D^2$	0.2 D^2 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8.0 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を C_{La} (実測値) として記載
柱状	円柱	長さ λ , 直径 D	0.47 $D\lambda$	0.2 $D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La} (実測値) として記載
				0.05 $D\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La} (実測値) として記載 (電力中央研究所風洞実験)
	角柱	長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	$0.8D\lambda$ ($1.3D\lambda$) ^{*2}	0.5 $D\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8.0 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直となる配置(角柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La} (実測値) として記載
				負値(地面との隙間が 0.167 D 以上の場合)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行) 長方形断面(アスペクト比 4:3)の角柱は地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となる(電力中央研究所風洞実験)

表3 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係(2/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200\text{mm}$, $D=5\text{mm}$, $\lambda=1000\text{mm}$ の場合)	$0.66B\lambda$	0に近い値 (地面から $0.25B$ 離れた 位置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (幅 B に基づく $Re=2.0 \times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置(平板は地面と平行)における値を C_{La} (実測値) として記載
	薄い翼	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100\text{mm}$, $D=15\text{mm}$, $\lambda=300\text{mm}$) (参考文献 (20)では B の代わりに c で表記)		$0.2B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²¹⁾ (幅 B (参考文献(20)では c) に基づく $Re=2.2 \times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置(翼面は地面と平行)
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	$0.66B\lambda$ $0.66(B\lambda+D(B+\lambda))^{*2}$	$0.1B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁹⁾ ($Re=5.0 \times 10^4$ 程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置(平板状ブロックは地面と平行)における値を C_{La} (実測値) として記載

注記*1 : 柱状及び平板では微小項を無視して記載

*2 : 塊状とみなせる場合

(3) 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_{La} が、飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} で代用できることについて、表 3 における C_{La} (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行う。

表 3 の各文献中の実験でのレイノルズ数 Re は同表の備考欄に示すとおり、 10^4 から 10^6 のオーダーにある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7 ft. , 幅 5.8 ft. , 高さ 4.3 ft.) では風速を 30 mph (13m/s) から 120 mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁶⁾。これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、図 17 に示すようにレイノルズ数 Re が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。表 3 の EPRI の円柱の風洞試験結果⁽¹⁶⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる(例えば、相対風速 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re=6.0 \times 10^5$ 程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0 ~ 16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3.0 \times 10^4$ から 1.0×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 18 に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_{La} はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 3 に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

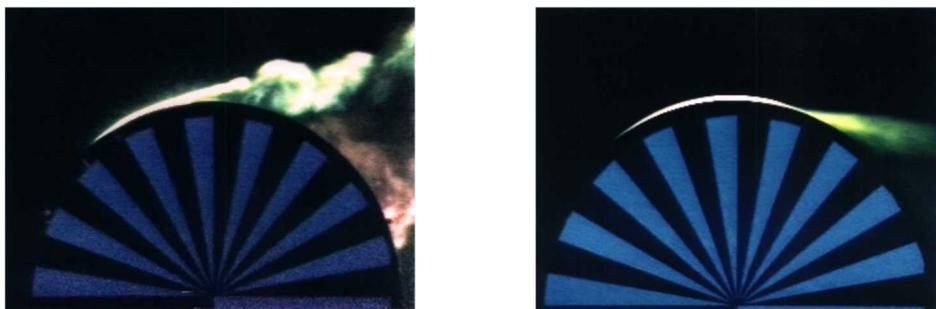


図 17 可視化した円柱周りの流れ (左 : $Re = 4.0 \times 10^4$, 右 : $Re = 2.0 \times 10^5$)

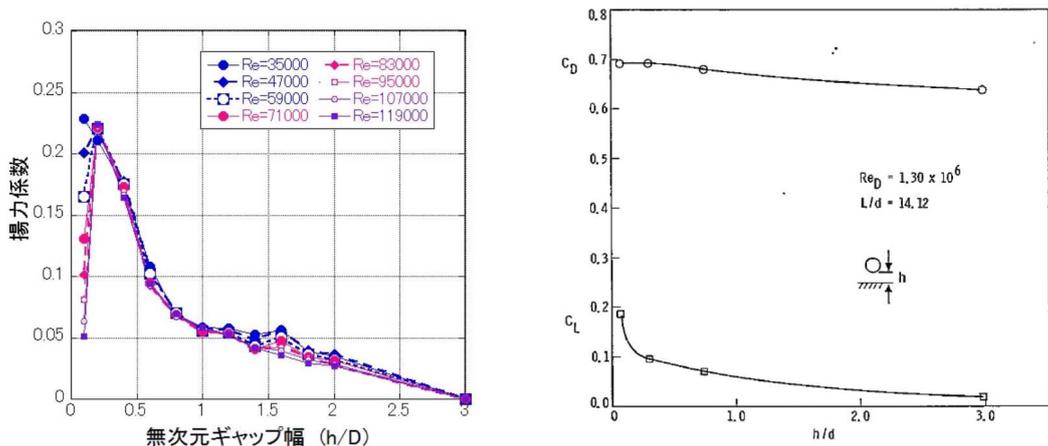


図 18 (左) 電力中央研究所の風洞試験 ($Re=3.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$) と
(右) EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) で得られた円柱揚力係数

(4) 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので、既往の風洞実験の結果⁽¹⁶⁾⁽²³⁾を考慮して、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度であるとき消滅すると仮定する。

具体的には、地面から z の距離 (高度) にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化する。(Z : 物体底面の高度 ($= z - d/2$))

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

ただし、 $f(Z/d)$ は、EPRI の風洞実験結果⁽¹⁶⁾⁽²³⁾を参考に、以下の反比例式とする。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} & (0 \leq Z \leq 3d) \\ 0 & (3d < Z) \end{cases} \quad (12)$$

また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱)、板状物体 (平板) の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

a. 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて、地面及び風洞中央 ($h/d = 3.5$) に設置した場合にて計測されており、図 19 - 1 に示すように流入角 (0° は正面、 90° は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、図 19 - 2 にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用した揚力係数に近いものと考えられる。

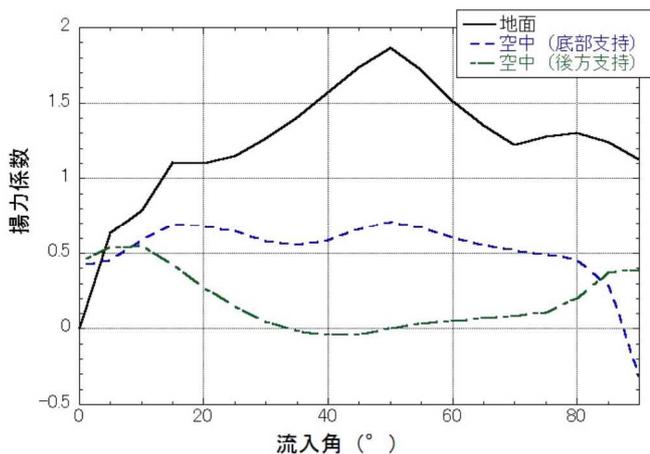


図 19 - 1 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

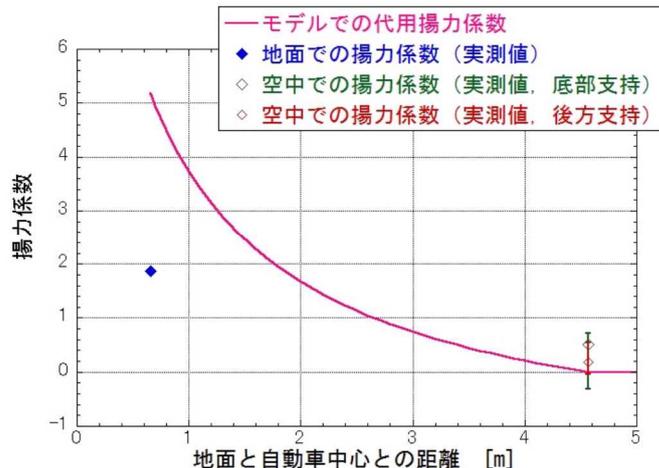


図 19 - 2 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

b. 柱状物体 (角柱・円柱) の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法: 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速: 3.0 ~ 16.5m/s) にて測定しており, 図 20 にその結果を示す。角柱の場合, 地面から $0.167D$ 以上離れると揚力は負となるので, 正の揚力を与える本モデルで代用した揚力式 (図 20 の赤線) は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は, EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて測定しており, 図 21 に示すように本モデルで代用した揚力係数 (図 21 の赤線) は概ね実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため, 保守的な結果となっていることが分かる。3D 付近では, 風洞試験による揚力係数が代用した揚力係数を上回る結果となっているが, 風洞試験においては, 揚力が作用しやすい姿勢で試験を行っており, 実際の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

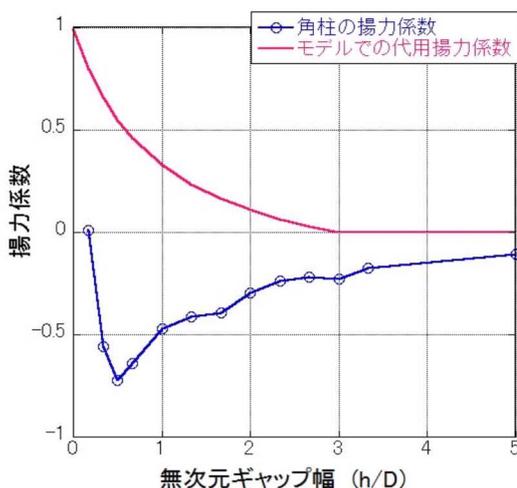
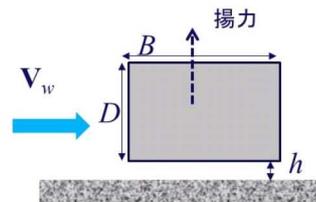


図 20 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係 (幅 $B=80\text{mm}$ × 高さ $D=60\text{mm}$ × 模型長 1000mm)



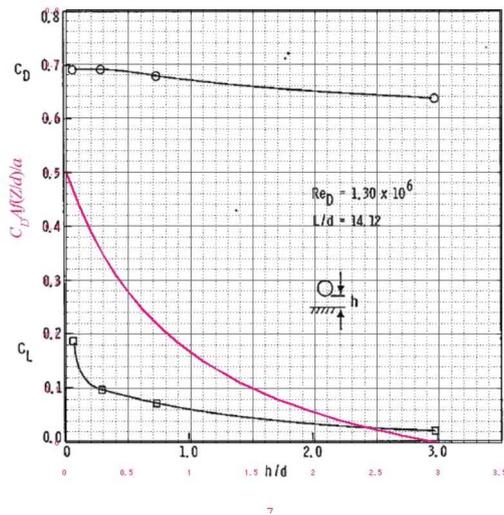


図 21 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

c. 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽²¹⁾に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（図 22 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

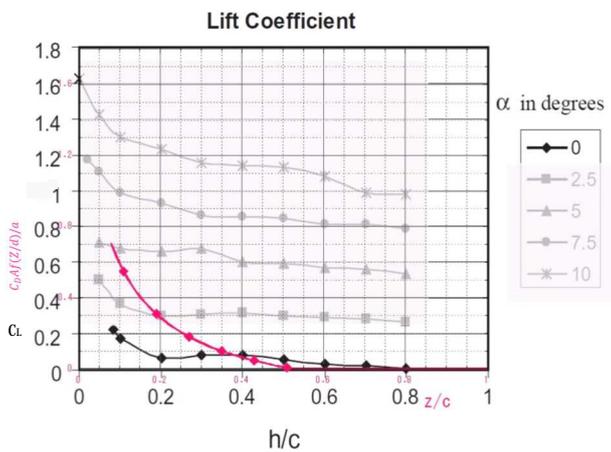


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

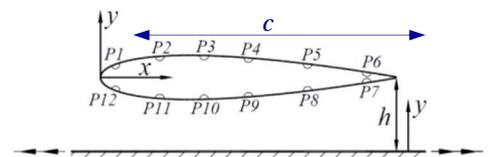


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 22 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(5) 飛来物の運動方程式

上記(1)～(4)を踏まえ，重力加速度 g ，上向きの単位ベクトル \mathbf{k} を用いて，飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L) \mathbf{k} \quad (13)$$

飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いる。具体的には，時刻 $t = \tau$ における飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として，時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置を以下の式で求める。ただし， $\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t = \tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \Delta\tau \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau) \Delta\tau^2}{2} \quad (15)$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には，時刻 $t = \tau$ における風速場も必要であるが，初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_i で移動することを仮定しており，任意の時刻での風速場を陽的に求められるため，飛来物速度・位置を算出することができる。

(6) 飛来物の運動方程式（(13)式）に関する考察

地上面の物体（図16の状態A）が浮上するには，地面からの反力が消滅（ $R < 0$ ，つまり $mg < F_L$ ）する条件で浮上し，浮上後は，(13)式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad (18)$$

ここで，飛来物速度 $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ ，竜巻風速 $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり，右辺第1項が流体抗力 F_D の加速度を表しており，(18)式の右辺第3項が地面効果による揚力 F_L の加速度を表している。上記の式で，物体が静止している状態（上記の式(16)～(18)で飛来物速度 \mathbf{V}_M を0）を仮定すると，以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (16')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (18')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合(図16の状態A)では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式(18')の右辺第1項は右辺第2、第3項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \quad (19)$$

例として、竜巻コア半径30m、設計竜巻の最大風速92m/sの竜巻が原点に位置しx方向に14m/sで移動する場合、点(0, -30m)における式(18')の右辺第1項の値(z方向抗力(流体抗力)による加速度)と第3項の値(地面効果による揚力加速度)を図23に示す。

図23より、地面上(z=0)においては、z方向抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。

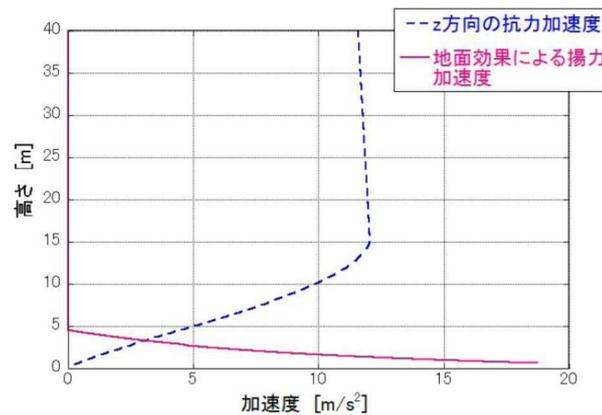


図23 地面近傍の飛来物に作用するz方向の加速度
(飛来物の特性: $0.5\rho C_D A/m=0.004 \text{ [m}^{-1}\text{]}$, $d=1.31 \text{ [m]}$)

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は、上昇風速が水平風速の約60%にも達するため、地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくい。そのため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 L を付加していない(図24)。

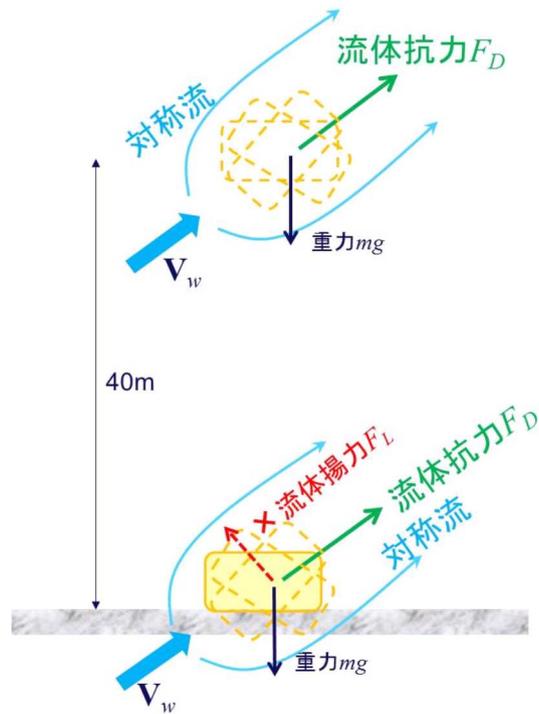


図24 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽²⁾ に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点数配置した場合の飛来速度の違いを比較する。配置の違いについて、図 25 に示す。

1 点配置の場合は、特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置 $(x,y)=(R_m,0)$ ）に物体 1 個を設置する。また多点数配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置する。その上で飛散させた物体のうち、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

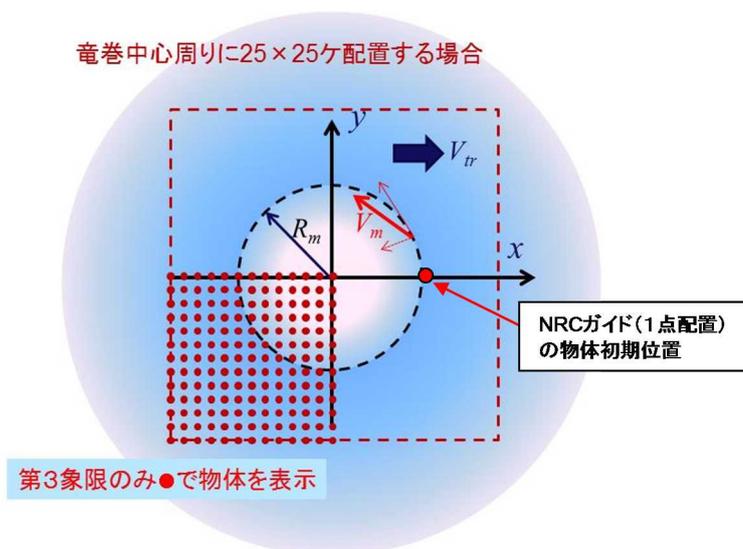
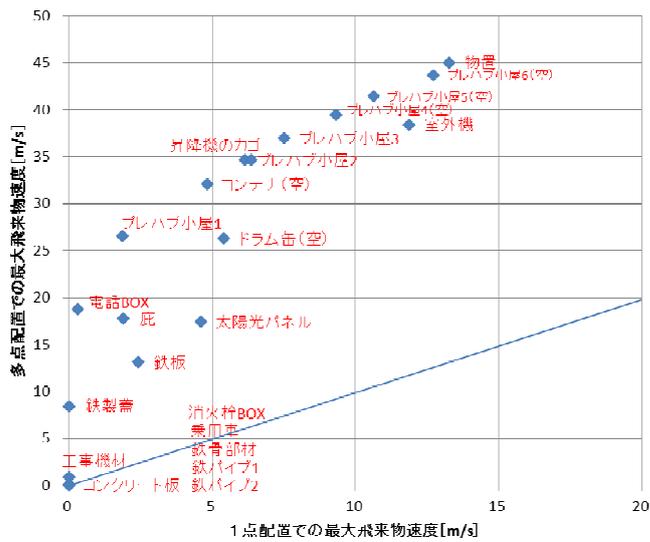


図 25 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 92m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_t を 14m/s、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾に掲載されている物体の飛行定数（5.1 の C_{DA} を質量で割った値： $C_{DA}/m(\text{m}^2/\text{kg})$ ）を用いる。図 26 に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点数配置の手法では、飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となる。多点数配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

したがって、物体を多点数配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。



物体名	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	飛行定数 $C_D A / m^2$ /kg
フォークリフト	3.60	1.10	2.10	0.0026
トラック	5.00	1.90	1.30	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	1.10	0.0036
乗用車	3.10	1.60	1.30	0.0052
工事機材	2.44	0.65	1.20	0.0058
プレハブ小屋1	5.00	5.00	3.00	0.0083
コンテナ (空)	2.40	6.00	2.60	0.0105
昇降機のカゴ	1.20	1.20	2.80	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	2.60	0.0119
プレハブ小屋3	4.60	2.30	3.30	0.012
プレハブ小屋4 (空)	5.00	5.00	3.00	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.40	0.0169
プレハブ小屋5 (空)	1.85	1.85	2.60	0.0189
プレハブ小屋6 (空)	4.60	2.30	3.30	0.0222
物置	1.80	0.90	1.50	0.0315
室外機	0.30	0.25	0.80	0.0343
コンクリート板	1.50	1.00	0.15	0.0021
庇	11.00	2.10	0.20	0.0242
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	0.0364
鉄板	2.00	0.25	0.04	0.0486
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	0.0582
鉄骨部材	4.20	0.30	0.20	0.0089
鉄パイプ1	2.00	0.05	0.05	0.0057
鉄パイプ2	1.00	0.05	0.05	0.0059
ドラム缶 (空)	0.90	0.60	0.60	0.0203

図 26 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較 (左) と
物体のパラメータ (右)

前頁の図 25 に示す物体の多点多数配置 (竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置) を初期状態として適用したが, この手法は, 物体の直上に竜巻を発生させており, 竜巻発生地点の不確定性についても考慮した設定となる。

図 27 に遠方から物体に接近する竜巻と, 物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況 (海上で竜巻が発生して上陸する場合等) を考慮すると, 竜巻は遠方から物体に近づくため, 最大風速より低い風速に曝され, 飛散することになる。しかし, 物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで, 実際の竜巻による飛散と比較して, より厳しい結果を与えることになる。

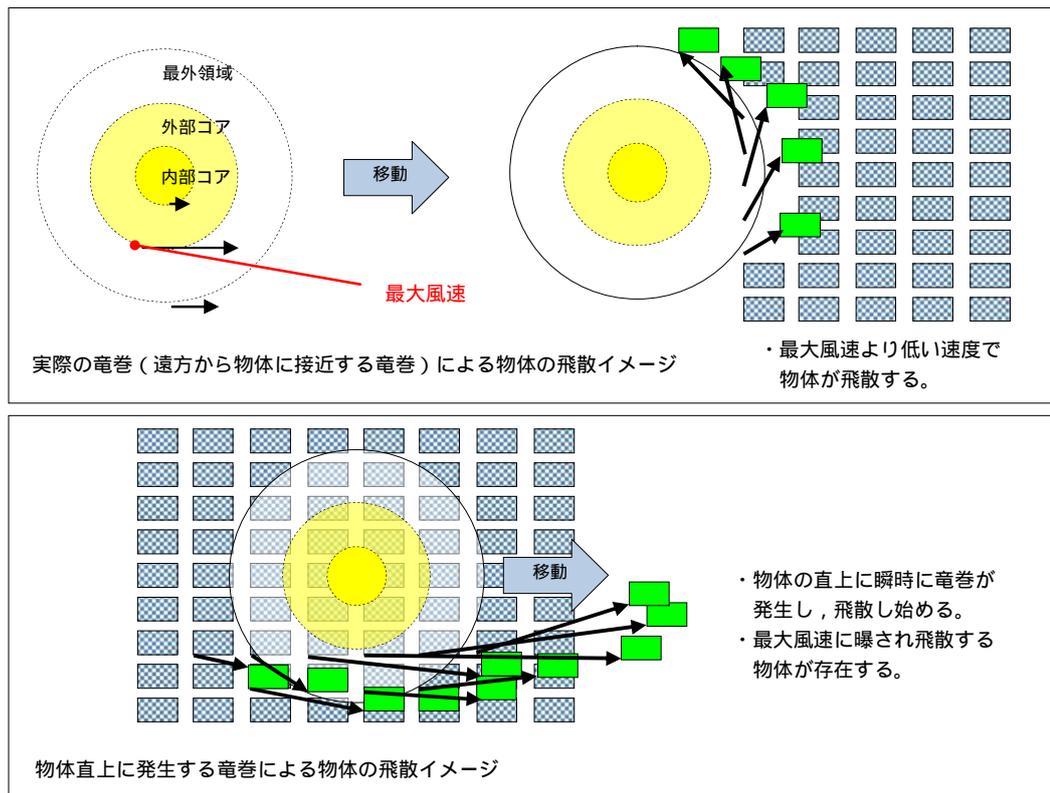


図 27 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点多数配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると思われる。

5.3 飛来物評価法のまとめ

飛来物の浮上・飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とする。

また、物体を多点多数配置し、その物体直上で竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内で物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とする。

以上により、フジタモデルを用いて飛来物の飛散速度評価を行う場合でも、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと思われる。

なお、参考として図 28 に本検討の条件設定による、物体の飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子が分かる。

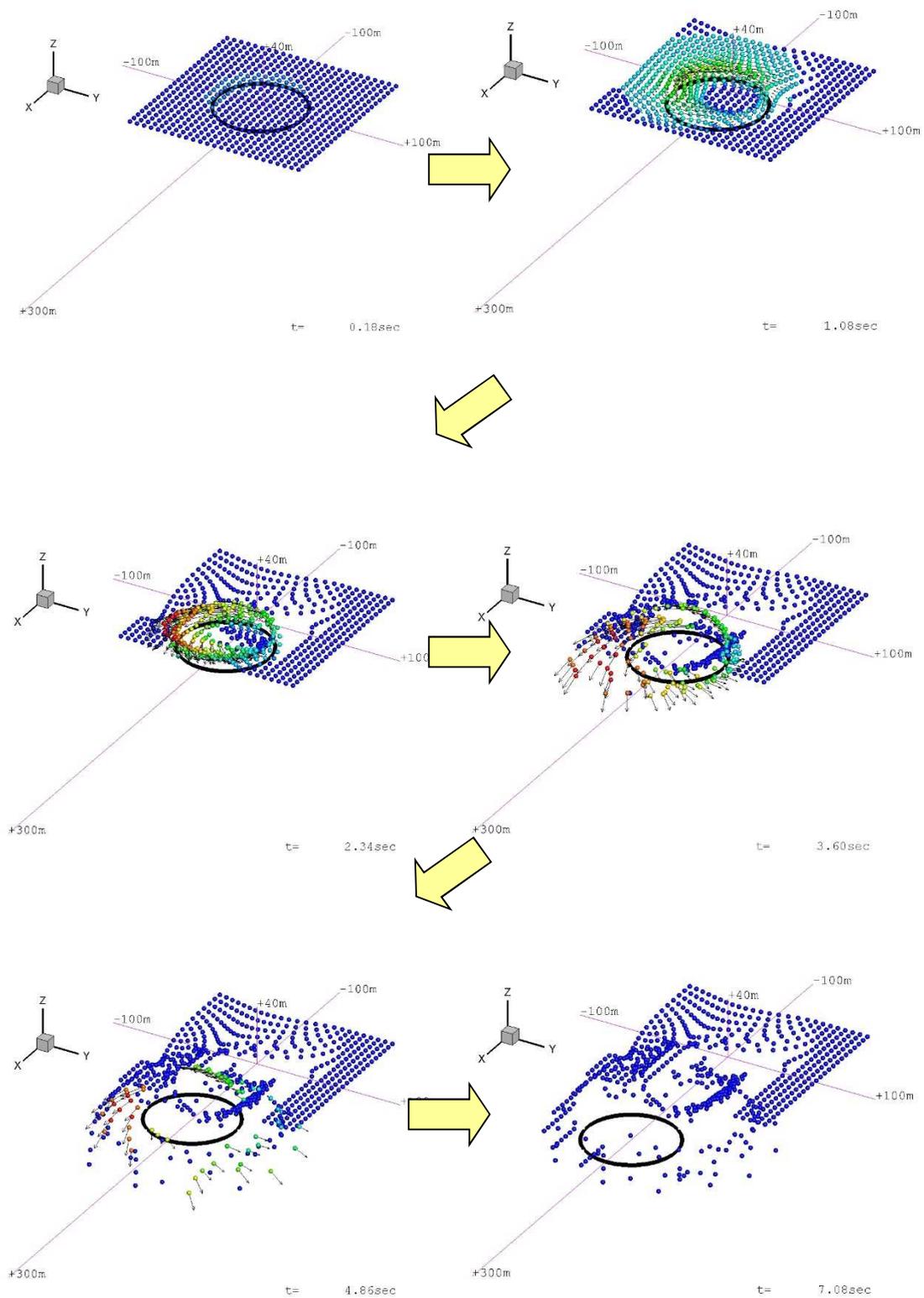


図 28 竜巻による物体の飛散イメージ

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までは、フジタモデルの風速場を用いる優位性や、飛来物評価を行う上で考慮している事項等についての説明である。

本節では、フジタモデルの風速場や、前節の飛来物評価法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行う。

6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表4に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速(69m/s, 92m/s, 116m/s)を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行う。その結果を表5に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F2相当の風速(69m/s)で評価しても大きく飛散することになり、フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

表4 フジタスケールで示されている自動車の飛散状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50 - 69	cars blown off highway (自動車は道路からそれる)
F3	70 - 92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93 - 116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, 又は, かなりの距離を転がる)

表5 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

(自動車の特性: 長さ 5.1m × 幅 1.77m × 高さ 1.31m, 質量 1814.4kg, $C_D A/m = 0.0066 \text{ m}^2/\text{kg}$)

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻移動速度 [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	8.9	4.4	0.1
F3	92	79	13	30	35	1.8
F4	116	99	17	51	95	4.3

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した⁽²⁴⁾。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径8～10インチの木が折れた事例等も確認されており、図29は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは8フィート、直径(内径)は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表6のとおりとする。



"Courtesy of HathiTrust" <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65> ⁽¹⁹⁾

図29 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	<p>・パイプを収納した木箱(一部は二段重ね)は浮上せず転倒し、パイプが周辺7m～9mに散乱。 (Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long.⁽²⁴⁾)</p>
------	---

表6 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9 inch (0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m ³
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0080m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数 51 × 51 個, 竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置 ・設置高さ 1m (パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。) 	

計算結果を表7に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況とおおむね合致している。

なお、参考としてランキン渦モデルで評価した場合、飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり、実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。

表7 Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ*2	最大水平速度
フジタモデル	1m	1.2m	0.0m	4.9m/s
ランキン渦モデル	1m*1	42.6m	0.34m	30.7m/s
ランキン渦モデル	40m	227m	0.34m	40.9m/s

注記*1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とする。

*2：初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている⁽²⁵⁾。被災状況を図30に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図30左上画像の②）。また、4tトラックの他に2台の自動車（図30左上画像の③と④）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図30 佐呂間竜巻（2006.11.7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）⁽²⁵⁾
 （文献(25)で示されている竜巻被害の方向を → で加筆）

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック，乗用車）の飛散評価を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行う。方法としては、下記の2通りとする。

- ・ 竜巻特性や飛来物（4tトラック，乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- ・ 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

(1) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

a. 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物(4tトラック)の条件を表8のように設定する。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認する。

車両と竜巻中心との距離を18m、20m、22mとした場合の解析結果を表9及び図31に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

表8 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s	
	最大接線風速	70m/s	
	移動速度	22m/s	
	コア半径	20m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両質量	4000kg
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0056m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数 1 個 ・竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない ・設置高さ 0m 		

表9 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	45.4m	2.8m	25.8m/s
2	20m	35.5m	2.3m	22.2 m/s
3	18m	25.9m	1.7m	18.8 m/s

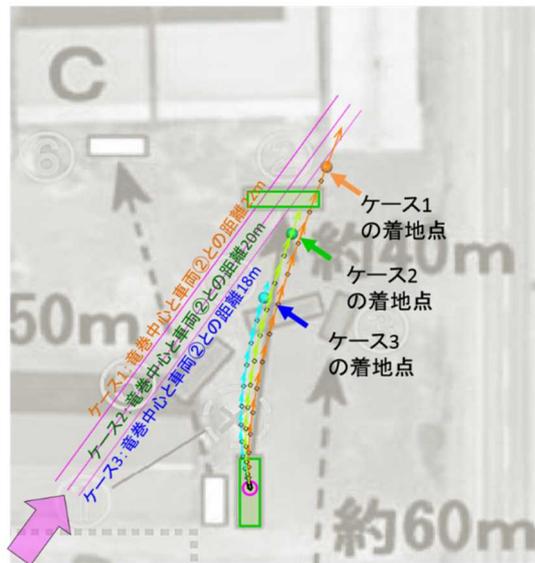


図 31 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

b. 乗用車の飛散解析

白い乗用車(図 30 の)の被災事例を対象として、物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算する。

白い乗用車の計算条件について、表 10 に示す。

表 10 佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	表 8 と同様		
飛来物条件	白い乗用車 〔トヨタカローラ〕 を仮定	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097 m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数 1 個 ・ 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない ・ 設置高さ 0m 		

白い乗用車と竜巻中心との距離を、18m、20m、22m とした場合の解析結果を表 11 及び図 32 に示す。飛散距離についてはケース 1 でおおむね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向はおおむね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車(白)が建物に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車(図 30 の)について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となる。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散したプレハブ建物(軽量鉄骨造 2 階建て、図 30 の A)の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表 11 佐呂間竜巻での白い乗用車の飛散計算結果

解析 ケース	白い乗用車と竜巻中 心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	51.9 m	3.6m	28.9 m/s
2	20m	43.5 m	3.4m	24.7 m/s
3	18m	34.7 m	2.9m	21.1 m/s

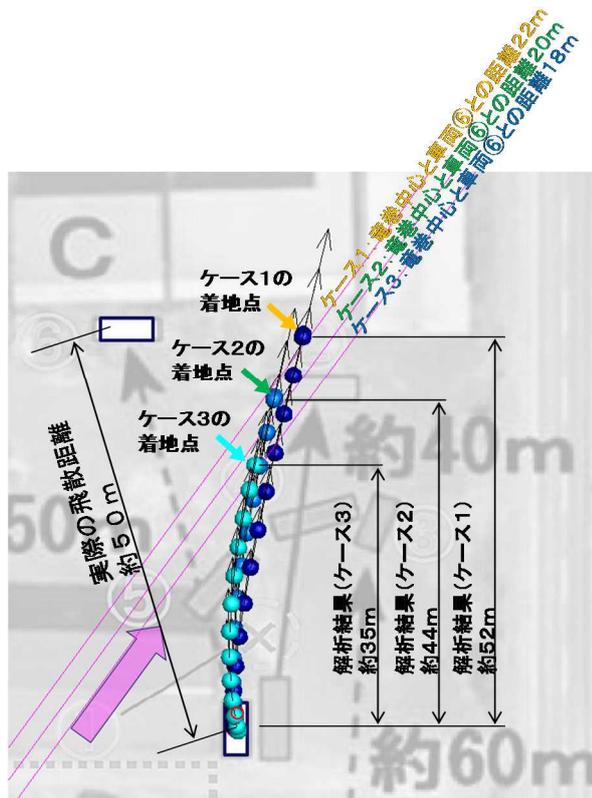


図 32 フジタモデルによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(2) 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証⁽²⁷⁾

ここでは、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における 4tトラック及び白い乗用車の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

a. 4tトラックの飛散解析

計算条件について表 12 に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を 92 m/s とし、その他の特性量については、ガイドに例示されている方法に従い、移動速度 V_t を 14 m/s（最大風速の 15%）、竜巻コア半径 R_m を 30 m とする。

表 12 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	表 8 と同様	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置 ・ 設置高さ 0m 	

表 13 に実際の被災状況と、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図 33 に被災後の 4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は 36 m/s，最大飛散高さは 3.6 m，最大飛散距離は 63.4 m となる。

実際の 4tトラック飛散距離は約 40m であり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較はできないものの、4tトラックの乗員 2 名が存命であったこと、被災後の 4tトラックがほぼ元の外形をとどめていること等から、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施しており、ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

表 13 実際の被災状況と「柏崎刈羽原子力発電所の飛来物評価法」
との結果の比較（4tトラックの場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*2	最大水平速度
フジタモデル （地上）	63.4m	3.6m	36.0m/s （毎時 130 km）
ランキン渦モデル （地上*1）	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル （40m）	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約 40 m	4tトラックの運転席に 乗車していた乗員2名が 幸いにも存命で救出さ れ、搬送先の病院で聞き 取り調査に応じており (25)、被災した4tトラ ックが地面からは3.6m 以上の高所から落下した とは考えにくい。	被災後もほぼ元の外 形をとどめていること が示されており(25)、 実際の飛来物速度は 本解析で得られた最 大飛来物速度（約130 km/h）を遙かに下回る ものと推察できる。

注記*1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とする。

*2：初期物体高さからの飛散高さ。



図 33 竜巻による被災後の4tトラックの様子(25)(26)

b. 乗用車（白）の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価条件で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表14に示す。

白い乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表 14 実際の被災状況と「柏崎刈羽原子力発電所の飛来物評価法」
との結果の比較（白い乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ ^{*2}	最大水平速度
フジタモデル （地上）	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル （地上 ^{*1} ）	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル （40m）	305.8m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約 50m	-	-

注記*1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とする。

*2：初期物体高さからの飛散高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく、横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため、本節では、これらの飛来物の挙動について、下記の2点に分けて考察する。

- ・ 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- ・ 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

7.1 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載のとおり、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく、横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

7.2 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントより大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と外部事象防護対象施設の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が外部事象防護対象施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、外部事象防護対象施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重に、地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国 NRC による要望で実際の竜巻観測記録をもとに考案された風速場モデルであり、米国 DOE の重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。

フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(1) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況とおおむね合致していることから、確認することができる。

また、フジタモデルにより算出される風速 (V_w) は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出に当たっては保守性を確保した上で、「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」のとおり、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(2) 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含め、より正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等）を正確に捉えることにより、飛来物の発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、当社の竜巻影響評価については、フジタモデルを適用することとする。

9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 2013:原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について,原規技発第 13061911 号,平成 25 年 6 月 19 日制定,平成 26 年 9 月一部改正
- (2) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Revision 1
- (3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学(2011):平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究,独立行政法人原子力安全基盤機構
- (5) Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp
- (6) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552-1561
- (7) Maruyama, T. (2011) Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 249-256
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002
(<https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1000/1020-astd-2002/@images/file>)
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999
(<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico(Docket No.70-3103)
- (14) 江口譲,杉本聡一郎,服部康男,平口博丸,竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発,電力中央研究所 研究報告 N14002,2014
- (15) 日本鋼構造協会,構造物の耐風工学, p82
- (16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado propelled objects, Report NP-748, 1978
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良,開水路中に水没設置された立方体および棧粗度の流体力,土木学会論文集 B1(水工学) Vol.67, No.4, I_1141-I_1146, 2011

- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014
- (19) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第 44 巻, pp1053 ~ 1058, 2000
- (20) 江口譲, 西原崇, 水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告 U96050, 1997
- (21) M.R. Ahmed, S.D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, Experimental Thermal and Fluid Science, 29, pp.633 - 647, 2005
- (22) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002
- (23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 80, pp. 263-286, 1999
- (24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978
- (25) 札幌管区气象台: 平成 18 年 11 月 7 日から 9 日に北海道 (佐呂間町他) で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006 年第 1 号, 2006
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.html> にて閲覧可能。)
- (26) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告. 建築研究所災害調査, 49, 2006
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (27) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, 2015

8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の
K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について

8. フジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析の K6/7 原子炉設置変更許可への影響確認について

8.1 はじめに

当社において考慮すべきフジタモデルを適用した場合における竜巻感度解析を検討するとともに、同解析結果より、フジタモデルの不確実性等を考慮した場合でも、K6/7 の竜巻影響評価全体としての保守性が確保され、K6/7 原子炉設置変更許可申請書の添付書類八で特定した評価対象施設の設計の前提条件（図 8 - 1）に影響を与えないことを以下の通り確認した。

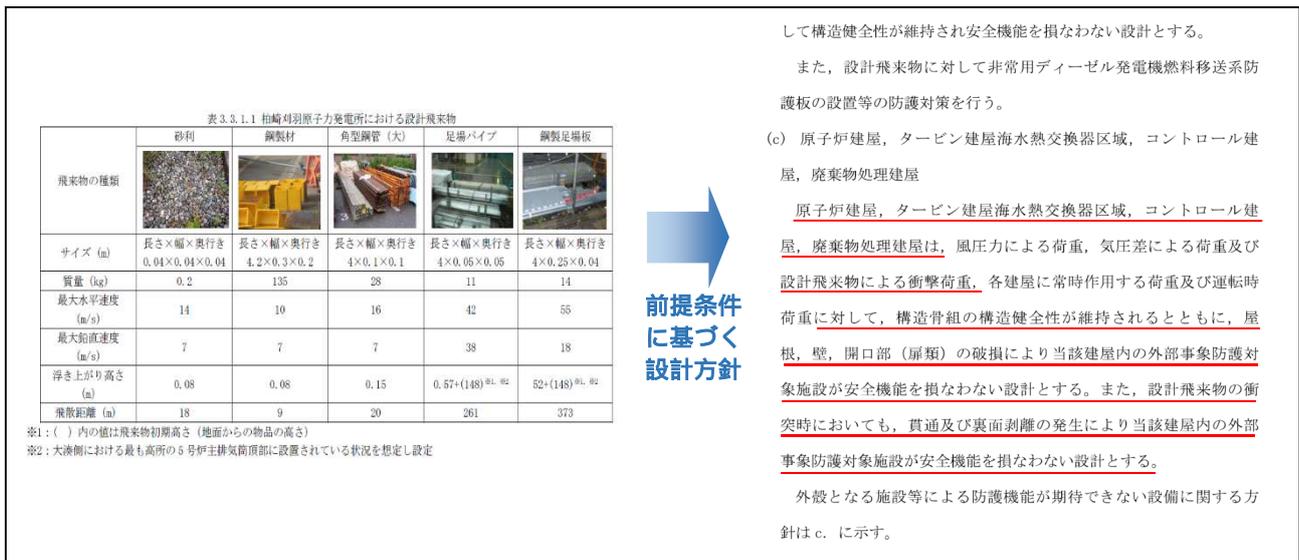


図 8 - 1 評価対象施設の設計の前提条件と設計方針（抜粋）

8.2 影響確認の方針

K6/7 では、過去に F3 竜巻が観測されていない日本海側ではあるが、設計竜巻の最大風速として、保守的に F3 の風速範囲上限値である 92m/s と設定している。

今回の感度解析においては、『原子力発電所における竜巻影響評価ガイド』を参照し、竜巻検討地域にて過去に発生した竜巻の最大風速 (V_{B1}) 及び竜巻検討地域を対象に算出したハザード曲線の年超過確率 10^{-5} における風速 (V_{B2}) のうち、大きい風速として設定した風速 69m/s をベースに不確実性評価を実施する。具体的には、インプットパラメータの不確実性を考慮しても、図 8-1 に示す風速 92m/s における飛散評価結果に包絡されることを確認する。

フジタモデルは、実測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している。不確かさの影響を確認するにあたり、このモデルの評価に関しては、IAEA の Safety Reports Series No.52^{(1)*1} が参考になると考えており、同レポートには、図 8-2 の通り、安全裕度の概念が示されている。この図に本感度解析を当てはめた場合には、図 8-3 のような関係性になると考えられることから、風速 69m/s をベースに不確実性評価をした結果が設計竜巻（風速 92m/s）における飛散評価結果を上回らないことを確認する方針とする。

注記 *1：IAEA の Safety Reports Series No.52 は、ベストエスティメートの安全解析に必要な

な要素として、不確実性の評価のための実用的なガイダンスを提供することを目的として作成された安全レポート。

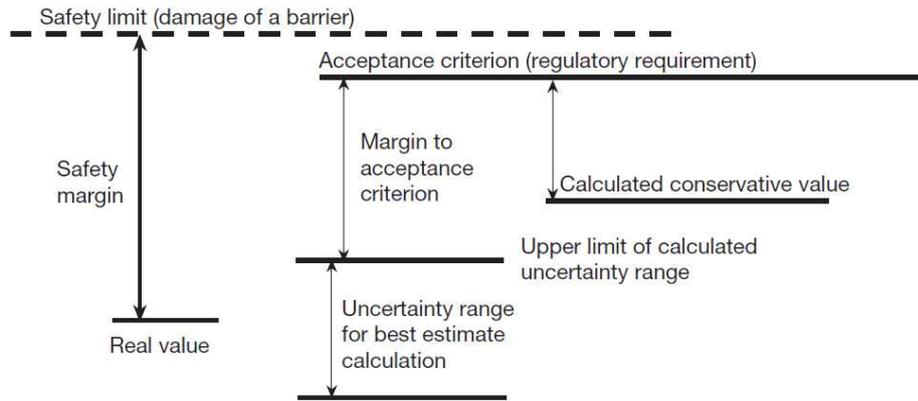


図 8-2 IAEA Safety Reports Series No.52 に示されている安全裕度の概念

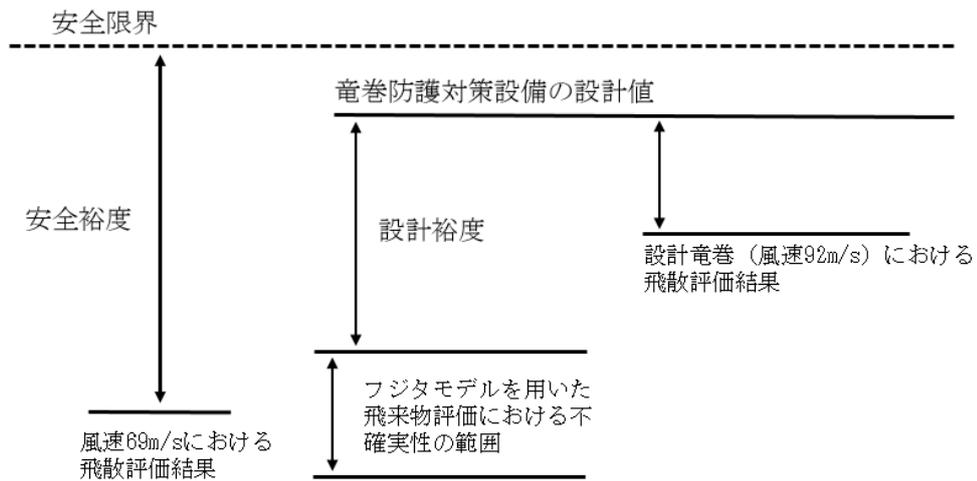


図 8-3 IAEA Safety Reports Series No.52 に示されている安全裕度の概念図に本感度解析を当てはめたイメージ図

8.3 竜巻感度解析の対象パラメータ

飛来物の飛散評価の条件は、(1)竜巻条件、(2)飛来物の浮上・飛来モデル条件、(3)飛来物条件に大別されるため、図8-4に示すフローで感度解析の対象パラメータを抽出する。

(1)の竜巻条件における風速等以外のフジタモデル固有のパラメータ(図8-4)は、Fujita Work Book⁽¹⁾等に基づき設定している。そのうち流入層高さ H_i は、他の文献で示されている値との間で差異が見られることから、それらの差異を踏まえ感度解析を実施する。

(2)の飛来物の浮上・飛来モデル条件における地上からの浮上・飛来モデル固有のパラメータ(図8-4)のうち、地面効果による揚力の消滅高さについては、物体高さの3倍とすれば様々な形状の飛来物に対しても十分保守的な設定であることを確認(資料3-5-別添2-20~22)していることから、感度解析は実施しない。物体配置の手法については、物体を多点数配置とすることは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられる(資料3-5-別添2-26)としていることから、感度解析は実施しない。

(3)の飛来物条件における寸法等以外のその他飛散評価に必要なパラメータ(図8-4)のうち飛来物の初期高さは、飛来物の種類に応じ設置状況が異なることから、それらの設置状況を踏まえ感度解析を実施する。

なお、振り幅については、流入層高さ H_i は文献値、飛来物の初期高さは現場設置状況を踏まえ現実的な範囲で設定する。

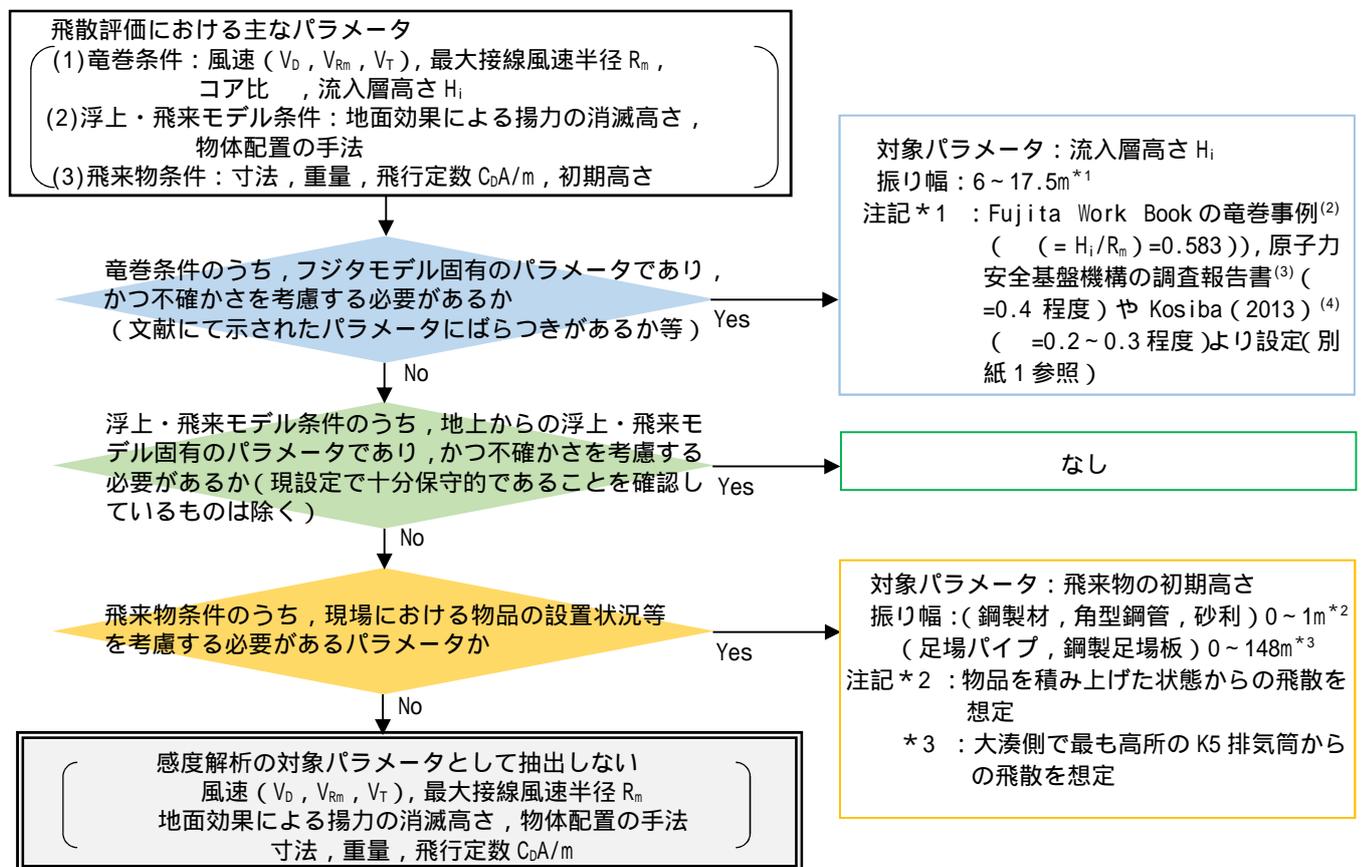


図8-4 竜巻感度解析の対象パラメータ抽出フロー

表 8 - 1 本感度解析で使用した条件

●…感度解析を行うパラメータの設定値

パラメータ	92m/s における 飛散評価の条件	69m/s における 飛散評価の条件	感度解析		
			ケース 1	ケース 2	ケース 3
竜巻風速 V_D (m/s)	92	69	69	69	69
竜巻半径 R_m (m)	30				
流入層高さ H_i (m)	15	15	6 ~ 17.5	15	6 ~ 17.5
初期高さ*1 (m)	: 0 : 148	: 0 : 148	: 0 : 148	: 0 ~ 1 : 0 ~ 148	: 0 ~ 1 : 0 ~ 148
定数 k_0	1/6				
定数 k	0.03				
定数 A	0.75				
定数 B	0.0217				

注記*1 : は鋼製材，角型鋼管（大），砂利の初期高さを示し， は足場パイプ，鋼製足場板の初期高さを示す。

ケース 1 は，流入層高さ H_i を振り幅（6 ~ 17.5m）で感度解析を実施し，ケース 2 は，初期高さを振り幅（鋼製材，角型鋼管（大），砂利の場合は 0 ~ 1m，足場パイプ，鋼製足場板の場合は 0 ~ 148m）で感度解析を実施し，ケース 3 は，流入層高さ H_i ，初期高さを組み合わせ，振り幅（ H_i : 6 ~ 17.5m，初期高さ：鋼製材，角型鋼管（大），砂利の場合は 0 ~ 1m，足場パイプ，鋼製足場板の場合は 0 ~ 148m）で感度解析を実施する。

8.4 竜巻感度解析の結果（詳細は別紙(2)参照）

上記 8.3 より設定した対象パラメータ（流入層高さ H_i ，初期高さ）及び振り幅で飛散評価を実施した。表 8 - 2，3 に風速 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 1，2）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較を示す。

表 8 - 2，3 より，流入層高さ H_i ，初期高さのいずれも，飛散評価結果に与える感度は小さく，飛来物の最大速度（水平・鉛直），最大飛散高さ，最大飛距離は，風速 69m/s を起点とした感度解析値が設置変更許可申請書の添付書類八記載値と同等程度または同等以下であることを確認した。

なお，鋼製材，角型鋼管（大），砂利の最大鉛直速度は，初期高さを付与することで落下成分

が増加するため、69m/s を起点とした感度解析値（8m/s）が設置変更許可申請書の添付書類八記載値（7m/s）を僅かに上回る。しかしながら、最大鉛直速度 8m/s は、その影響（鋼製材の場合、運動エネルギー4kJ、鋼板貫通厚さ 3mm、コンクリート貫通厚さ 5cm）は設計飛来物のうち最大の運動エネルギー（鉛直）となる足場パイプの運動エネルギー（8kJ）や貫通力（鋼板貫通厚さ 15mm、コンクリート貫通厚さ 10cm）に包絡されることを確認できたため、評価対象施設の設計の前提条件に影響を与えない。

表 8 - 2 流入層高さ H_i を変化させた場合の 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 1）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較 …最大値

（最大水平速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大水平速度(m/s)	H_i (m) *1 【水平速度が最大となる】	初期高さ(m) 【固定】	最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
鋼製材	0	6~17.5	0	0	10
角型鋼管（大）	4	6	0	8	16
砂利	4	6	0	6	14
足場パイプ	33	17.5	148	33	42
鋼製足場板	41	6	148	44	55

（最大鉛直速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大鉛直速度(m/s)	H_i (m) *1 【鉛直速度が最大となる】	初期高さ(m) 【固定】	最大鉛直速度(m/s)	最大鉛直速度(m/s)
鋼製材	0	6~17.5	0	0	7
角型鋼管（大）	7	6	0	7	7
砂利	7	6	0	7	7
足場パイプ	38	6	148	38	38
鋼製足場板	18	6	148	18	18

（最大飛距離）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大飛距離(m)	H_i (m) *1 【飛距離が最大となる】	初期高さ(m) 【固定】	最大飛距離(m)	最大飛距離(m)
鋼製材	0	6~17.5	0	0	9
角型鋼管（大）	3	6	0	7	20
砂利	3	6	0	5	18
足場パイプ	184	17.5	148	194	261
鋼製足場板	271	17.5	148	282	373

（最大飛散高さ）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース1） （流入層高さ H_i を変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大飛散高さ(m) *2	H_i (m) *1 【飛散高さが最大となる】	初期高さ(m) 【固定】	最大飛散高さ(m) *2	最大飛散高さ(m) *2
鋼製材	0	6~17.5	0	0	0.08 ^{*3}
角型鋼管（大）	0.01	6	0	0.06	0.15 ^{*3}
砂利	0.01	6	0	0.04	0.08 ^{*3}
足場パイプ	0+(148)	6~17.5	148	0+(148)	0.57+(148) ^{*4}
鋼製足場板	30+(148)	17.5	148	45+(148)	52+(148) ^{*4}

注記 *1 : 6~17.5mの振り幅で確認（2.5m刻み（6mは除く））

*2 : () 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

*3 : 評価対象施設への高さ10m迄の衝突を考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

*4 : 評価対象施設へのどの高さへの衝突も考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

表 8 - 3 初期高さを变化させた場合の 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 2）と
設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較

■…最大値

（最大水平速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大水平速度(m/s)	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【水平速度が 最大となる】	最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
鋼製材	0	15	1	5	10
角型鋼管（大）	4	15	1	8	16
砂利	4	15	1	11	14
足場パイプ	33	15	130.2, 130.5	33	42
鋼製足場板	41	15	7.2	52	55

（最大鉛直速度）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大鉛直速度(m/s)	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【鉛直速度が 最大となる】	最大鉛直速度(m/s)	最大鉛直速度(m/s)
鋼製材	0	15	1	8	7
角型鋼管（大）	7	15	1	8	7
砂利	7	15	1	8	7
足場パイプ	38	15	148	38	38
鋼製足場板	18	15	147.8 ~ 148	18	18

（最大飛距離）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大飛距離(m)	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【飛距離が 最大となる】	最大飛距離(m)	最大飛距離(m)
鋼製材	0	15	1	3	9
角型鋼管（大）	3	15	1	5	20
砂利	3	15	1	7	18
足場パイプ	184	15	148	184	261
鋼製足場板	271	15	148	271	373

（最大飛散高さ）

設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース2） （初期高さを变化）			設置変更許可申請書 の添付書類八 記載値
	最大飛散高さ(m) ^{*2}	H _i (m) 【固定】	初期高さ(m) ^{*1} 【飛散高さが 最大となる】	最大飛散高さ(m) ^{*2}	最大飛散高さ(m) ^{*2}
鋼製材	0	15	1	0+(1)	0.08 ^{*3}
角型鋼管（大）	0.01	15	1	0+(1)	0.15 ^{*3}
砂利	0.01	15	1	0+(1)	0.08 ^{*3}
足場パイプ	0+(148)	15	148	0+(148)	0.57+(148) ^{*4}
鋼製足場板	30+(148)	15	148	30+(148)	52+(148) ^{*4}

注記 *1：鋼製材，角形鋼管（大），砂利：0～1m，足場パイプ，鋼製足場板：0～148mの振り幅で確認（0.1m刻み）
 *2：（ ）内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）
 *3：評価対象施設への高さ10m迄の衝突を考慮し設計しているため，69m/sを起点とした感度解析値を包絡する
 *4：評価対象施設へのどの高さへの衝突も考慮し設計しているため，69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

次に、流入層高さ H_i 、初期高さを組み合わせて変化させた場合の風速 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 3）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較を表 8 - 4 に示す。

表 8 - 4 より、流入層高さ H_i 、初期高さを組み合わせて変化させた場合においても、飛散評価結果に与える感度は小さく、飛来物の最大水平速度、最大鉛直速度、最大飛距離、最大飛散高さは、風速 69m/s を起点とした感度解析値が設置変更許可申請書の添付書類八記載値と同等程度または同等以下であることを確認した。

表 8 - 4 流入層高さ H_i 、初期高さを組み合わせて変化させた場合の 69m/s を起点とした感度解析値（ケース 3）と設置変更許可申請書の添付書類八記載値の比較

■・・・最大値

（最大水平速度）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大水平速度(m/s)	H_i (m) *1 【水平速度が最大となる】	初期高さ(m) *2 【水平速度が最大となる】	最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
鋼製材	0	6	1	6	10
角型鋼管（大）	4	6	1	10	16
砂利	4	6	1	13	14
足場パイプ	33	17.5	33.7, 33.8, 34	33	42
鋼製足場板	41	17.5	10.3	52	55

（最大鉛直速度）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大鉛直速度(m/s)	H_i (m) *1 【鉛直速度が最大となる】	初期高さ(m) *2 【鉛直速度が最大となる】	最大鉛直速度(m/s)	最大鉛直速度(m/s)
鋼製材	0	6~15	1	8	7
角型鋼管（大）	7	6	1	8	7
砂利	7	6,7,5	1	8	7
足場パイプ	38	6	148	38	38
鋼製足場板	18	6	147.4~148	18	18

（最大飛距離）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大飛距離(m)	H_i (m) *1 【飛距離が最大となる】	初期高さ(m) *2 【飛距離が最大となる】	最大飛距離(m)	最大飛距離(m)
鋼製材	0	6	1	4	9
角型鋼管（大）	3	6	1	7	20
砂利	3	6	1	9	18
足場パイプ	184	17.5	148	194	261
鋼製足場板	271	17.5	148	282	373

（最大飛散高さ）					
設計飛来物	69m/s 飛散評価結果値	69m/sを起点とした感度解析値（ケース3） （流入層高さ H_i 及び初期高さを変化）			設置変更許可申請書の添付書類八記載値
	最大飛散高さ(m) *3	H_i (m) *1 【飛散高さが最大となる】	初期高さ(m) *2 【飛散高さが最大となる】	最大飛散高さ(m) *3	最大飛散高さ(m) *3
鋼製材	0	6~17.5	1	0+(1)	0.08 *4
角型鋼管（大）	0.01	6~17.5	1	0+(1)	0.15 *4
砂利	0.01	6~17.5	1	0+(1)	0.08 *4
足場パイプ	0+(148)	6~17.5	148	0+(148)	0.57+(148) *5
鋼製足場板	30+(148)	17.5	148	45+(148)	52+(148) *5

注記 *1 : 6~17.5mの振り幅で確認（2.5m刻み（6mは除く））
 *2 : 鋼製材、角形鋼管（大）、砂利：0~1m、足場パイプ、鋼製足場板：0~148mの振り幅で確認（0.1m刻み）
 *3 : () 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）
 *4 : 評価対象施設への高さ10m迄の衝突を考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する
 *5 : 評価対象施設へのどの高さへの衝突も考慮し設計しているため、69m/sを起点とした感度解析値を包絡する

8.5 まとめ

上記 8.4 より、フジタモデルの不確実性等を考慮した場合でも、風速 69m/s を起点とした感度解析値が設置変更許可申請書の添付書類八記載値と同等以下であることから、図 8-1 の評価対象施設の設計の前提条件に影響を与えないことを確認した。

8.6 参考文献

- (1) IAEA (2008): Safety Reports Series No.52, Best Estimate Safety Analysis For Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation.
- (2) Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.
- (3) 東京工芸大学 (2011): 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構.
- (4) Kosiba, K. A. and Wurman, J. (2013) The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552 1561.

8.7 別紙

1. 流入層高さの感度解析範囲の考え方
2. 竜巻感度解析結果
3. 地表面付近の風速の不確かさに関する考察
4. 感度解析に用いた風速分布について

以上

流入層高さの感度解析範囲の考え方

1. はじめに

流入層高さは飛散評価に影響を与えることから、適切な流入層高さで評価する必要がある。この影響を確認するにあたり、流入層高さの感度解析範囲を 6～17.5m と設定した。

以下に流入層高さの感度解析範囲の考え方について示す。

2. 流入層高さの感度解析範囲の考え方

2.1 Fujita Workbook⁽¹⁾による竜巻事例に対する分析による流入層高さの推測

Fujita Workbook⁽¹⁾では竜巻事例を可視化して分析しており、 R_m が約 120m と大きな竜巻に対して、 H_i は約 70m と観測していることから、 H_i/R_m は 0.583 (70/120 = 0.583) であると記載されている。文献⁽²⁾では流入層高さは R_m に比例するとされているが、 R_m が 30m と比較的小さな竜巻に $H_i/R_m = 0.583$ を適用した場合には、 H_i は 17.5m となる。

2.2 解析による流入層高さの推測

原子力安全基盤機構の調査報告書⁽³⁾による解析においては、 R_m が 30m における H_i/R_m は 0.4 程度であり、 H_i は 12m 程度となっている。

2.3 Kosiba⁽⁴⁾らによる竜巻観測・研究成果

Kosiba⁽⁴⁾らの観測結果においては、外部コア半径 (R_m) が約 50m の竜巻に対して、竜巻中心方向への流入風は地面から 10～14m 以下で発生したと観測していることから、外部コア半径と流入層高さの比 (H_i/R_m) は 0.2～0.3 程度と推測される。この場合、 R_m が 30m の場合には流入層高さ (H_i) は 6～9m 程度と算定される。

2.4 工学的モデルによる流入層高さの設定

Fujita Workbook⁽¹⁾における工学的モデルとして、 H_i を R_m の関数として以下のとおり設定しており、 $R_m=30m$ であれば、 H_i/R_m は約 0.5 であることから、 $H_i=15m$ と算出される。

$$H_i = R_m \quad (1)$$

：流入層高さ と 外部コア半径 の比

$$= 0.55(1 - \frac{R_m}{100}) \quad (2)$$

：内部コア半径 と 外部コア半径 の比

$$= 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_m) \quad (3)$$

3. 流入層高さの感度解析範囲の設定について

上記の研究等を踏まえると、 R_m が 30m の竜巻に対する流入層高さは 6～17.5m とされていることから、6～17.5m を流入層高さの感度解析範囲とする。

4. 参考文献

- (1) Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.
- (2) Howard B. Bluestein, Severe Convective Storms and Tornadoes Observations and Dynamics--, Springer, 2013
- (3) 東京工芸大学 (2011) :平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構.
- (4) Kosiba, K. A. and Wurman, J. (2013) The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552 1561.

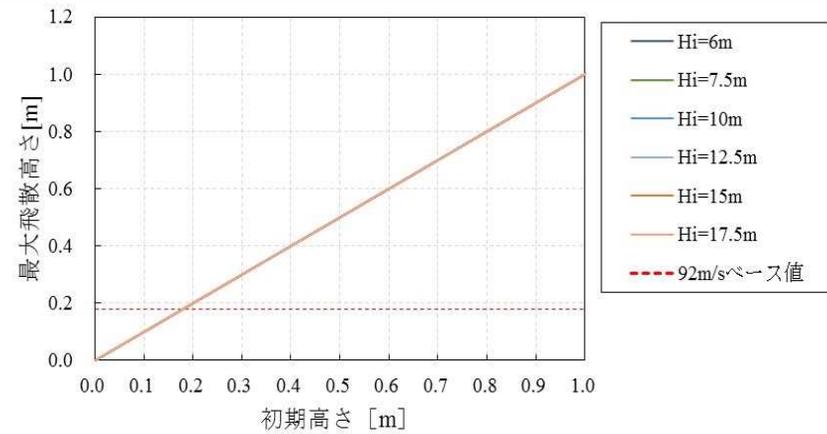
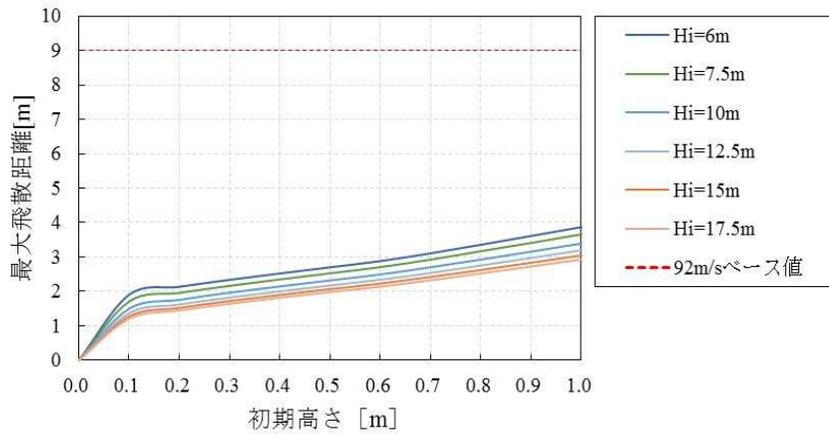
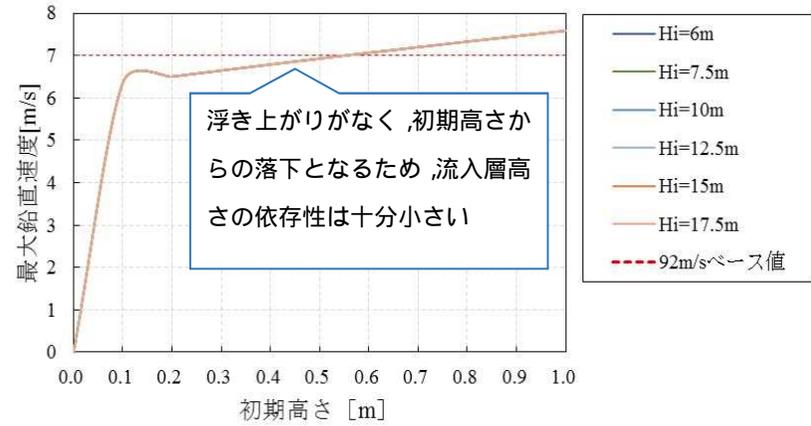
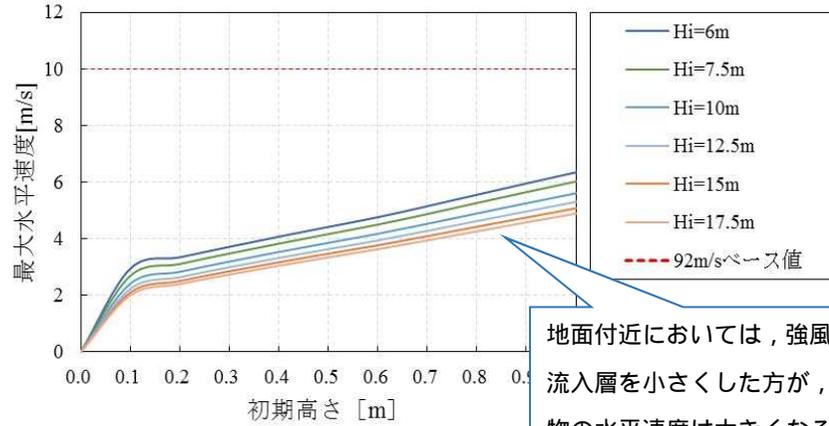
竜巻感度解析結果

1. 条件

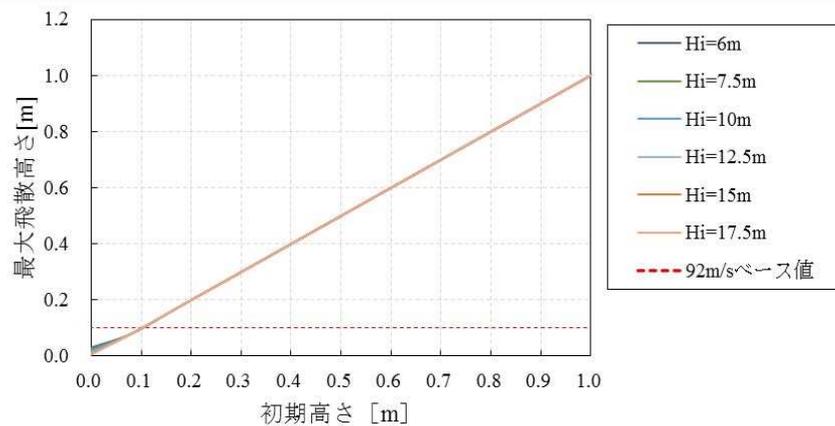
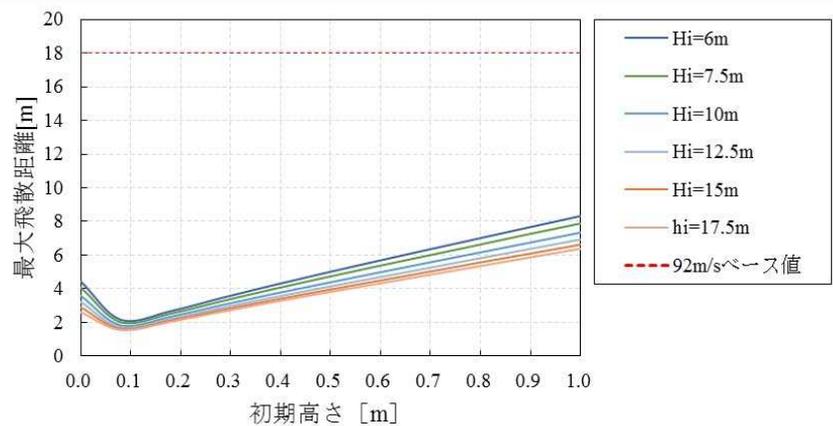
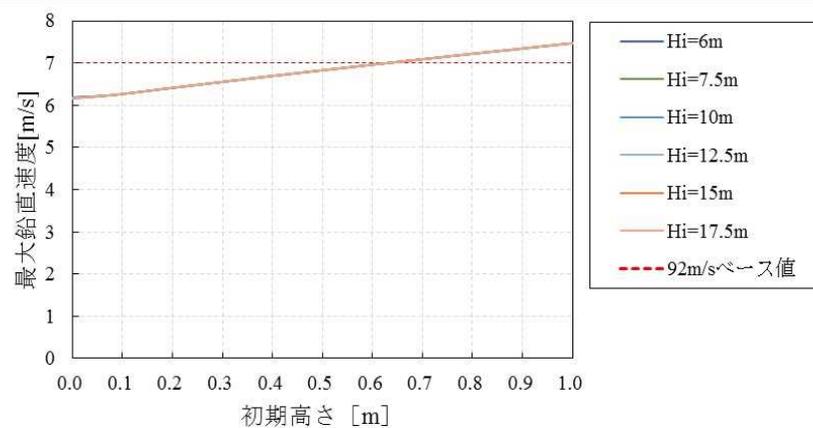
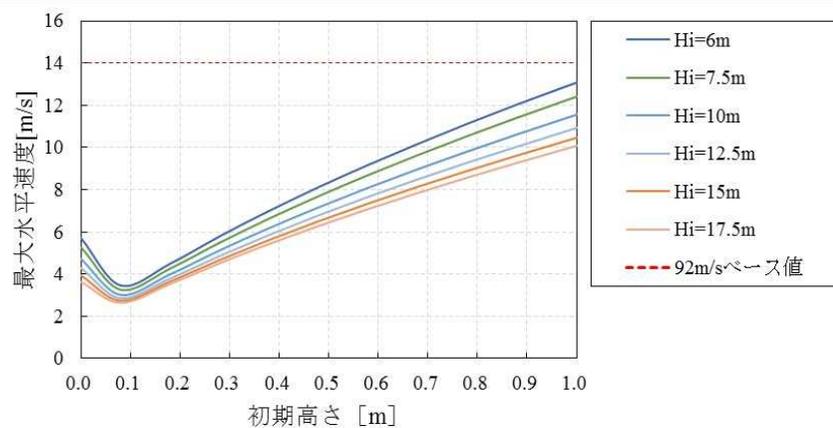
感度解析の風速	設計飛来物	飛来物評価手法	流入層高さ (H _i)	飛来物初期高さ
69m/s	鋼製材 (4.2m×0.3m×0.2m, 135kg) 角型鋼管 (4m×0.1m×0.1m, 28kg) 砂利 (0.04m×0.04m×0.04m, 0.2kg) 足場パイプ (4m×0.05m×0.05m, 11kg) 鋼製足場板 (4m×0.25m×0.04m, 14kg)	フジタモデルの風速場 を用いた飛来物評価手 法	6~17.5m (2.5m刻み(6mは除 く))	鋼製材, 角型鋼管, 砂利: 0~1m 足場パイプ, 鋼製足場板: 0~148m (0.1m刻み)

2. 感度解析結果

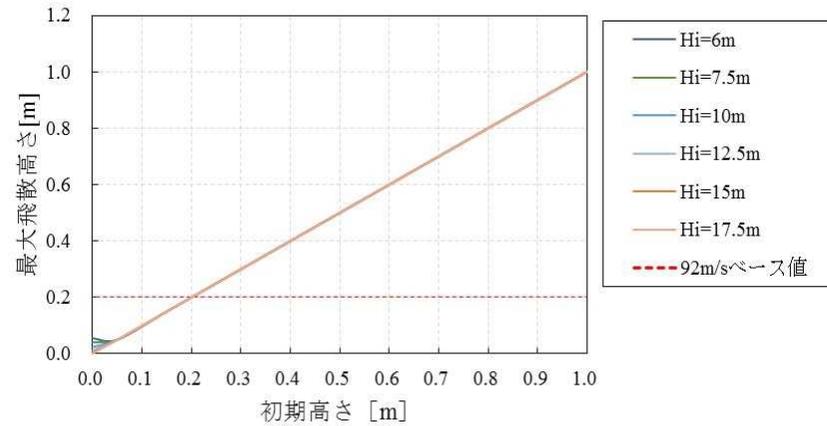
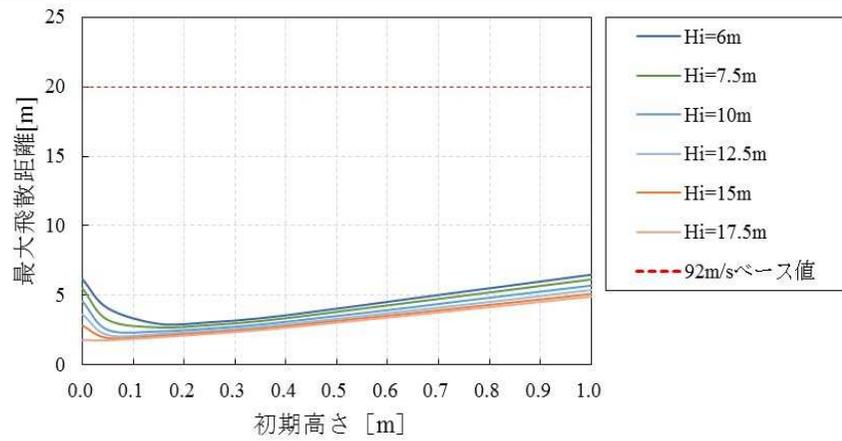
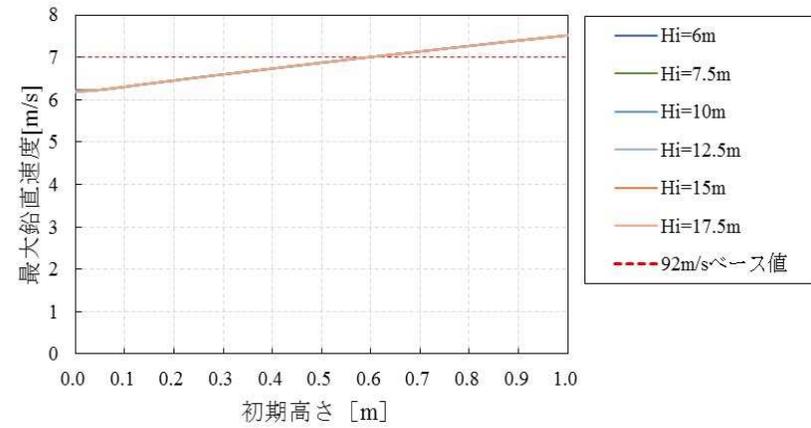
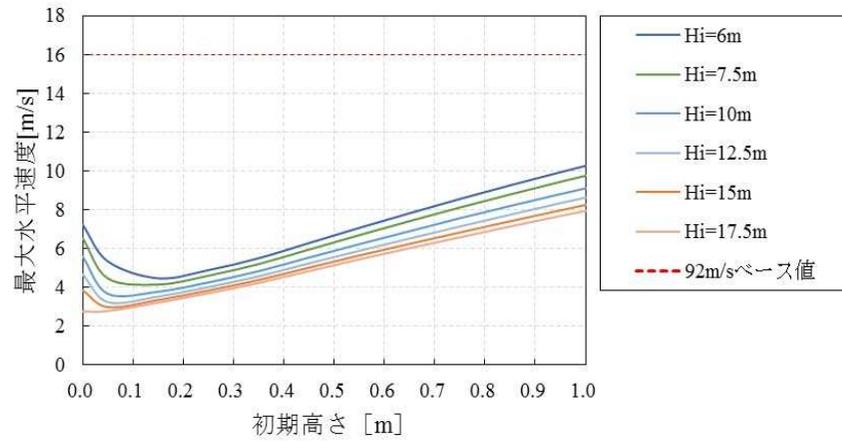
鋼製材



砂利

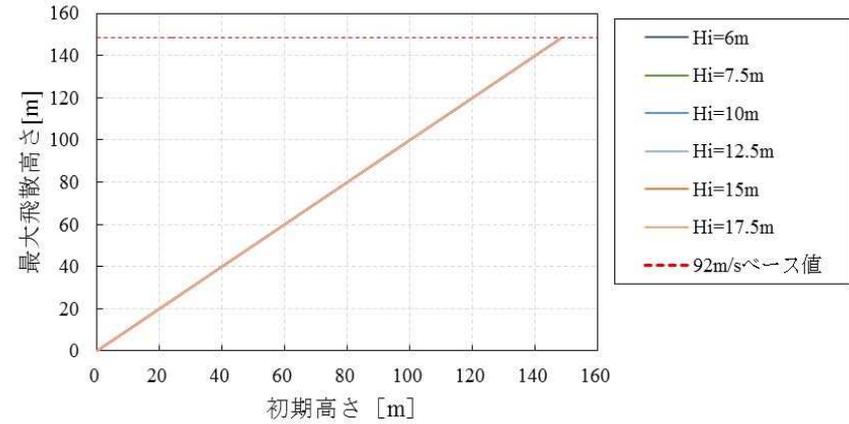
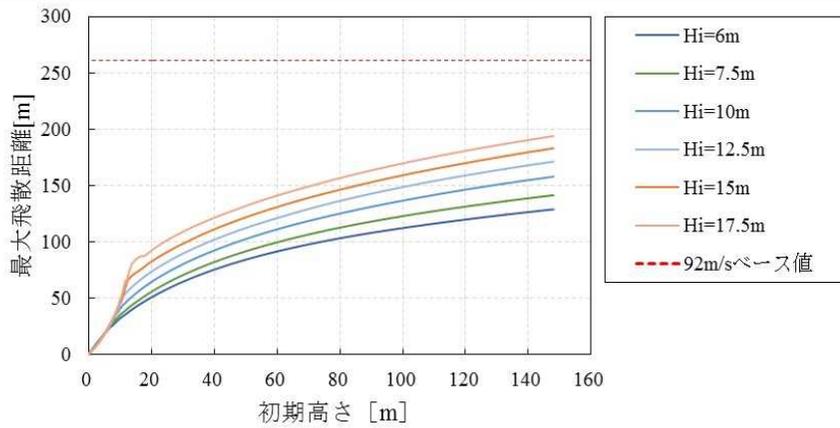
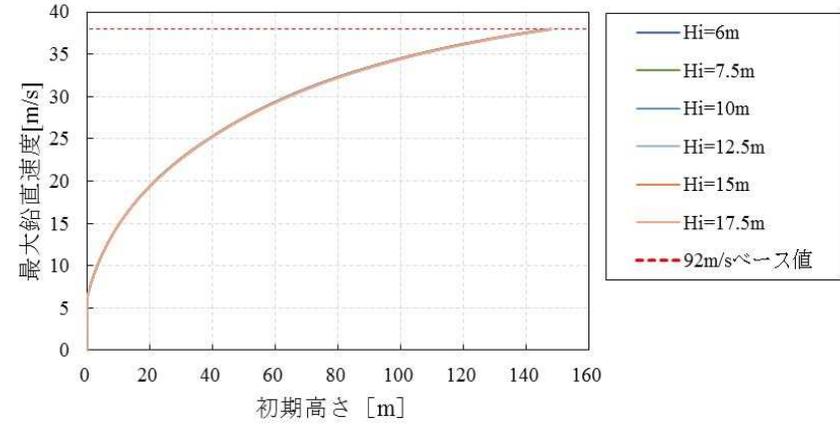
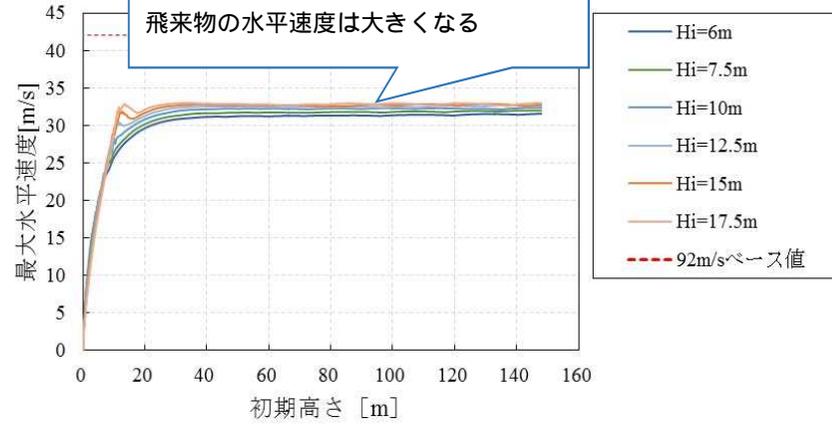


角型鋼管 (大)

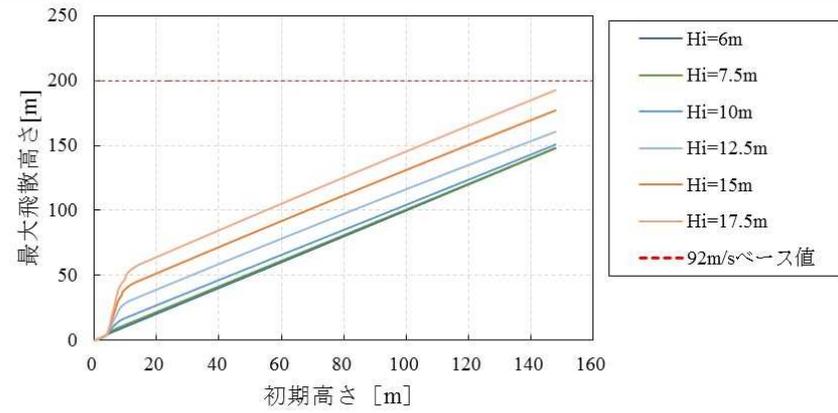
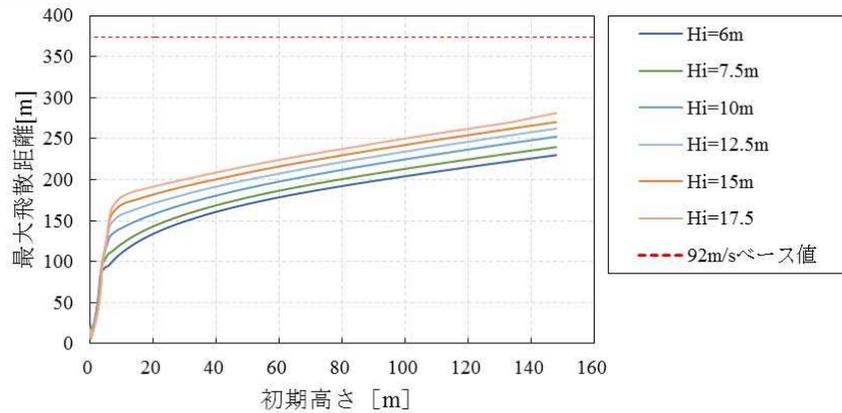
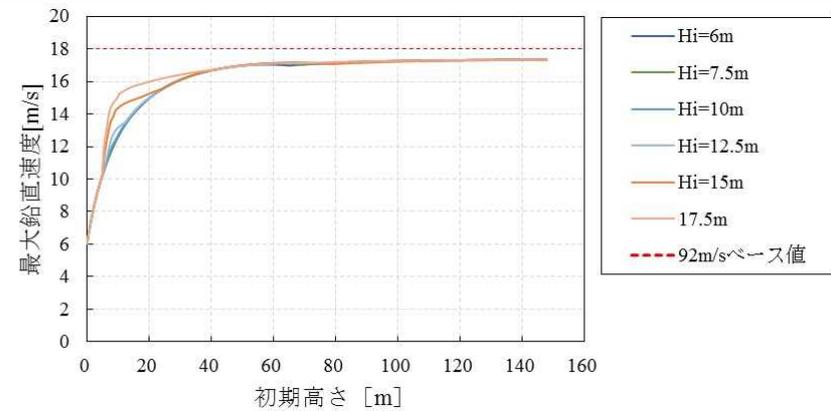
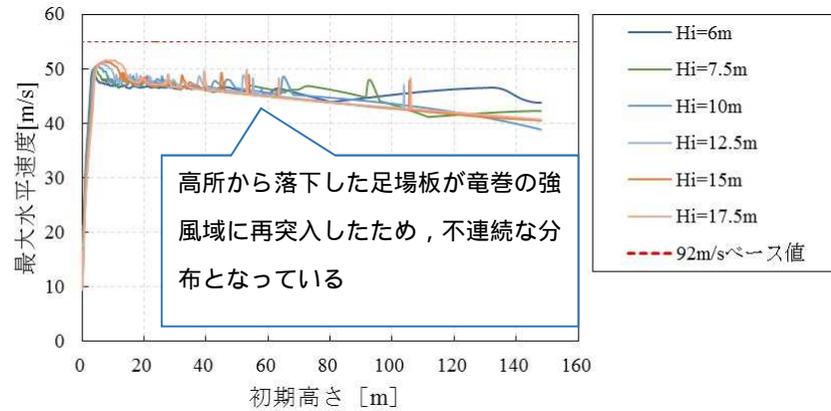


足場パイプ

強風域の流入層高さを超えるような初期高さでは、流入層を大きくした方が、飛来物の水平速度は大きくなる



鋼製足場板



地表面付近の風速の不確かさに関する考察

1. ‘ The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer ’ について
 竜巻の地表面付近の風速分布に関する研究として、Kosiba ら⁽¹⁾は、図 1 の通り地上高さ約 5m における強度は地上高さ約 40m に比べて約 25% 大きな値が観測されたことを報告している。（文献(1)の 402 行目「…reveal peak wind intensity very near the surface at ~5m AGL, about 15% higher than at 10m AGL and 25% higher than at ~40m AGL.」）

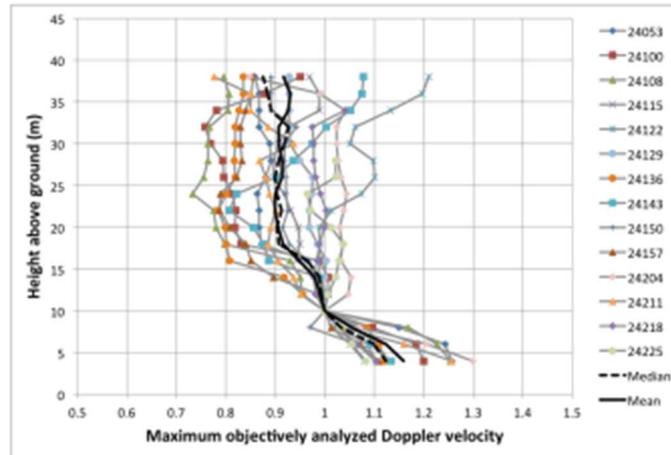


図 1 地上高さとドップラー速度分布

しかしながら、図 1 では地上から高さ 3m 迄は観測を行っておらず、レーダによるドップラー速度は飛来物体の反射から得られる瞬間計測値であるため、同研究報告では竜巻風速の 3 秒平均速度との比較には問題があるとしている。（文献(1)の 174 行目「However, comparing radar-measured Vd to hypothetical ‘ ‘ standard ’ ’ 3-s-averaged anemometer-measured Vg is problematic.」）

また、同研究報告の結論として、地表面付近の竜巻特性として一般化するには、構造や強度について異なる種々の竜巻について更なる観察が必要であるとしている。（文献(1)の 257 行目「More observations are needed over a range of vortex structures and intensities to characterize the TBL (Tornado boundary layer) more generally.」）

以上より、同研究報告とフジタモデルの風速分布（地表面付近に近づくに従い竜巻風速が減少し地表面（高さ 0m）では 0m/s となる）は、現時点では直接関連付けられるものではないと考えられる。

2. 上記の研究成果に対する考察

文献(1)では、ドップラーレーダを用いて竜巻の観測を行っている。ドップラーレーダでは、風に流される降水粒子等の物体から反射される電波のドップラー効果を用いて、レーダの照射方向の速度成分（ドップラー速度）を測定している。すなわち、レーダから見て 90° の角度で吹いている風のドップラー速度は 0m/s として観測される（図 2）。

なお、低位置でドップラー測定する場合、仰角の大きい高所ほど小さい速度として観測されることになる。

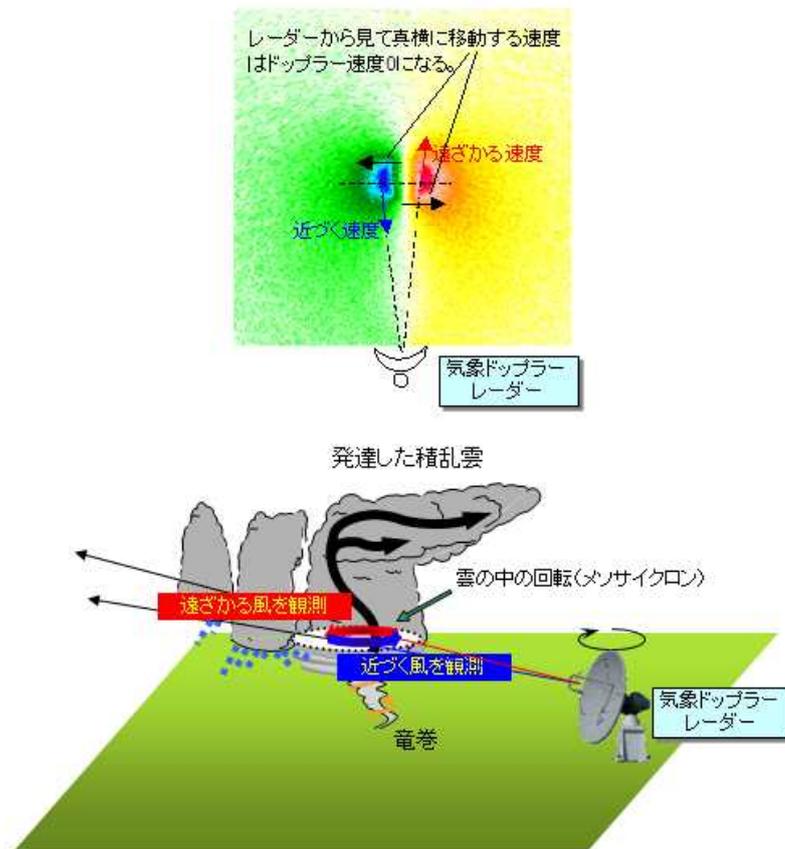


図2 ドップラーレーダによる観測

(気象庁 HP: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/tornado2-2.html>)

図1は、竜巻をドップラーレーダを用いて測定した速度（ドップラー速度）を示しており、ドップラーレーダの照射方向の速度成分のみが抽出されたものであるため、実際に発生していた風速とは異なるものを観測していたことになる。

KK6/7の設置許可申請書において定めた設計竜巻92m/sは対地水平速度であり、これを仮にドップラーレーダで測定した場合には、異なる（小さい）速度が観測されることになる。

実際の風速場とドップラーレーダでの観測の差を把握するために、仮想的な竜巻を想定し、この竜巻の風速をドップラーレーダで測定した際に、どのようなドップラー速度が測定されるかを確認する。

仮想的な竜巻の条件としては、文献(1)に記載のある2012年5月25日にKansas州で発生した竜巻に対し、文献記載値等を参考として表1のとおり設定した。なお、風速場モデルとしてはフジタモデルを用いた。

表 1 仮想的な竜巻条件

竜巻特性パラメータ	設定条件
最大旋回風速, V_m	50 m/s
最大旋回風速半径, R	50 m
流入層高さ	15 m
移動速度, V_{tr}	10 m/s

ドップラーレーダの位置としては、文献(1)に記載のあるドップラーレーダ(RSDOW)と竜巻経路の関係(図3)を参考に、計測器の高さは3mとするとともに図4に示す点を竜巻との相対位置として設定した。竜巻位置を原点とした場合のドップラーレーダの座標点は(120m, 50m, 3m)に設定した。

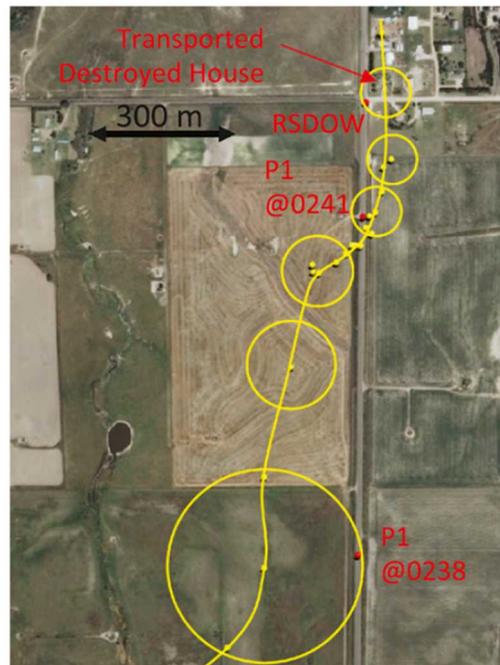


図3 文献(1)で観測された竜巻におけるドップラーレーダ(RSDOW)と竜巻経路の関係
(計測開始は@0241付近であり、最接近した距離は約130m)

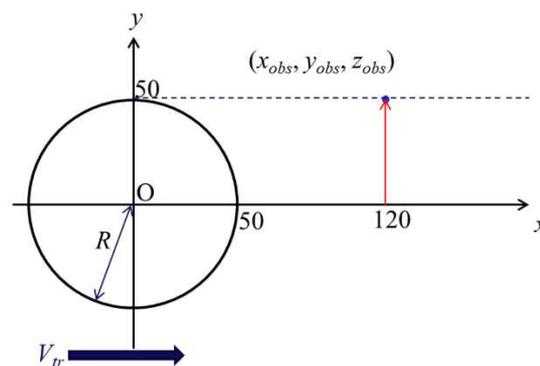


図4 仮想的な竜巻(原点)とドップラーレーダ位置との相対位置関係

点 $(x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$ に位置するドップラーレーダが捉える点 (x, y, z) のドップラー速度は式(1)で表される。(本解析では絶対値が大きいいためドップラーレーダに向かう方向を正と定義する。)

$$D = -(\mathbf{V}_w \cdot \mathbf{X})/|\mathbf{X}| \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{X} は図5の水色で示すような方向ベクトル $\mathbf{X}=(x-x_{obs}, y-y_{obs}, z-z_{obs})$ を、 \mathbf{V}_w は点 (x, y, z) での風速ベクトルを表す。図6に上記の条件におけるフジタモデルの風速場 (V_x, V_y, V_z) が与えられるときの各高さでのドップラー速度の最大値と最小値を示す。

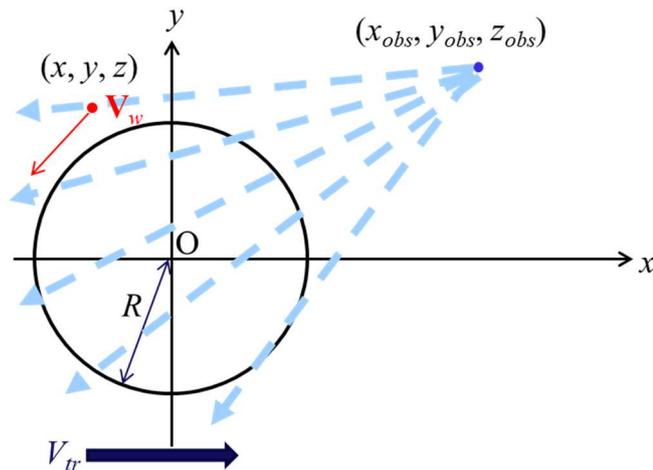


図5 x 軸方向に移動速度 V_{tr} で移動する竜巻とドップラーレーダの位置関係

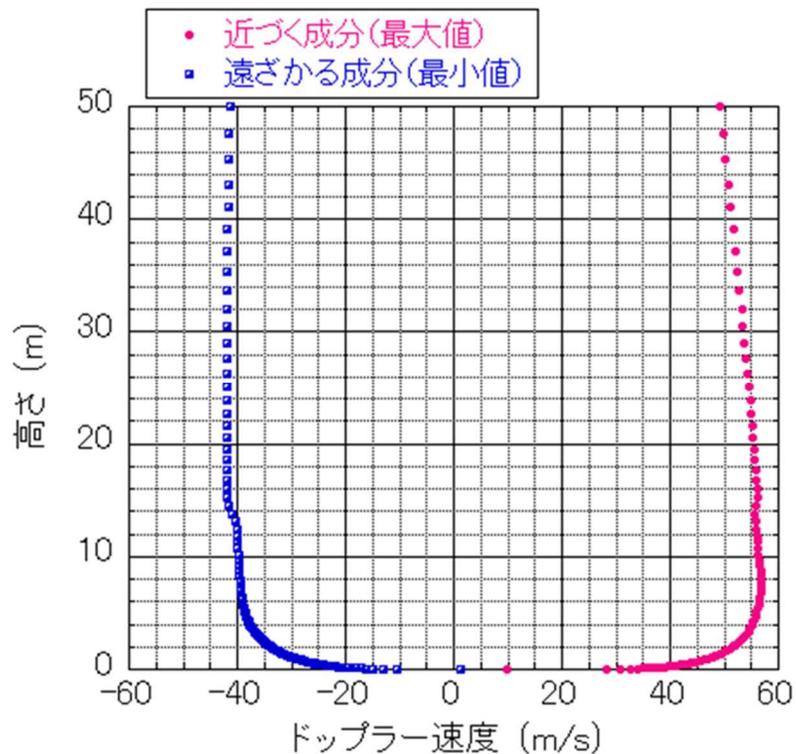


図6 仮想的な竜巻のドップラー速度の高さ方向分布

本解析での竜巻風速の極大値（最大値）は 15m の高さに設定したが、ドップラー速度は地面付近の速度が高所と比較し相対的に強調される傾向があるため、ドップラー速度の極大値が約 6m ~ 8m 付近に発生することが示された。このことは、文献(1)の Fig.4（本資料の図 1）で示されているドップラー速度の極大点が必ずしも実際の風速の極大点と一致しないことを示唆するものである。

3. 最新の研究成果

Kosiba らは、文献(1)の公表以降に文献(2)を公表しており、文献(2)では、「地上高さ 1m における風速は、地上高さ 20 ~ 30m におけるドップラーレーダで測定した風の速度の 60% ~ 70% である」と報告している。（文献(2)「…the 1-meter AGL wind speeds were ~60%-70% of the DOW-measured winds at 20-30 m AGL.」）

上記の研究成果を踏まえ、KK6/7 の設計竜巻（最大風速 92m/s）に当てはめるならば、設計竜巻（最大風速 92m/s）におけるドップラー速度は、地上高さ 25m（20 ~ 30m の中間値）で約 86m/s と算出され(図 7)、地上高さ 1m における風速は、地上高さ 20 ~ 30m におけるドップラーレーダで測定した風の速度の 60% ~ 70% であることから、水平・鉛直成分合算で約 51 ~ 60m/s となる。一方で、KK6/7 の設計竜巻における地上高さ 1m では、水平風速のみで約 76m/s となるため（図 8）、上記の値（約 51 ~ 60m/s）より大きい。したがって、文献(2)で示されている関係性よりも KK6/7 の設計竜巻の方が地上高さ 1m で大きな風速となっている。

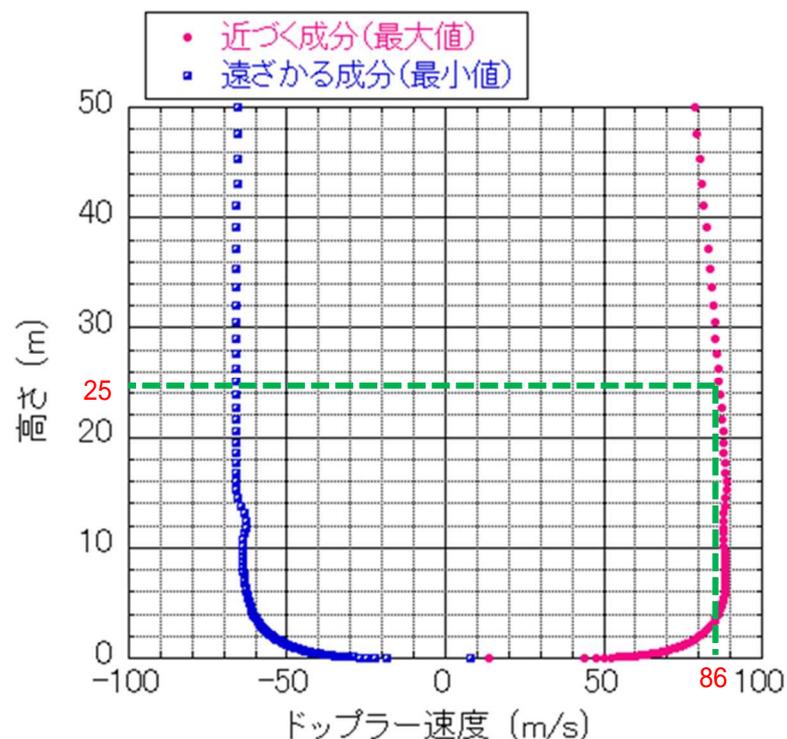


図 7 設計竜巻（最大風速 92m/s）のドップラー速度の高さ方向分布

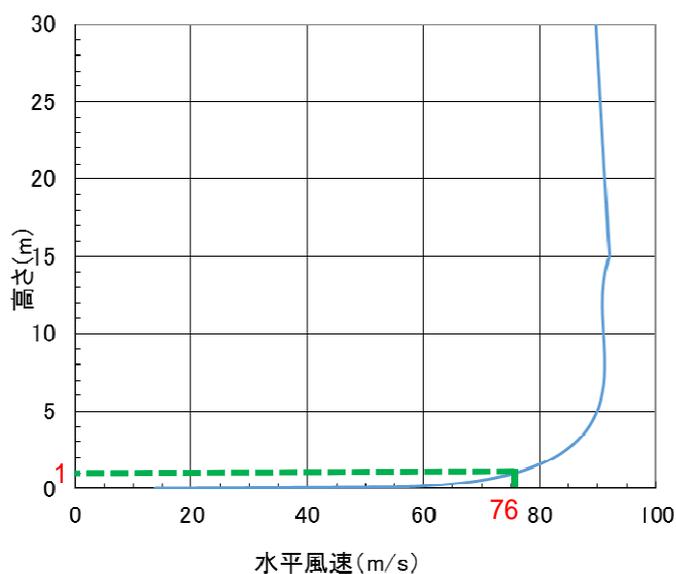


図8 設計竜巻（最大風速 92m/s）の水平風速の高さ方向分布

一般的に、風速は、地表面での摩擦により、地表面に近づくにつれ小さくなっていくことから、地上高さ 1m 未満の領域では、地上高さ 1m における風速より小さい値を示すと考えられる。

文献(2)で示されていない地上高さ 1m 未満の領域における保守性を確認する観点で、設計飛来物のうち、地表面に配置することを前提としている鋼製材、角型鋼管(大)、砂利へ加わる風速を確認する。飛散評価において、物体に与える風速は物体高さの中心値における風速を代表させており、上記に示す設計飛来物の中心高さとその高さにおける KK6/7 の設計竜巻の風速を図 9 に示す。

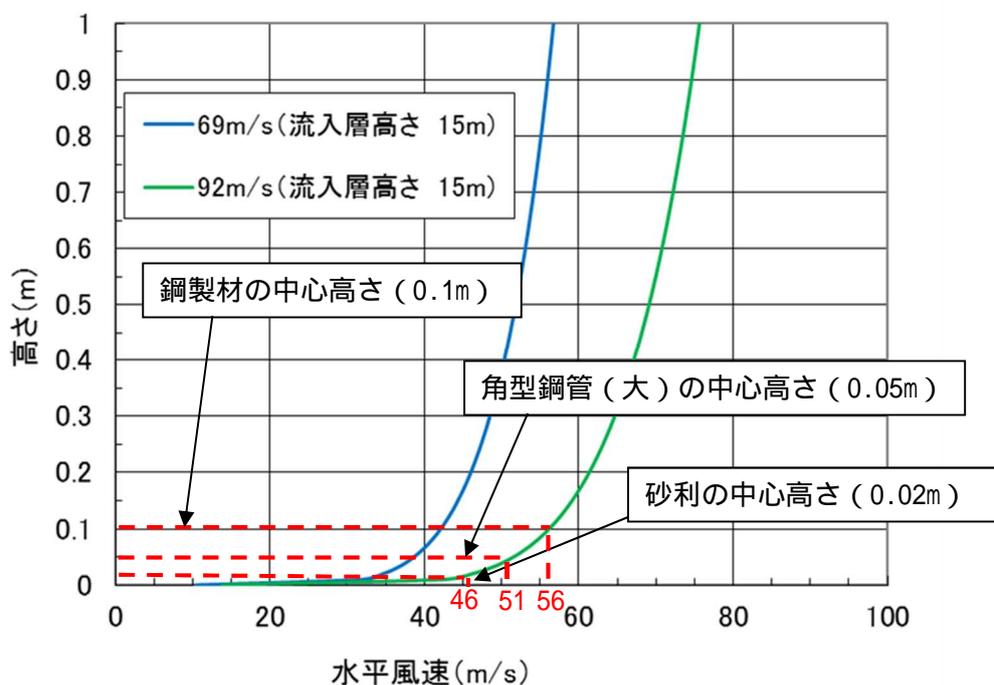


図9 水平風速の高さ方向の分布と設計飛来物（鋼製材，角型鋼管（大），砂利）の中心高さの関係

鋼製材，角型鋼管(大)に加わる風速は，それぞれ水平風速のみで 56m/s，51m/s となり，KK6/7 の設計竜巻に文献(2)で示されている関係性を当てはめた場合における地上高さ 1m の風速(水平・鉛直成分合算で約 51～60m/s)と同程度の風が吹く設定となる。このことから，鋼製材，角型鋼管(大)は，地表面に配置されているものの，地上高さ 1m と同程度の風速を与えて飛散評価を行っていることになり，風が地表面との摩擦により減衰することを踏まえると，保守的な風速を与えて飛散評価を行っていると言える。

一方で，砂利に加わる風速は 46m/s となり，上記の風速(水平・鉛直成分合算で約 51～60m/s)を下回っているが，感度解析にて最大風速 69m/s，初期高さ 1m の条件で飛散評価を行っており，このとき砂利には，水平風速のみで 56m/s の風速が加わることから(図 10)，風速(水平・鉛直成分合算で約 51～60m/s)と同程度の風を与えて飛散評価を行い，評価対象施設の設計の前提条件に影響を与えないことを確認している。

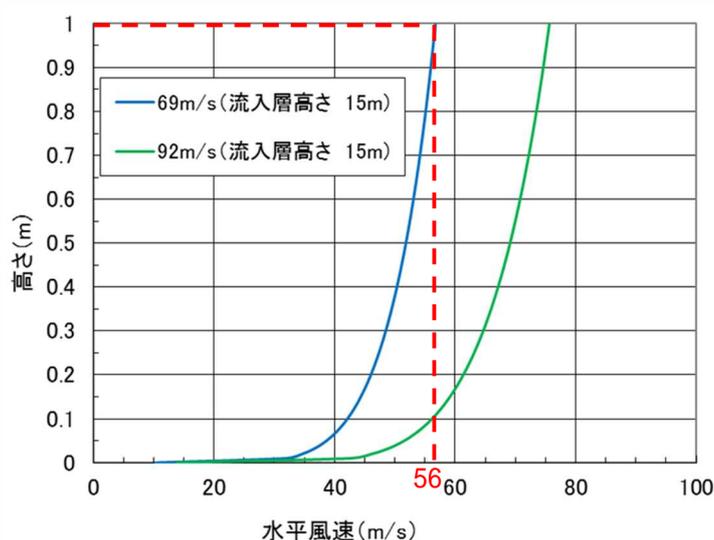


図 10 感度解析に用いた風速分布

4. 参考文献

- (1) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552-1561.
- (2) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2017: The TWIRL (Tornado Winds from In-situ and Radars at Low-level) Project: Part 1: Project Overview and Combined Radar-in situ-damage analyses, 9th European Conference on Severe Storms.

感度解析に用いた風速分布について

感度解析に用いた風速(最大風速 69m/s)と KK6/7 の設計竜巻(最大風速 92m/s)の風速分布を図 1, 2 に示す。図 1 の上図に最大水平風速を示し, 図 1 の下図に最大水平風速となる位置を示す。最大水平風速となる位置は, 竜巻の外部コア半径上, かつ, 竜巻の回転方向と移動方向が重なる位置となる。

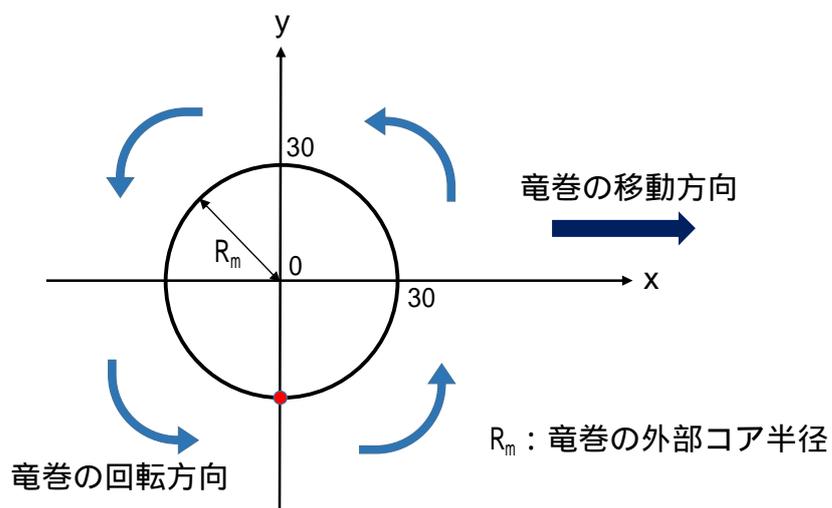
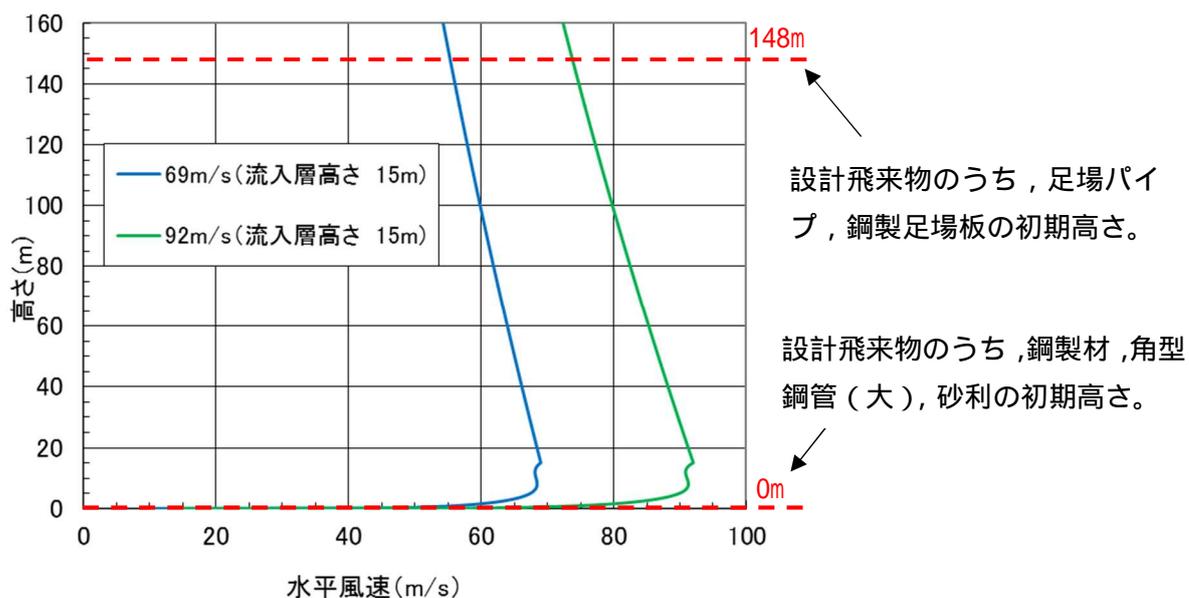


図 1 水平風速の高さ方向の分布と設計飛来物の初期高さの関係(上図)とその水平風速を示す位置(下図の赤点)

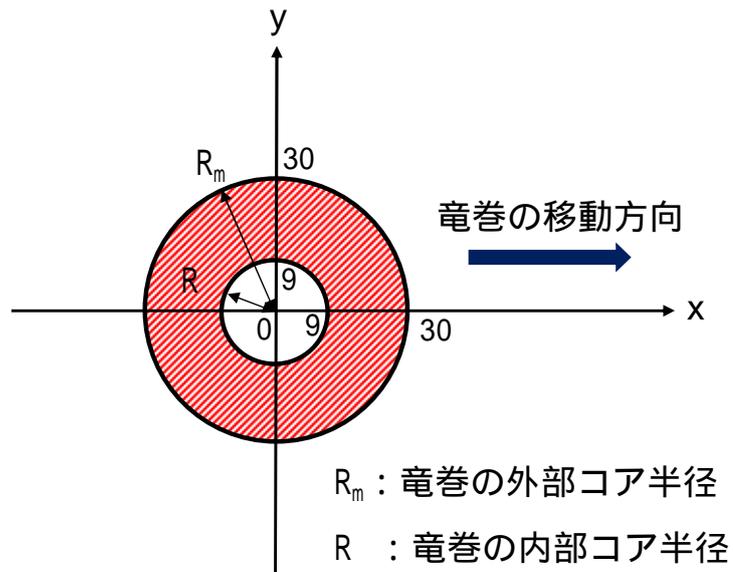
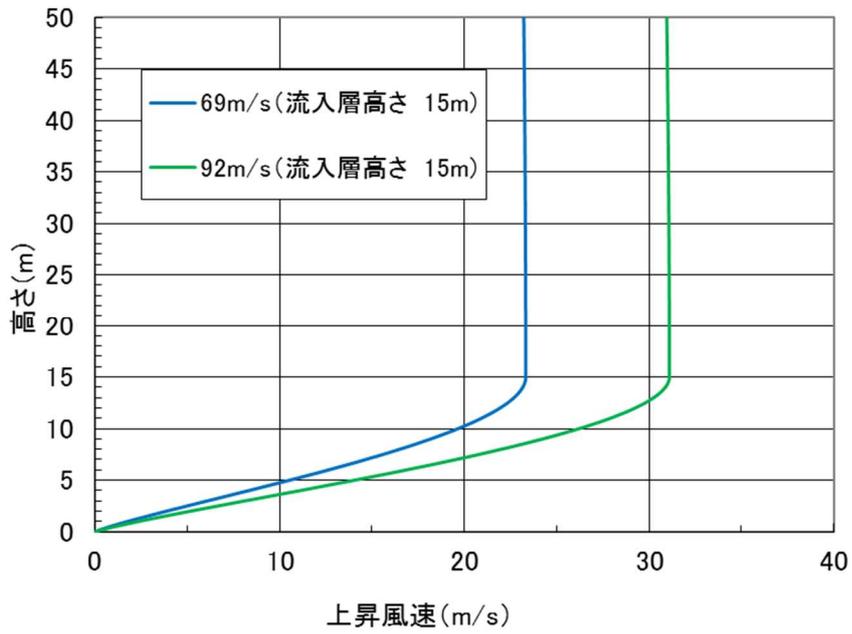


図2 上昇風速の高さ方向の分布 (上図) とその上昇風速を示す位置 (下図の斜線部)

ブローアウトパネル関連設備の設計方針に係る補足説明資料

目次

4-1	ブローアウトパネル関連設備の要求機能について	4-1-1
4-2	ブローアウトパネルの配置と構造について	4-2-1
4-3	クリップ引張試験について	4-3-1
4-4	ブローアウトパネルの開放機能を担保する設計条件について	4-4-1
4-5	原子炉建屋内側ブローアウトパネルの配置と構造について	4-5-1
4-6	クリップ破損時の他設備への影響について	4-6-1
4-7	燃料取替床ブローアウトパネルの飛出し挙動について	4-7-1
4-8	ブローアウトパネル開放時の他設備への影響について	4-8-1
4-9	燃料取替床ブローアウトパネル及び主蒸気系トンネル室ブローアウト パネルの保安全管理について	4-9-1
4-10	ブローアウトパネル機能確認試験要領について	4-10-1
4-11	ブローアウトパネル機能確認試験結果について	4-11-1
4-12	ブローアウトパネル開放時の設計基準事故時被ばく評価への影響について	
4-13	ブローアウトパネル閉止装置の配置と構造について	4-13-1
4-14	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の技術基準規則第五十四条への 適合性について	4-14-1
4-15	ブローアウトパネル閉止装置のパッキン耐久性試験について	4-15-1
4-16	ブローアウトパネル閉止装置の保安全管理について	4-16-1
4-17	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験要領について	4-17-1
4-18	ブローアウトパネル閉止装置の門ピンと門受の熱膨張による影響について	4-18-1
4-19	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験結果について	4-19-1
4-20	燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置（自主対策設備）の配置と 構造について	4-20-1
4-21	ブローアウトパネル関連設備の先行電力との差異について	4-21-1

ブローアウトパネルの配置と構造について

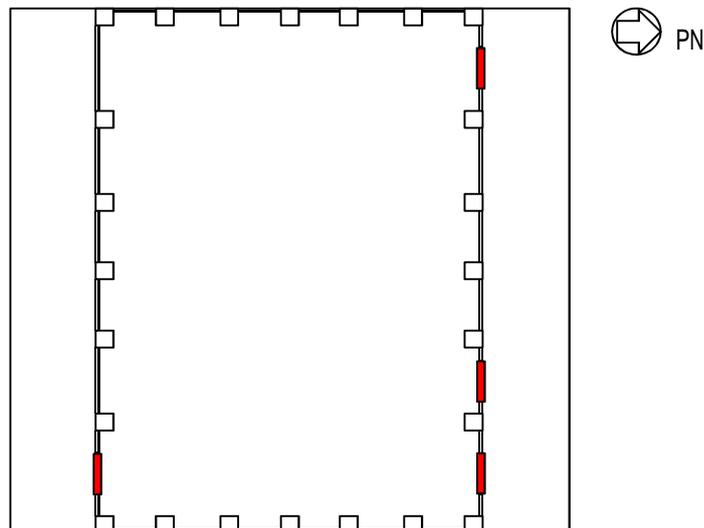
1. 燃料取替床ブローアウトパネルの配置について

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）は、原子炉建屋原子炉区域の外壁に合計 4 箇所設置する。

オペフロ BOP の配置について表 1-1 と図 1-1 に示す。

表 1-1 オペフロ BOP の配置について

設置階	配置	備考
原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床	南の壁面に 1 箇所，北の壁面に 3 箇所の合計 4 箇所	



原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床 概略平面図

■ : (オペフロ BOP 4 枚)

図 1-1 オペフロ BOP 配置図

2. オペフロ BOP の構造について

オペフロ BOP は、厚さ約 \square mm のクリップと呼ばれる装置 24 個で原子炉建屋原子炉区域外壁に設置されており、原子炉格納容器の設計上の最高使用外圧 14kPa に対し、3.43kPa 以下で開放するように設計されている。パネル寸法と現状のクリップ数を表 2-1 に 構造概要を図 2-1 に示す。

現在、クリップはパネル 1 枚あたり 24 個が設置されているが、新規基準対応として、確実に設計圧力で開放させる観点からクリップ形状、数を最適化し、クリップはオペフロ BOP 1 枚あたり 18 個（幅約 37.5mm を \square 個、幅約 75mm を \square 個）とする。

オペフロ BOP は、このクリップだけで建屋躯体側の枠材に固定され、パネル下部には、パネル移動時（開放時）の摩擦による抗力を低減するためのすべり台が設置されている。また、パネル

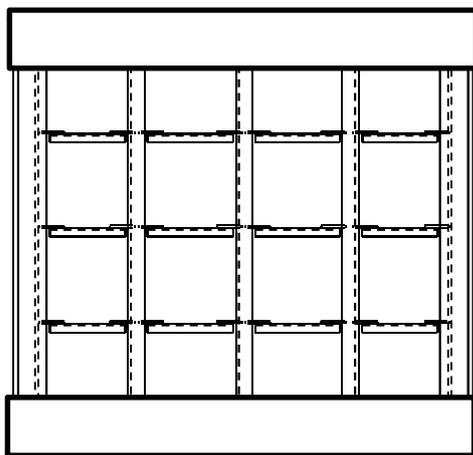
と躯体の間隙にはパッキンが設置され、原子炉建屋原子炉区域の2次格納施設としてのバウンダリ機能を確保する設計としている。

オペフロ BOP は、内圧によりパネル本体が外側に押され、このクリップが外れ、更に内圧により外側に押されて開放する構造であり、オペフロ BOP は、電源や空気源に頼ることなく、静的、かつ圧力上昇に対して確実に開放できる仕組みとして、クリップ構造が採用されており、この開放機構は、既設系統設備でも採用実績のある破壊板（ラブチャーディスク）と同様の考え方（差圧により部材を破壊）であり、構造が単純であることから、信頼性が高いものである。

表 2-1 オペフロ BOP の主要仕様

設置場所		寸法	材質	クリップ数
4 階 中間床	北 3, 南 1	4160 mm × 4260 mm	SS400	18 個 (24 個)

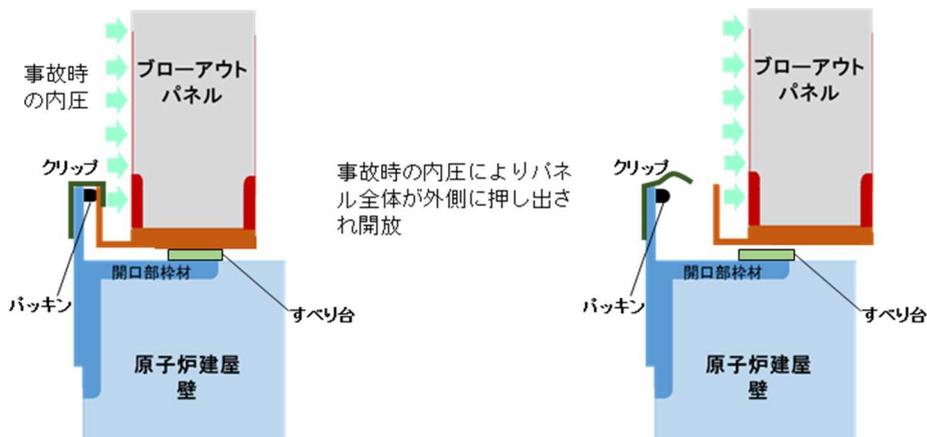
クリップ数の () 個数は、変更前の個数



: 幅約75.0mmのクリップ

: 幅約37.5mmのクリップ

○ : 新規制基準対応としてクリップ形状等を最適化した後のクリップ位置



断面図 (クリップ式構造の概念図)

図 2-1 オペフロ BOP の構造と作動原理

3. オペフロ BOP が開放するための条件の整理

建屋内圧力によるクリップの変形及びパネルの開放時の具体的な流れを図 3-1 に示す。パネルを規定差圧で開放させるためには、パネルの開放に対する抗力（下記 ~ ）を規定差圧による開放荷重より小さく設定する必要がある。また、オペフロ BOP への要求機能（2 次格納施設としてのバウンダリ機能）から、弾性設計用地震動 S d では開放しない設計とする必要がある。

以上より、オペフロ BOP に要求される機能を満たすための条件は以下のとおりであり、本条件を満足するように設計する。

$$\begin{array}{ccccc} \text{弾性設計用地震動 } S d & < & \text{パネルの開放に必要な荷重} & < & \text{建屋内圧力による荷重} \\ () & & (\text{パネル開放時の抗力}) & & () \\ & & (+ +) & & \end{array}$$

ここで、

- ・ クリップを変形させる荷重 × クリップ个数
 - ・ クリップを変形されるための荷重はクリップ試験の結果を踏まえて保守的に設定
 - ・ クリップ个数は弾性設計用地震動 S d , クリップ試験結果を踏まえて設定
 - ・ パネルとすべり台部の摩擦力
 - ・ パネルと躯体の摩擦力を低減させるため、パネル及び躯体にステンレス製のすべり台を 2 箇所設置
 - ・ すべり台間の摩擦係数
 - ・ シール材*の破断に必要な荷重（シール材メーカーカタログ値より保守的に設定）
- 注記 *：雨水等の侵入を防ぐため、上部及び側面にシール材（シリコンシーラント）が塗布されている。

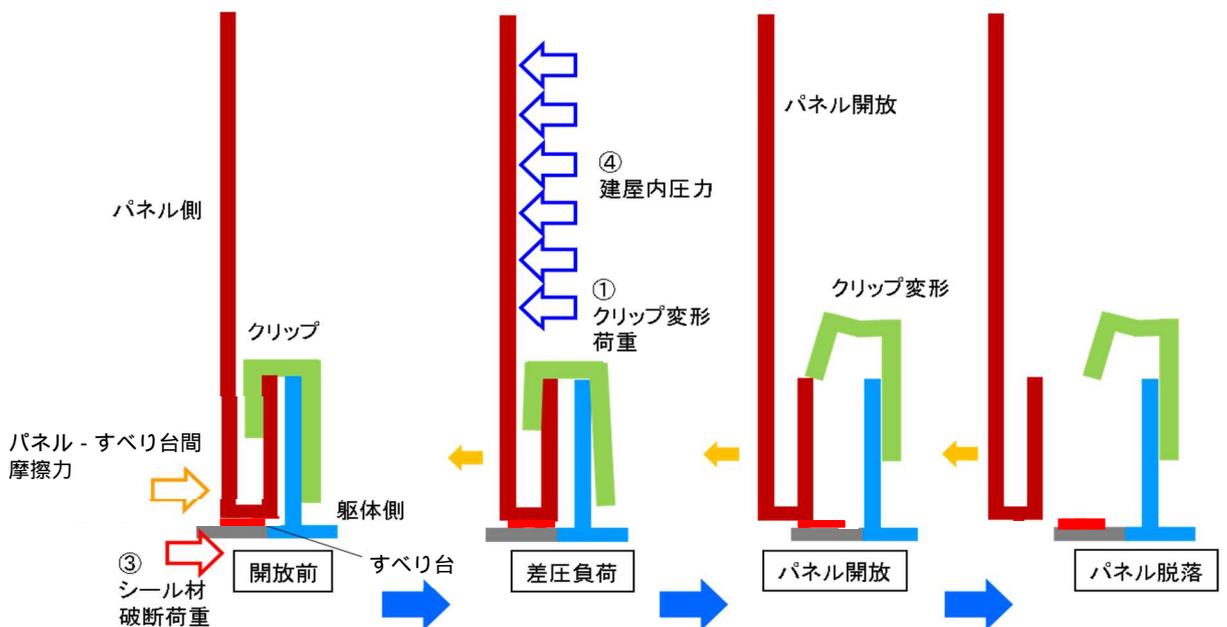


図 3-1 オペフロ BOP 開放のメカニズム

4. オペフロ BOP の開放の検知について

オペフロ BOP の開放を検知し，プラント停止や燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置による開口部の閉止等の対応措置を速やかに実施するため，個々のオペフロ BOP の開放を検知するリミットスイッチを設置し，中央制御室で状態を把握可能な設計とする。

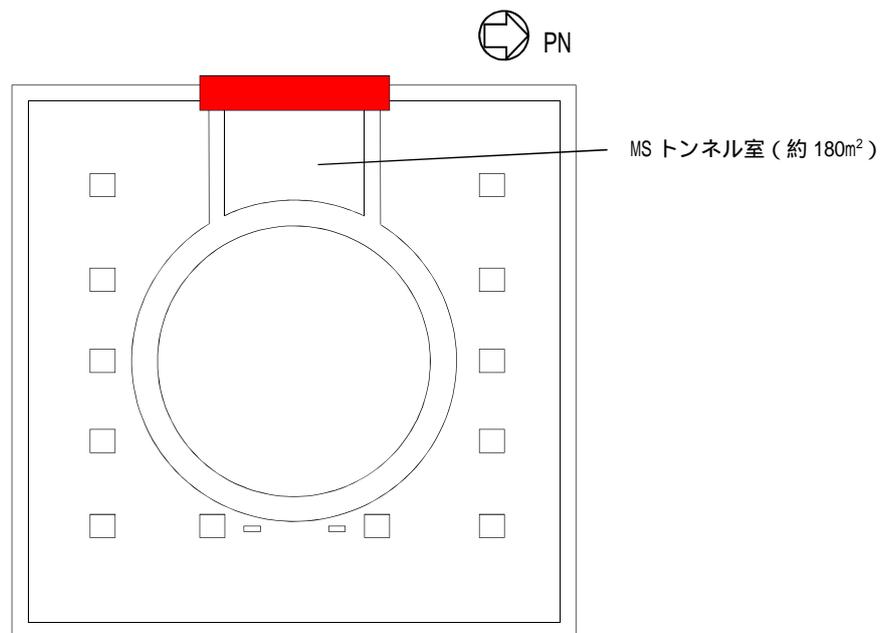
5. 主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの配置について

主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下 MS トンネル室 BOP という。）は，主蒸気系トンネル室（以下 MS トンネル室という。）のタービン建屋側との境界壁に合計 79 箇所設置する。

MS トンネル室 BOP の配置について表 5-1 と図 5-1 に示す。

表 5-1 MS トンネル室 BOP の配置について

設置階	配置	備考
原子炉建屋原子炉区域地上 1 階	壁面に 79 箇所	



原子炉建屋原子炉区域地上 1 階 概略平面図

— : MS トンネル室 BOP 79 枚

図 5-1 MS トンネル室 BOP 配置図

6. MS トンネル室 BOP の構造について

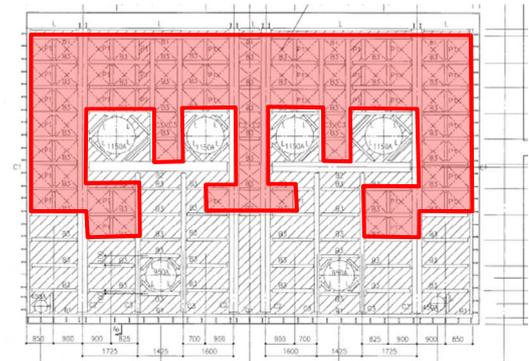
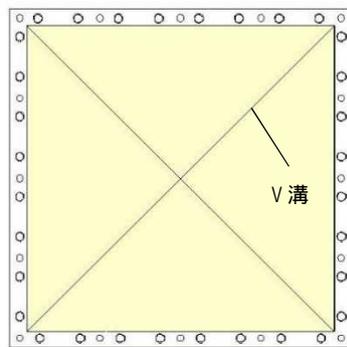
MS トンネル室 BOP は、ラプチャーパネルで MS トンネル室のタービン建屋側との境界壁に設置されており、原子炉格納容器の設計上の最高使用外圧 14kPa に対し、5.89kPa 以上、9.81kPa 以下で開放するように設計されている。パネル寸法とパネル数を表 6-1 に、構造概要を図 6-1 に示す。

MS トンネル室 BOP は、ラプチャーパネルと枠部で建屋躯体に固定されている。また、原子炉建屋原子炉区域の 2 次格納施設としてのバウンダリ機能を確保する設計としている。

MS トンネル室 BOP は、内圧によりパネル本体が外側に押され、ラプチャーパネルに設置されている V 溝からパネルが開放し、最終的に完全に開放する構造である。

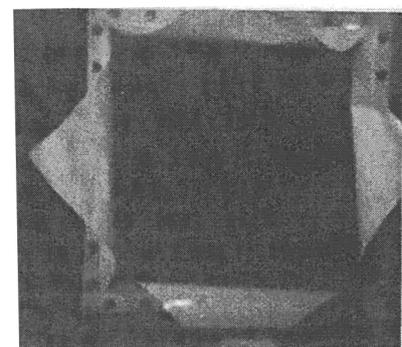
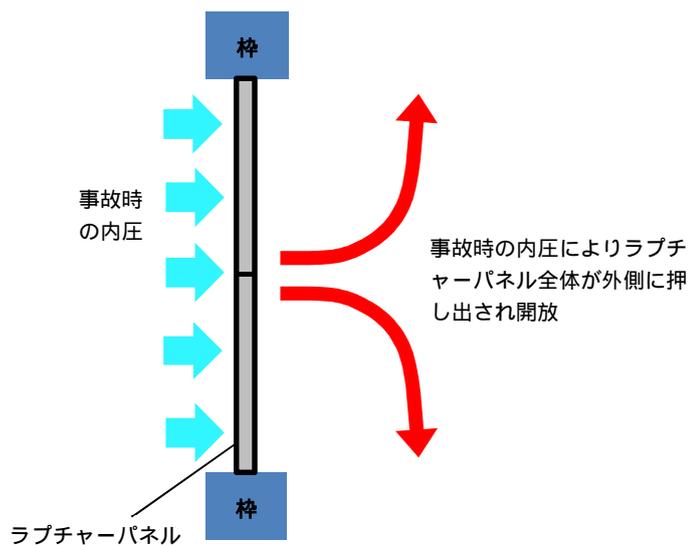
表 6-1 MS トンネル室 BOP の主要仕様

設置場所		寸法	材質
1 階	西 79	780 mm × 780 mm	A1050P



ラプチャーパネル

■ : MS トンネル室 BOP
MS トンネル室 立面図



ラプチャーパネルの開放後

図 6-1 MS トンネル室 BOP の構造と作動原理

7. MS トンネル室 BOP の開放について

MS トンネル室 BOP はラブチャーパネルを採用しており，専用の動力を必要とせず，受圧面に規定の圧力が加われば破裂し開放する。主蒸気管が破断した場合には，原子炉建屋原子炉区域主蒸気系トンネル室内に蒸気が噴出し規定の圧力が加わったラブチャーパネルから破裂・開放していくことになる。

仮に，事象の初期（蒸気が伝播しラブチャーパネルに初めて到達する段階）に全数のラブチャーパネルが破裂・開放しなかったとしても，その後の蒸気の継続的供給により，室内の圧力が上昇し受圧面に規定の圧力が加われば，未開放ラブチャーパネルが破裂することになる。また，事象の規模が小さく全数のラブチャーパネルが破損せず，かつ，主蒸気系トンネル室内の圧力が規定の開放圧力まで上昇しなければ，それ以上のラブチャーパネルの破裂・開放は発生しない。

設計基準事故の事故解析（環境への放射性物質の異常な放出）で対象としている主蒸気管破断事故においては，主蒸気管 1 ラインの破断を考慮しており，主蒸気隔離弁完全閉止までは，室内に蒸気は供給され続ける。仮に，未開放のラブチャーパネルがあったとしても，その後の圧力上昇により未開放の状態を維持することは困難である。

竜巻防護ネットによる流路への影響について

1. 目的

K7 オペフロ BOP 内側には、竜巻による飛来物の侵入を防ぐことを目的として、竜巻防護ネットを設置している。本資料では、竜巻防護ネットの設置により、主蒸気管破断事故時の蒸気排出及びインターフェイスシステム LOCA (以下「IS-LOCA」という。) 時の建屋内換気への影響を評価する。

2. 評価の方針

オペフロ BOP での圧力損失と竜巻防護ネットによる圧力損失を比較し、竜巻防護ネットによる圧力損失が十分に小さいことを確認することで、竜巻防護ネットによる影響が有意でないことを確認する。

3. 評価に関連する設備の概要

3.1 オペフロ BOP 及び竜巻防護ネットの位置関係

竜巻防護ネットは、図 1 に示す通り、オペフロ BOP の内側に支持構造物により支持されており、主蒸気管破断事故時、IS-LOCA 時の蒸气流路の一部となる。

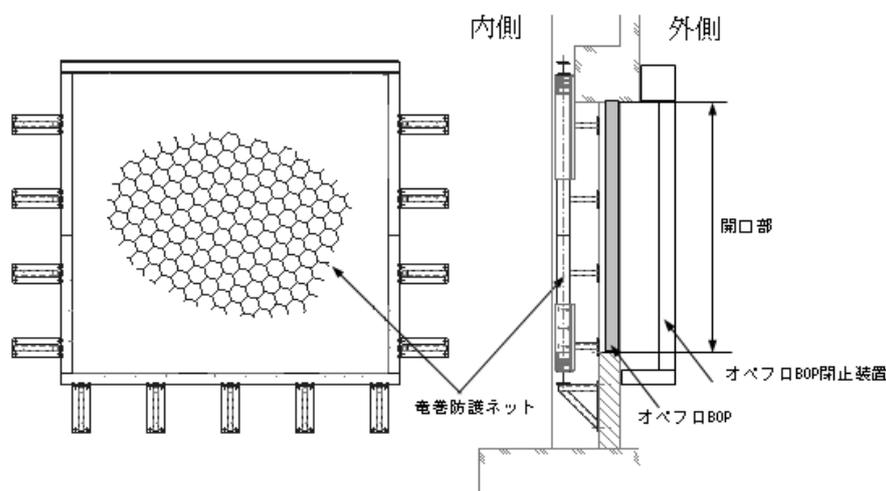


図 1 オペフロ BOP と竜巻防護ネットの概要

3.2 オペフロ BOP の開口面積

オペフロ BOP の開口面積 (S_1) は である (図 2 参照)。



図2 オペフロ BOP の寸法

3.3 竜巻防護ネット通過時の流路面積

竜巻防護ネットとオペフロ BOP との間には、 の隙間がある。ネットは一面にのみ張っており、側面は開口となっている（図3 参照）。

竜巻防護ネットのネット部及び側面部を足し合わせ、面積を求めると となる。なお、算出にあたっては、竜巻防護ネットの支持構造物の流路上の投影面積を除いている。

（参考） 竜巻防護ネット（ネット部） S_2 :

竜巻防護ネット（側面部） S_3 :

支持構造物 :

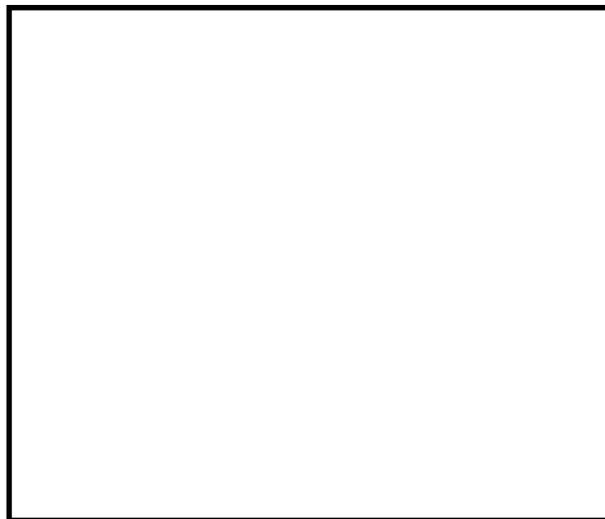


図3 竜巻防護ネット

3.4 竜巻防護ネット（ネット部）の開口率

竜巻防護ネット（ネット部）の開口率は1枚当たり であり、このネットが二枚重ねで張られている。

4. 影響評価

4.1 オペフロ BOP 通過時の圧損係数

オペフロ BOP を蒸気が通過する際には、流路は急縮小し、その後急拡大するため、Handbook of Hydraulic Resistance⁽¹⁾に示されているオリフィスの実験相関式が適用できると考えられる。

図 4 に示すオリフィスの実験相関式を用いてオペフロ BOP における圧損係数を算出した結果、オペフロ BOP 単独での蒸気通過時の圧損係数 (ζ_1) は となる。

$$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0.75} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0.375} \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)$$

$$\tau = (2.4 - \bar{l}) \times 10^{-\phi(\bar{l})} \geq 0, \quad \bar{l} = \frac{l}{D_h}, \quad \phi(\bar{l}) = 0.25 + \frac{0.535 \bar{l}^8}{0.05 + \bar{l}^8}$$

$$D_h = \sqrt{F_0}$$

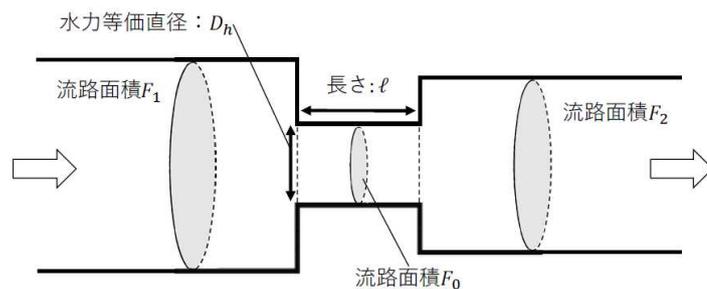


図 4 オリフィスの実験相関式中に用いるパラメータの関係図

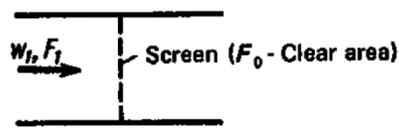
4.2 竜巻防護ネット通過時の圧損係数

竜巻防護ネット通過時の圧損係数は、Handbook of Hydraulic Resistance⁽¹⁾に示されている金属製棒状素線によるネット構造の圧損係数計算式を参照し算出する（図5，図6参照）。

$$Re = \frac{w_0 \delta_m}{\nu} \geq 10^3$$

$$\zeta_{wir} \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2 / 2}$$

$$= 1.3(1 - \bar{f}) + \left(\frac{1}{\bar{f}} - 1\right)^2$$



$$\bar{f} = \frac{F_0}{F_1}$$

図 5 金属製棒状素線によるネット構造の圧損係数計算式

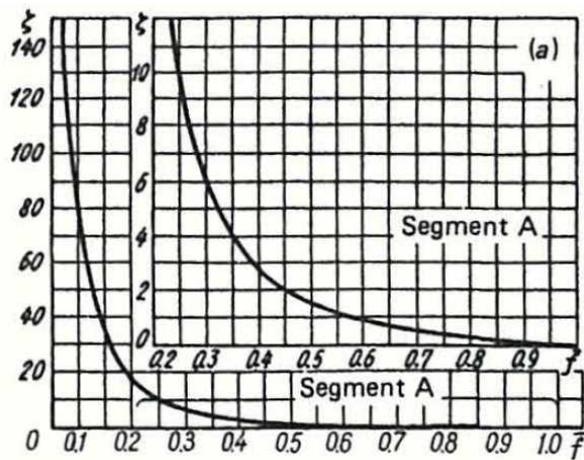


図6 金属製棒状素線によるネット構造の開口率と圧損係数の関係

(1) 竜巻防護ネット（ネット部）

竜巻防護ネットの開口率は であり，図5の式に当てはめて算出すると，圧損係数は， となる。竜巻防護ネットは二枚重ねで張られていることから，竜巻防護ネット（ネット部）通過時の圧損係数（₂）は となる。

(2) 竜巻防護ネット（側面部）

竜巻防護ネットの側面部にはネットが張られていなく開口部となっている。本評価では，保守的にネットとみなし，開口部を占有している支持構造物の投影面積から開口率を求め，図5の式に当てはめ圧損係数を算出した結果，竜巻防護ネット（側面部）通過時の圧損係数（₃）は となる。

4.3 オペフロ BOP 及び竜巻防護ネット通過時の流速

オペフロ BOP，竜巻防護ネット（ネット部）及び竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速比を求める。

V_1 ：オペフロ BOP 通過時の流速

V_2 ：竜巻防護ネット（ネット部）通過時の流速

V_3 ：竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速

竜巻防護ネット（ネット部）を通過する圧力損失と竜巻防護ネット（側面部）を通過する圧力損失は等しくなるため，以下の式が成り立つ。

$$2 \times V_2^2 = 3 \times V_3^2$$

したがって，竜巻防護ネット（ネット部）通過時の流速を1とした場合の竜巻防護ネット（ネット部）と竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速比は，

$$V_2 : V_3 = 1 : \text{} \text{ となる。}$$

以上より，竜巻防護ネット（ネット部）通過時の流速を1とした場合のオペフロ BOP，竜巻防護ネット（ネット部）及び竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速比は，

$$V_1 = (V_2 \times S_2 + V_3 \times S_3) / S_1 \text{ より,}$$
$$V_1 : V_2 : V_3 = \square : 1 : \square \text{ となる。}$$

4.4 オペフロ BOP と竜巻防護ネットの圧力損失比

圧力損失は、圧損係数と流量の2乗の積で求まることから、以下の式が成り立つ。

$$\text{圧力損失比} = (C_2 \times V_2^2) / (C_1 \times V_1^2)$$

上記の計算式を求めると、圧力損失比は約 0.07 となり、オペフロ BOP 単独での通過時の圧力損失に対して竜巻防護ネット通過時の圧力損失の影響は 7%程度となる。

5. まとめ

竜巻防護ネット設置による影響評価を実施した。竜巻ネットを設置した場合の主蒸気管破断時の流速での圧力損失は、従来（設置前）と比較しても 7%程度の増加であることが確認された。主蒸気管破断事故は、数秒で建屋内圧力が上昇し BOP 開放とともに、さらに数秒で圧力が大気圧に静定する事象である。ネット設置により圧力の最大値と大気圧に静定するまでの時間が若干増加することが考えられるが、7%程度の圧力損失の上昇であれば、事故時の挙動に有意な変化をもたらすものではないと考えられる。

また、IS-LOCA 時の流速は主蒸気管破断時の流速より小さいため、主蒸気管破断時と比較し、さらに圧力損失が小さくなる結果となると考えられ、換気的能力に与える影響は小さいと考えられる。

6. 参考文献

- (1) I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, Jaico Publishing House.

IS-LOCA 時の MS トンネル室 BOP への影響について

1. 目的

IS-LOCA により建屋内の圧力が上昇した際の MS トンネル室 BOP への影響（開放の有無）を確認する。

2. IS-LOCA 時の蒸気伝播の流れ

IS-LOCA 時の蒸気伝播の流れを示した概略図を示す（図 1）。IS-LOCA 発生時には、高圧炉心注水系（HPCF）ポンプ室から放出された蒸気が機器ハッチ等の開口部を經由し、建屋内の各フロアの圧力が上昇する。R/B 4F の圧力がオペフロ BOP 開放設定圧力に達すると、オペフロ BOP が開放し蒸気が環境中に放出されることにより、建屋内の圧力は低下する。

各フロアの圧力は、配管破断箇所から下流にいくにつれ、流路の圧損による影響から低くなっていく。また、オペフロ BOP 開放後には、蒸気が環境中に放出されるため、オペフロ BOP が開放する直前で MS トンネル室の圧力は最大になると考えられる。

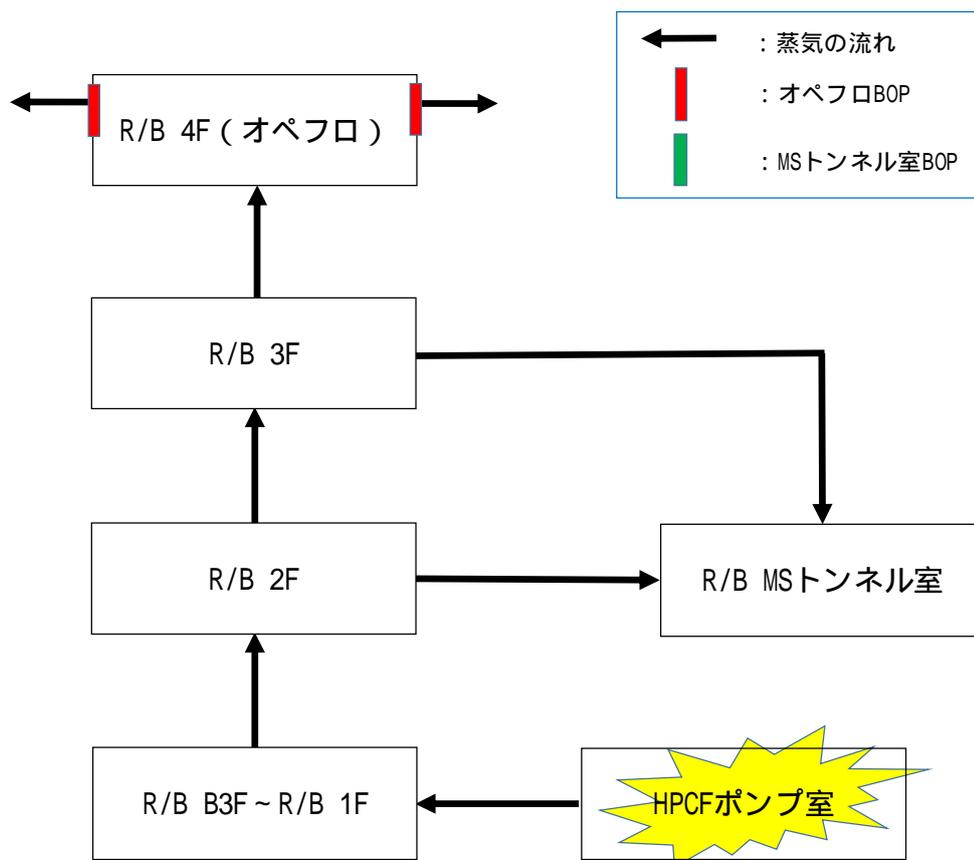


図 1 IS-LOCA 時における蒸気伝播の概略図

3. 評価の方針

IS-LOCA 時に MS トンネル BOP に加わる圧力と MS トンネル室 BOP の開放設定圧力を比較し、IS-LOCA 時に MS トンネル室に加わる圧力が MS トンネル室 BOP の開放設定圧力を上回らないことを確認する。なお、R/B MS トンネル室の R/B 2F、R/B 3F と接する面にも、プローアウトパネルが設置されているが、原子炉建屋のパウダリではないため、ここでは考慮せずに評価を行う。

IS-LOCA 時に MS トンネル BOP に加わる圧力は、R/B 3F での圧力から R/B MS トンネル室までの流路圧損（図 2 中の P_3 ）を差し引いた値、あるいは、R/B 2F での圧力から R/B MS トンネル室までの流路圧損（図 2 中の P_4 ）を差し引いた値のどちらか大きい方の値になると考えられるが、本評価では、保守的に P_3 及び P_4 の圧力低下に期待せず、MS トンネル室と隣接し、かつ、より上流のフロアである R/B 2F における圧力と同等とみなす。

R/B 2F における圧力の最大値は、オペフロ BOP の開放設定圧力に R/B 2F から R/B 4F までの流路の圧損（図 2 中の P_1 、 P_2 ）を加えた値になるため、この値が MS トンネル室 BOP の開放設定圧力に到達しないことを確認する。なお、IS-LOCA により放出された蒸気は各フロアで分岐や蒸気凝縮等により、破断点より放出された蒸気流量より小さくなると考えられるが、本評価では、保守的に破断点から放出された蒸気流量の全量が R/B 2F から R/B 4F にかけて流れることを想定する。その際の蒸気流量としては、設置許可時の IS-LOCA の条件を参考にし、破断時に発生する流量の時刻歴における最大値を用いて流路の圧損（ P_1 、 P_2 ）を算出する。なお、蒸気流量に換算する際には、保守的に密度を小さくするために 100、1 気圧における蒸気密度を用いる。

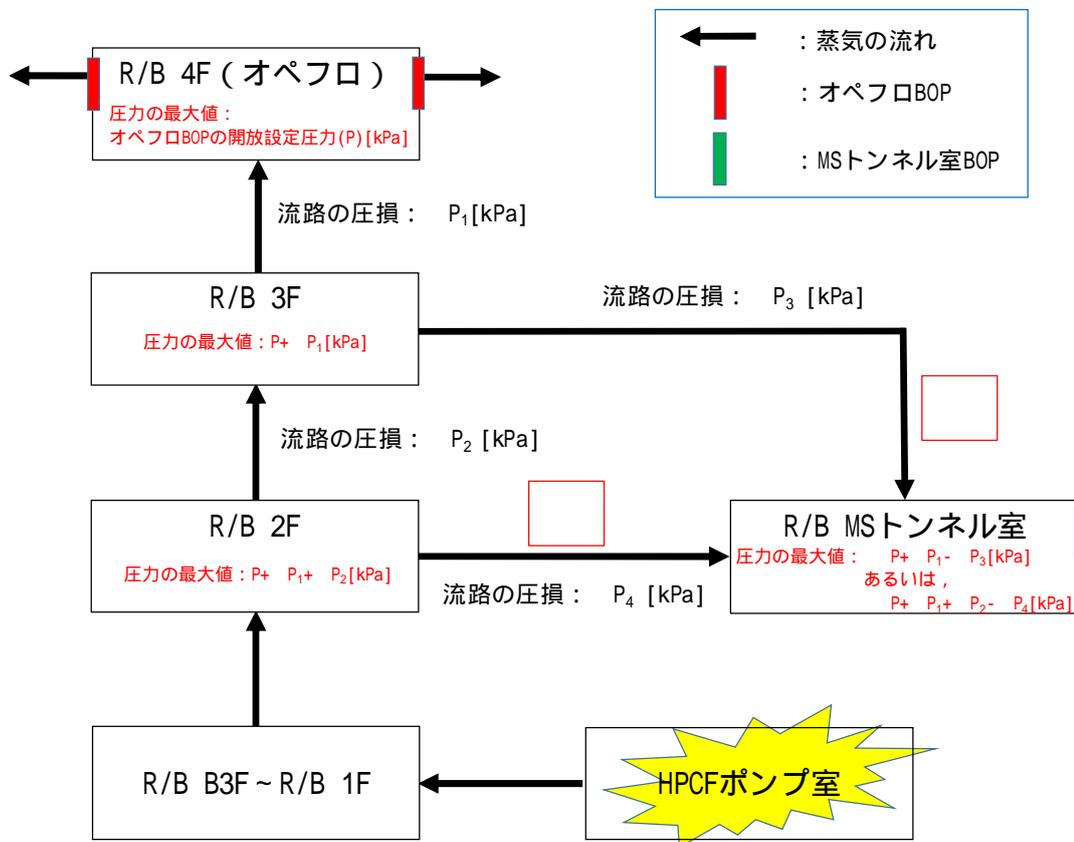


図 2 IS-LOCA 時における蒸気伝播の概略図（説明付）

4. 評価条件

4.1 オペフロ BOP の開放設定圧力

オペフロ BOP は、内外圧差が 3.43kPa 以下で開放する設計となっている。オペフロ BOP の開放試験では、~kPa で開放する結果を得られているが、本検討では、保守的に MS トンネル室 BOP に加わる圧力が高くなるよう、開放設定圧力を 3.43kPa として評価を行う。

4.2 MS トンネル室 BOP の開放設定圧力

MS トンネル室 BOP は、ラプチャーパネルを採用している。MS トンネル室 BOP の開放設定圧力としては、設計における開放設定圧力 (800kg/m² ± 200kg/m²) より、保守的に開放しやすい条件となるよう下限値である 600kg/m² (5.89kPa) と設定する。

4.3 流路の圧損係数

4.3.1 R/B 3F ~ R/B 4F (オペフロ) 通過時における圧損係数 (1)

式 (1) に示すオリフィスの実験相関式を用いて R/B 3F ~ R/B 4F 通過時における圧損係数を算出した。

$$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0.75} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0.375} \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)$$

$$\tau = (2.4 - \bar{l}) \times 10^{-\varphi(\bar{l})} \geq 0, \quad \bar{l} = \frac{l}{D_h}, \quad \varphi(\bar{l}) = 0.25 + \frac{0.535 \bar{l}^8}{0.05 + \bar{l}^8} \quad (1)$$

$$D_h = \sqrt{F_0}$$

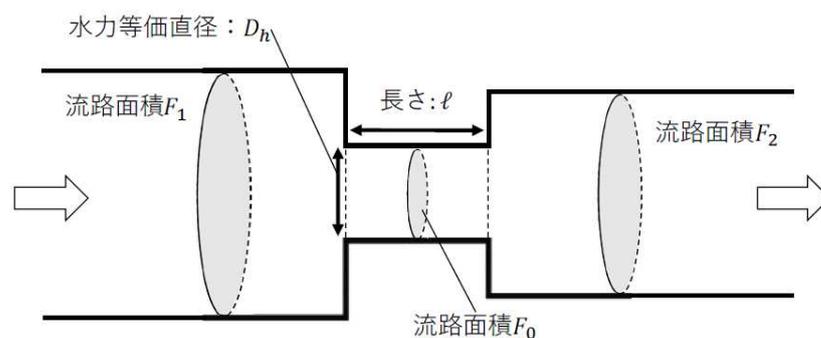


図3 オリフィスの概念図

F_0 は、R/B 3F と R/B 4F 間の流路となる機器ハッチの開口面積 (44m²) を設定する。また、保守的に圧損係数が大きくなるよう、 F_1, F_2 は無限大とし、 l は 0m として算出する。

以上より、R/B 3F ~ R/B 4F 通過時の圧損係数は、2.9 となる。

4.3.2 R/B 2F～R/B 3Fにおける圧損係数（ ζ_2 ）

4.3.1 同様に，オリフィスの実験相関式を用いて R/B 2F～R/B 3F における圧損係数を算出した。

F_0 は，R/B 2F と R/B 3F 間の流路となる機器ハッチの開口面積（44m²）を設定する。また，保守的に圧損係数が大きくなるよう， F_1 ， F_2 は無限大とし， l は 0m として算出する。

以上より，R/B 2F～R/B 3F 通過時の圧損係数は，2.9 となる。

4.4 評価条件まとめ

表 1 評価条件まとめ

分類	項目	記号	値	単位	備考
BOP 設定圧力	オペフロ BOP 開放設定圧力		3.43	kPa	設計値
	MS トンネル室 BOP 開放設定圧力		5.89	kPa	下限値で設定
R/B 3F～R/B 4F	流路面積	A_1	44	m ²	
	圧損係数	ζ_1	2.9		
	蒸気流速	V_1	2.0	m/s	$V_1=W/A_1$
R/B 2F～R/B 3F	流路面積	A_2	44	m ²	
	圧損係数	ζ_2	2.9		
	蒸気流速	V_2	2.0	m/s	$V_2=W/A_2$
蒸気流量	最大蒸気流量	W	50	kg/s	設置許可時の IS-LOCA の条件を参考にし，保守的に 50kg/s と設定
蒸気条件	蒸気温度		100		保守的に 100 と設定
	蒸気密度計算用圧力		101325	Pa	保守的に 1 気圧と設定
	蒸気密度		0.597578	kg/m ³	

5. 影響評価

IS-LOCA 時の R/B 2F における最大の圧力は，以下の式により求められる。

$$\text{R/B 2F における圧力[kPa]} = \text{オペフロ BOP 開放設定圧力} + P_1 + P_2$$

P_1 : R/B 3F～R/B 4F 通過時に生じる圧損

P_2 : R/B 2F～R/B 3F 通過時に生じる圧損

$$P_1 = (\rho_1 \times V_1^2) / 2$$

0.004kPa

$$P_2 = (\rho_2 \times V_2^2) / 2$$

0.004kPa

したがって、R/B 2Fにおける圧力は、3.44kPa程度となり、MSトンネル室BOPの開放設定圧力(5.89kPa)を上回らないことから、IS-LOCA時にMSトンネル室BOPは開放しない。

ブローアウトパネルの開放機能を担保する設計条件について

1. 燃料取替床ブローアウトパネル

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）の満たすべき開放条件について整理した。オペフロ BOP を開放させるために満足すべき条件は以下の通りであり，抵抗力（クリップの抗力，パネル移動時の摩擦力による抗力，パネルと躯体間のシール材の抗力の合計）が，差圧による荷重以下（3.43kPa 以下）の条件を満足する必要がある。また，2 次格納施設としての原子炉建屋原子炉区域のバウンダリ機能確保の観点から，弾性設計用地震動 S d で開放しないように設計する。

$$\boxed{\text{弾性設計用地震動 S d による開放荷重}} < \boxed{\text{抵抗力 (クリップの抗力 + 摩擦による抗力 + シール材抗力)}} < \boxed{\text{設計差圧 3.43kPa による開放荷重}}$$

各項目の考え方，根拠は以下のとおり。

(1) 基本パラメータ・条件

オペフロ BOP の重量は，1500 kg として評価する。

弾性設計用地震動 S d の加速度は，ブローアウトパネル設置位置より高く，地震加速度が大きい原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床（T.M.S.L.49.7 m）での設計用床応答曲線（S d）より得られる応答水平震度 1.3G を用いて評価する。

(2) 設計差圧 3.43 kPa 時の開放荷重（ ）

設計差圧以下でパネルを開放させるため，設計差圧 3.43kPa とする。オペフロ BOP に 3.43kPa が付加する場合の荷重として約 52.2 kN と評価する。

(3) 弾性設計用地震動 S d による開放荷重（ ）

弾性設計用地震動 S d による地震力としては，約 19.2kN（ $1500 \text{ kg} \times 1.3\text{G} \times 9.8\text{m/s}^2 = 19110 \text{ N}$ ）とする。なお，オペフロ BOP の固有振動数は，実機大モックアップ試験装置で固有振動数を測定しており，1 次固有振動数は約 Hz である。このため，設計用床応答曲線（S d）を用いて地震力を算出する。

(4) クリップの個数と配置（ 下限側）

クリップの抗力算定に使用するクリップ開放荷重を，2 種類のクリップ（幅約 75mm と約 37.5 mm）を用いて求めた。各 3 個のクリップ試験結果から，保守的に 1795 N/個（幅約 75mm のクリップ開放試験での平均値 - 3 ） \times 個 + 1042 N/個（幅約 37.5mm のクリップ開放試験での平均値 - 3 ） \times 個 = 約 30.8 kN と評価した。

なお，クリップはオペフロ BOP が傾くことを回避し，可能な限り平行移動するよう，上下での抵抗が可能な限り同じとなるように配置する方針とする。この場合，パネル はパネル移

動時に摩擦力が発生するが、パネル[]には摩擦力が発生しないため、オペフロ BOP []には摩擦力相当分のクリップ（幅約 37.5mm ，[]個）を増加して設置する。

このため、クリップは[]（幅約 75mm のクリップ []個，幅約 37.5mm のクリップ []個），[]（幅約 75mm のクリップ []個）の合計 18 個分とする。

(5) 摩擦力（摩擦係数）（ ）

摩擦力算定に用いる摩擦係数は静止摩擦係数[]を採用して設計する。なお、オペフロ BOP 移動時に生じる摩擦による抗力についても、保守的に[]を採用して設計する。この場合の摩擦による抗力は約[] kN（ $1500 \text{ kg} \times [] \times 9.8 \text{ m/s}^2 = [] \text{ N}$ ）と評価した。

(6) シール材の抗力（ ）

シール材はシール材目地深さ約 []mm として設計するため、シール材接触面積が約 []（パネルサイズは約 4160 mm × 約 4260 mm であり、この周長は []であるため、シール材接触面積は []）である。また、シール材の破断試験結果より最大せん断応力約 [] N/mm²，最大せん断耐力時のせん断変形角は約 []% であるため、シール材の最大抗力は、約 [] N/mm² × [] = 約 [] kN と評価される。

一方、クリップ試験結果からクリップはパネルが約 10 mm 移動した際に最大耐力を示すが、約 10 mm 移動した際のシール材の抗力は最大抗力の []以下であり、25 mm 程度でクリップは完全にオペフロ BOP から外れることが判明している。このためクリップの最大荷重時に重畳させるべきシール材の抗力として、シール材が約 []mm せん断変形した場合のシール材の抗力を考慮する。シール材目地幅は []mm であるので、[]mm の移動は 50 % のせん断変形角に相当し、その際の荷重は破断試験結果より約 [] kN である。

(7) まとめ

以上より、S d による地震荷重は約 19.2 kN，クリップのみの抗力は約 30.8 kN となり、クリップ抗力等を保守的に見積もっても弾性設計用地震動 S d による地震荷重を十分に上回り、下限側の条件を満足できることを確認した。

また、クリップ試験の結果から、クリップの最大耐力は、幅約 75 mm のクリップ開放試験での平均値 +3 は約 1819 N であり、幅約 37.5 mm のクリップ開放試験での平均値 +3 は約 1270 N であるため、クリップ 18 個で約 31.6 kN となる（上限側）。そのため、クリップ抗力 + 摩擦による抗力 + シール材の抗力の合計は約 40.2 kN（約 31.6 kN + 約 [] kN + 約 [] kN = 約 40.2 kN）となり、設計差圧 3.43 kPa 時の開放荷重約 52.2 kN を下回るため、上限側の条件を満足できることを確認した。

このため、クリップ開放試験での平均値 +3 または -3 を考慮したとしても、弾性設計用地震動 S d 及び設計差圧 3.43kPa 時の開放荷重約 52.2 kN に対して、3 割程度（約 10kN 程度）の十分な余裕を有しており、公差（±1.0mm）を考慮してもブローアウトパネルの機能は確保される。

2. 主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル

主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下「MS トンネル室 BOP」という。）の満たすべき開放条件について整理した。MS トンネル室 BOP を開放させるために満足すべき条件は以下の通りであり、MS トンネル室 BOP の開放圧力が設計差圧以下（9.81kPa 以下）となる必要がある。また、2 次格納施設としての原子炉建屋原子炉区域のバウンダリ機能確保の観点から、弾性設計用地震動 S d で開放しないように設計する。

$$\boxed{\text{弾性設計用地震動 S d による地震荷重}} < \boxed{\text{MS トンネル室 BOP 開放圧力 (設計条件 } 7.85 \pm 1.96 \text{kPa)}} < \boxed{\text{設計差圧 } 9.81 \text{kPa による開放圧力}}$$

各項目の考え方、根拠は以下のとおり。

(1) 基本パラメータ・条件

MS トンネル室 BOP の重量は、 0.54 kg/m^2 として評価する。

弾性設計用地震動 S d の加速度は、ブローアウトパネル設置位置より高い、MS トンネル室 BOP 上部天井（T.M.S.L.23.5 m）での設計用床応答曲線（S d）より得られる動的震度 0.96G を用いて評価する。

(2) 設計差圧 9.81 kPa 時の開放圧力（ ）

設計差圧以下で MS トンネル室 BOP を開放させるため、設計差圧 9.81kPa とする。

(3) 弾性設計用地震動 S d による開放荷重（ ）

弾性設計用地震動 S d による地震力は、約 0.00508 kN/m^2 ($0.54 \text{ kg/m}^2 \times 0.96 \text{ G} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 5.08032 \text{ N/m}^2$) とする。なお、MS トンネル室 BOP の固有振動数は、固有値解析により算出し、1 次固有振動数は約 Hz となる。このため、設計用床応答曲線（S d）を用いて地震力を算出する。

(4) MS トンネル室 BOP の開放圧力（ ）

破裂試験の結果、破裂圧力は 7.53kPa ~ 7.85kPa である。

(5) まとめ

以上より、S d による地震荷重は約 0.00508 kN/m^2 、MS トンネル室 BOP の開放圧力が 7.53kPa ~ 7.85 kPa であり、下限側の条件を満足できることを確認した。

また、MS トンネル室 BOP の開放圧力は 7.53kPa ~ 7.85 kPa、設計差圧は 9.81kPa であり、上限側の条件を満足できることを確認した。

クリップ引張試験の回数について

1. 引張試験の目的と試験回数の設定根拠

クリップは燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）を建屋躯体に固定するとともに、オペフロ BOP の開放圧力を決定する主要な部品であるため、クリップ単体での開放試験を実施した（補足説明資料 4-3「クリップ引張試験について」）。

クリップの引張試験の回数を決めるに当たっては、金属製品であり公差を $\pm 1.0\text{mm}$ と小さくでき、また各種規格における試験体数を踏まえて3体とした。

表 1 各種規格等における試験体数について

規格等名称	記載内容
金属材料のシャルピー衝撃試験方法 (JIS Z 2242 : 2018)	
発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)	
建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説	

2. 引張試験結果

クリップの引張試験の試験結果を表2に示す。

クリップ幅約75mmの最大耐力の平均値は1807N、標準偏差は4Nであった。また、クリップ幅約37.5mmの最大耐力の平均値は1156N、標準偏差は38Nであった。

表1 実機用クリップ試験結果

耐力 (試験体数は3個)		クリップ幅約75mm	クリップ幅約37.5mm
		荷重 (N)	
最大耐力	1回目	1803	1206
	2回目	1807	1146
	3回目	1812	1115
	平均値	1807	1156
標準偏差		4	38
最大耐力(平均)+3		1819	1270
最小耐力(平均)-3		1795	1042

3. クリップの抗力算定について

クリップの抗力算定に使用するクリップ開放荷重を、2種類のクリップ(幅約75mmと約37.5mm)を用いて求めた。各3個のクリップ試験結果から、保守的に1795N/個(幅約75mmのクリップ開放試験での平均値-3)×個+1042N/個(幅約37.5mmのクリップ開放試験での平均値-3)×個=約30.8kNと評価した。このため、Sdによる地震荷重は約19.2kN、クリップのみの抗力は約30.8kNとなり、弾性設計用地震動Sdによる地震荷重を十分に上回っている。

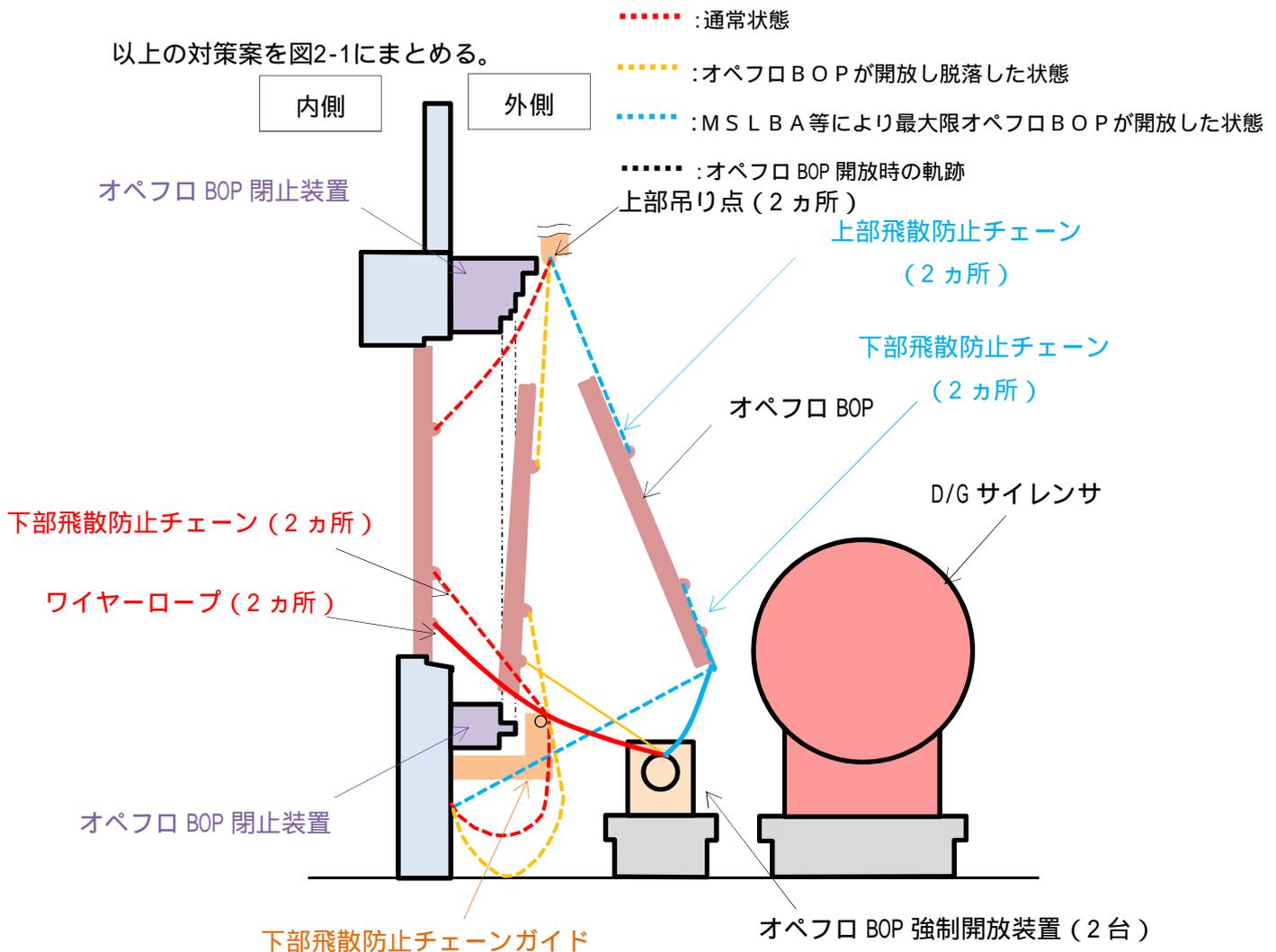
また、クリップ試験の結果から、クリップの最大耐力は、幅約75mmのクリップ開放試験での平均値+3は約1819Nであり、幅約37.5mmのクリップ開放試験での平均値+3は約1270Nであるため、クリップ18個で約31.6kNとなる。そのため、クリップ抗力+摩擦による抗力+シール材の抗力の合計は約40.2kN(約31.6kN+約kN+約kN=約40.2kN)となり、設計差圧3.43kPa時の開放荷重約52.2kNを十分に下回っている。

以上より、試験結果に+3または-3を考慮したとしても、Sdによる地震荷重約19.2kN及び設計差圧3.43kPa時の開放荷重約52.2kNに対して、3割程度(約10kN程度)の十分な余裕を有しているため、公差(±1.0mm)を考慮してもブローアウトパネルの機能は確保される。

ブローアウトパネル開放時の他設備への影響について

1. 燃料取替床ブローアウトパネルのチェーンが、閉止装置に干渉しない設計
 燃料取替床ブローアウトパネル(以下「オペフロBOP」という。)上部及び下部に設置する飛散防止チェーンは、上部はオペフロBOP閉止装置の外側へ架台を設置、下部は干渉防止ガイドを設置することで、閉止装置のレールに接触しない配置とする。
2. オペフロBOPのチェーンが落下の衝撃荷重に十分耐える設計
 十分な強度を有する落下防止チェーンを設置する。使用するチェーンはオペフロBOP開放時の運動エネルギーに対して十分な裕度を持った設計とする。
 また、モックアップ試験でオペフロBOPを開放した際、落下荷重に対してチェーンは健全な状態を維持していることを確認した。

以上の対策案を図2-1にまとめる。



オペフロBOP付近 概略断面図

図2-1 オペフロBOP開放時の干渉対策について

ブローアウトパネル機能確認試験要領について

1. 目的

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）及び主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下「MS トンネル室 BOP」という。）の機能を確認するため、実機規模の試験体を用いた開放試験を行い、機能維持確認を実施する。

2. オペフロ BOP

2.1 試験場所

試験装置等を設置し新たに試験会場として設定

2.2 試験項目

- (1) 作動確認 : オペフロ BOP の開機能確認
- (2) 閉維持確認 : オペフロ BOP の耐震性能の確認

オペフロBOP(取付け枠及び新たに設計したクリップを含む)を設置した実機大のモックアップ試験体を製作し、設計作動圧の3.43 kPa以下で確実に開放されることを確認するため、油圧ジャッキを用いた加力による開放試験を実施する。さらに、本試験にて実測する開放に必要な荷重より、シール材の抗力及びパネル下部(パネル及びすべり台)の摩擦による抗力を求め、クリップの条件を必要に応じて最適化する。

また、オペフロ BOP の耐震性能を確認する。

本試験での確認事項を以下に示す。

【作動確認】

オペフロBOPの開放動作の確認

オペフロBOPの開放荷重の確認

クリップ脱落荷重の確認*

シール材抗力及び下部摩擦による抗力の開放荷重に与える影響の確認

【閉維持確認】

固有周期測定

オペフロBOPがS d相当荷重で開放しないこと(パネルの荷重曲線より評価)

注記 * : クリップがオペフロBOPに取り付けられた山形鋼から完全に外れて荷重を負担しなくなった時点をクリップ脱落とする。また、クリップのひずみ計測などから判断し、その時の荷重を確認する。図2-1にクリップの固定状態及び脱落状態を示す。



図 2-1 クリップの固定状態及び脱落状態

3. オペフロBOP試験概要

3.1 試験場所概要

モックアップ試験は、オペフロBOP及び取付け架台を試験場で作成し実施する。図3-1に試験場の配置図を示す。

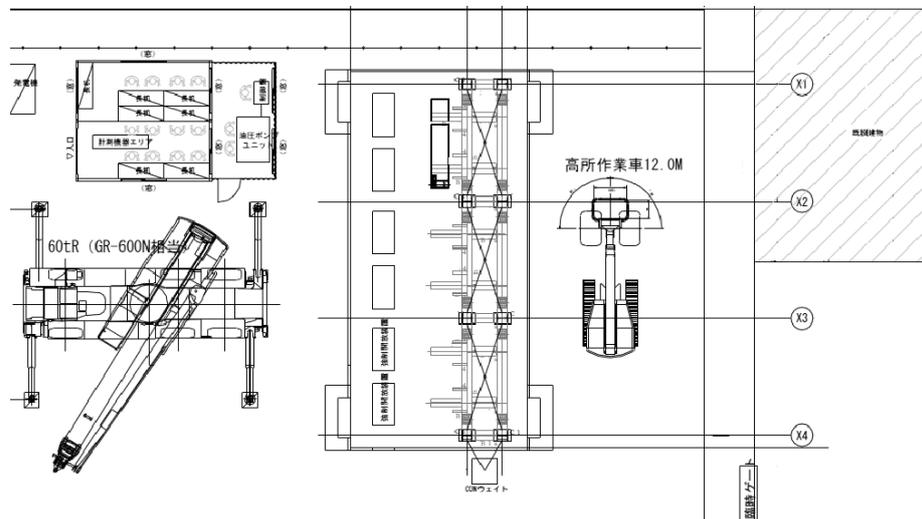


図3-1 試験場配置図（平面図）

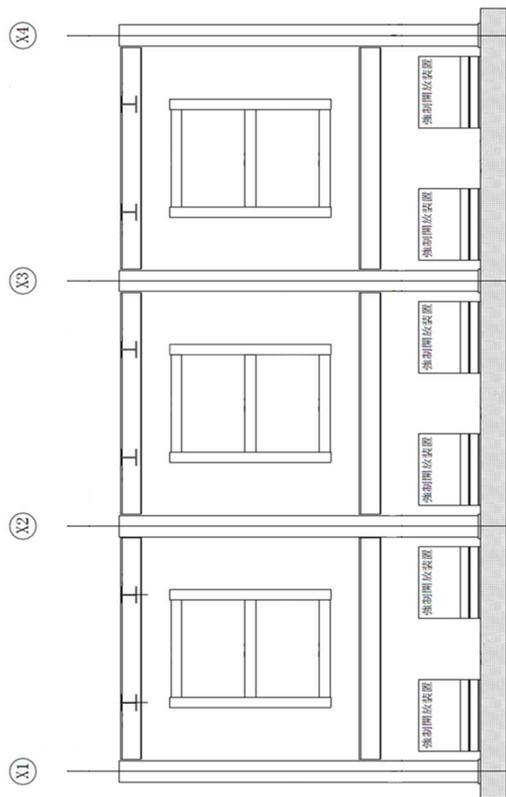
3.2 試験装置概要

試験装置は、実機を模擬したオペフロBOP、加力装置及び躯体を再現するオペフロBOP取付け部と加力装置取付け部を一体化した取付け架台で構成する。図3-2に試験で使用するオペフロBOP及び取付け架台の概略図を示す。

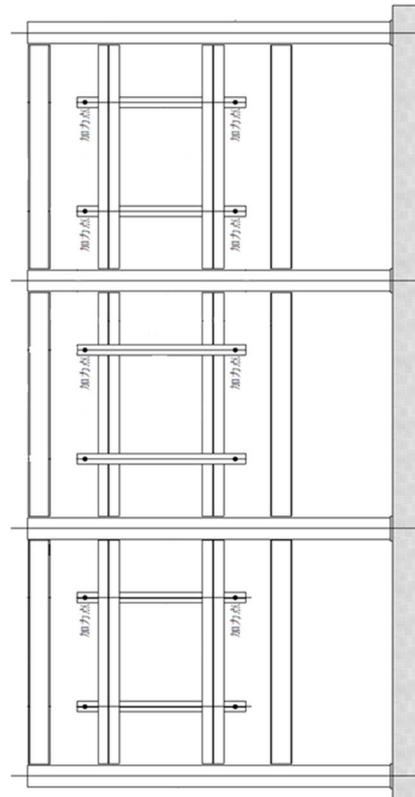
オペフロBOPは実機に取り付けられているオペフロBOPを模擬して実施する。サイズは約4.16 m×約4.26 m、重量は約1.5 tである。なお、オペフロBOPは3体製作する。

取付け架台は四方が鉄筋コンクリート造の原子炉建屋開口部を再現する。パネルとの接触により摩擦の影響を強く受ける[]は実機同様すべり台とし、開口部の側面および上面側はH形鋼によって再現する。

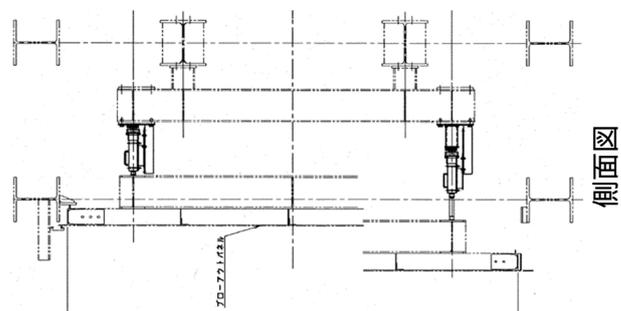
試験体のオペフロBOPは、脱落時の損傷等を防止するために、2本のチェーンにて落下を防止し、復旧による複数回の試験を実施可能とするものとする。



パネル及び押し出し梁図



試験用架構図



側面図

図 3-2 オペフロ B0P 及び取付け架台の概略立面図

3.3 オペフロBOPの架台への取付け方法

オペフロBOPは、屋外側上部及び左右の3面にシーリング材を施工する。シーリング材は、シリコンシーラントとし、目地深さは10mmとする。オペフロBOPは、試験装置架台（実機では躯体）に取り付けられた溝形鋼と、オペフロBOPに取り付けられた山形鋼をクリップで挟むことにより固定する。クリップを取り付け可能な箇所は、（幅約75mmを個、幅約37.5mmを個）、（幅約75mmを個）の計18箇所とする。

クリップの形状および溝形鋼への取付け位置を図3-3に示す。クリップの材質はSUS304とし、形状は図3-3に示すように、クリップ幅約75mmまたは幅約37.5mm、厚み約65.6mm、溝形鋼への掛り代約とし、M12ボルトにより取付け枠の16mmプレートに取付ける。

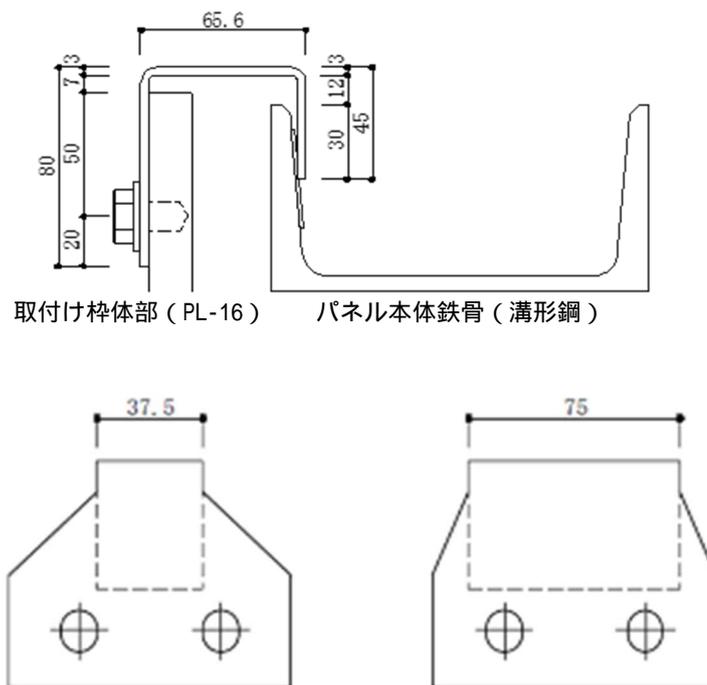


図 3-3 クリップ形状及び取付け位置図（正面図・断面図）

3.4 固有周期測定方法

オペフロ BOP 試験体に加速度計を取り付け、オペフロ BOP の固有振動数をハンマーによる打撃，又は常時微動計測により測定し固有周期を求める。

注：地盤は常に僅かに揺れており，この微振動を常時微動という。常時微動は，風や波浪などの自然現象や，交通機関，工場の機械などの人工的振動など不特定多数の原因により励起される。この常時微動で地盤や構造物の振動特性を推定することができる。

試験概要

(1) 計測方法

a. ハンマーによる打撃

オペフロ BOP 試験体中央部に設置した加速度計の傍をゴムハンマー（267.5 g）で打撃し，加速度を計測する。

b. 常時微動計測

オペフロ BOP 試験体中央部に設置した加速度計により常時微動により励起された加速度を計測する。

(2) 計測機器

計測機器の取付け位置を図 3-5 に示す。

a. 加速度計

メーカー名称：，型番名称：

b. アンプ

メーカー名称：，型番名称：



図3-4 計測機器取付け位置図（立面図）

4. オペフロBOPの加力方法

4.1 試験機器構成及び加力方法概要

本試験に使用する機器の配置及び構成の概念図を図4-1に、試験用の架構のイメージを図4-2に示す。

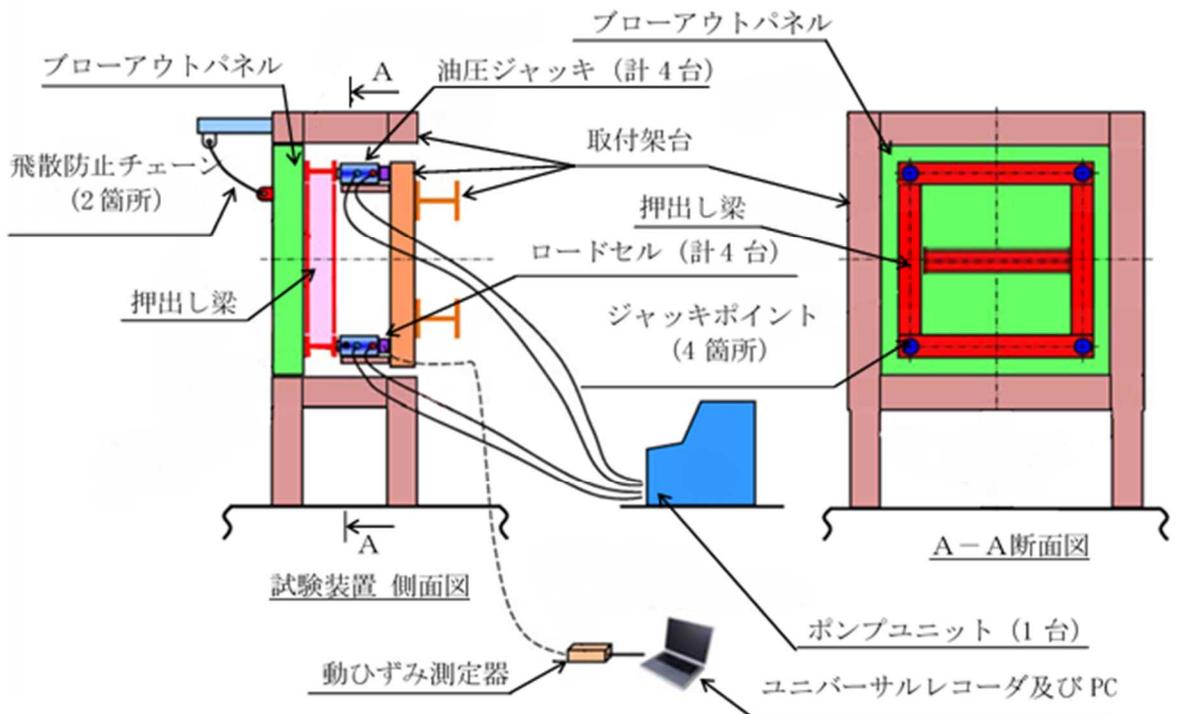


図 4-1 試験機器配置及び構成概念図

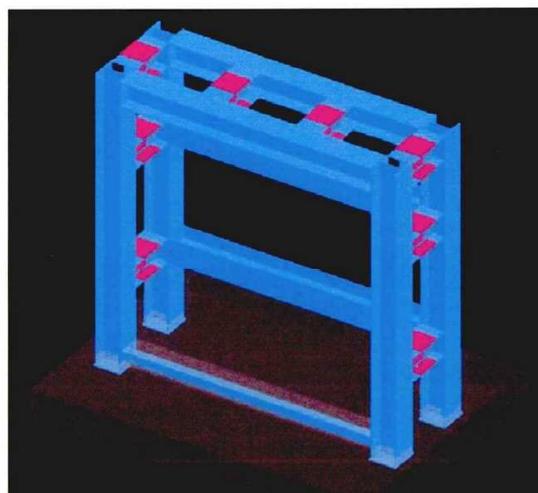


図 4-2 試験用架構 (イメージ図)

試験用架構にオペフロBOP1面を取り付ける。当該パネルに「押し出し梁」を接触させ、その「押し出し梁」を4台の油圧ジャッキを使用して押し出すことにより、オペフロBOPを加力する。

「押し出し梁」はオペフロBOPに対して独立しておりオペフロBOPの開放条件に影響を与えないものとする。

油圧ジャッキの反力は取付架台で受ける構造とする。

また、各油圧ジャッキの反力側にはロードセルを取り付け、各油圧ジャッキから試験体への負荷を測定するものとする。各ロードセルはロードセルモニタにて出力を抽出・変換し、それぞれの出力はユニバーサルレコーダ及びPCで記録するものとする。

試験体は既設仕様に合わせて3体製作する。試験体仕様を表4-1に示す。

表4-1 試験体仕様（試験体1～3）

製 造	清水建設株式会社
型 式	既存パネル模擬
概算質量	1500 kg
数量	各1面
サイズ	幅 4260 mm × 高さ 4160 mm
クリップ取付け箇所	18箇所*
シール材	シリコンシーラント

注記 *：クリップ個数及び形状は、試験体により変更する場合有り。

4.2 加力仕様

オペフロBOPを押し出し梁により加力するために、複動型油圧ジャッキ4台を使用する。ジャッキは1台のポンプユニットから加圧する。当該ポンプユニットは、4台のジャッキへの吐出油圧を一定とすることで、一定の加重にて作動を制御する。

加力方法概要図を図4-3に、押し出し梁の支持装置を図4-4に示す。油圧ジャッキ及びポンプユニットの仕様を表4-2、表4-3に示す。

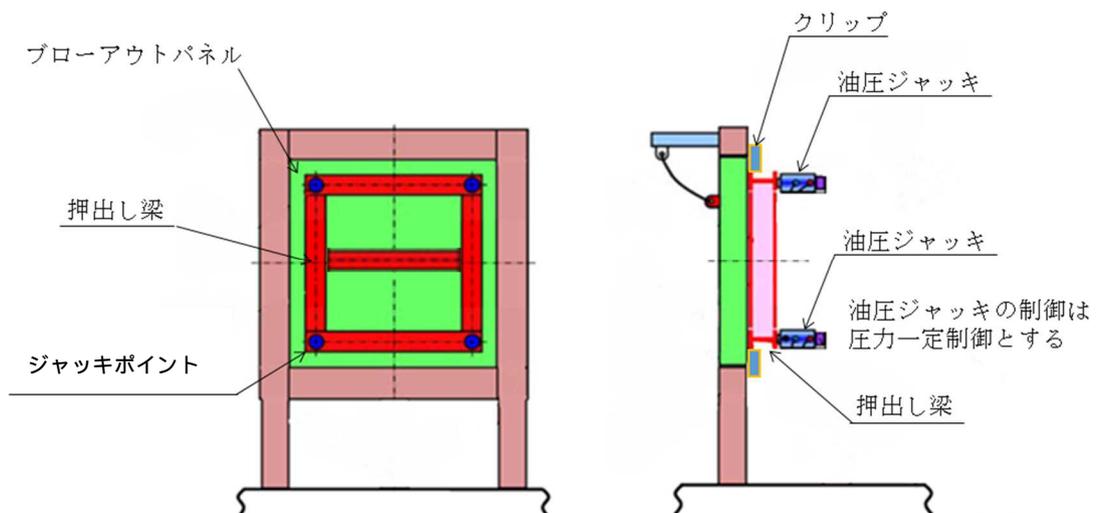


図4-3 加力方法概要立面図



図4-4 押し出し梁と支持装置の概要断面図

表4-2 油圧ジャッキ仕様

製造メーカー		
型 式		
能力（1台あたり）		
使用数量	4台	
ストローク（最大）		
伸長速度（理論値）		

表4-3 ポンプユニット仕様

製造メーカー		
型 式		
吐出量		
使用数量	1台	
電 源		
電動機		
質 量		

4.3 オペフロBOP試験方法

(1) 試験手順

モックアップ試験は3ケース実施した。試験ケースを表4-4に示す。

試験体1のクリップ配置は [] (幅約75mmを []個, 幅約37.5mmを []個), [] (幅約75mmを []個)とする。これは, 現状で予想されるシールの抗力とパネル下部の摩擦, クリップ1個あたりの耐力から, S d地震時には開放せず, かつ, 設定差圧の3.43 kPa以下にて確実に開放するように設計された配置である。 []のクリップについては, 摩擦による抗力を考慮して []個減らしている。試験体1のクリップ取付け位置を図4-5に示す。また, 試験体2,3は, 試験体1と同条件にて再現性を確認する。

表 4-4 試験ケース

	クリップの配置 及び個数		クリップ形状, 取付け寸法			備考
	上	下	幅	内寸法	掛かり代	
試験体 1	[]		約 75・約 37.5 mm	[]		
試験体 2			約 75・約 37.5 mm			
試験体 3			約 75・約 37.5 mm			

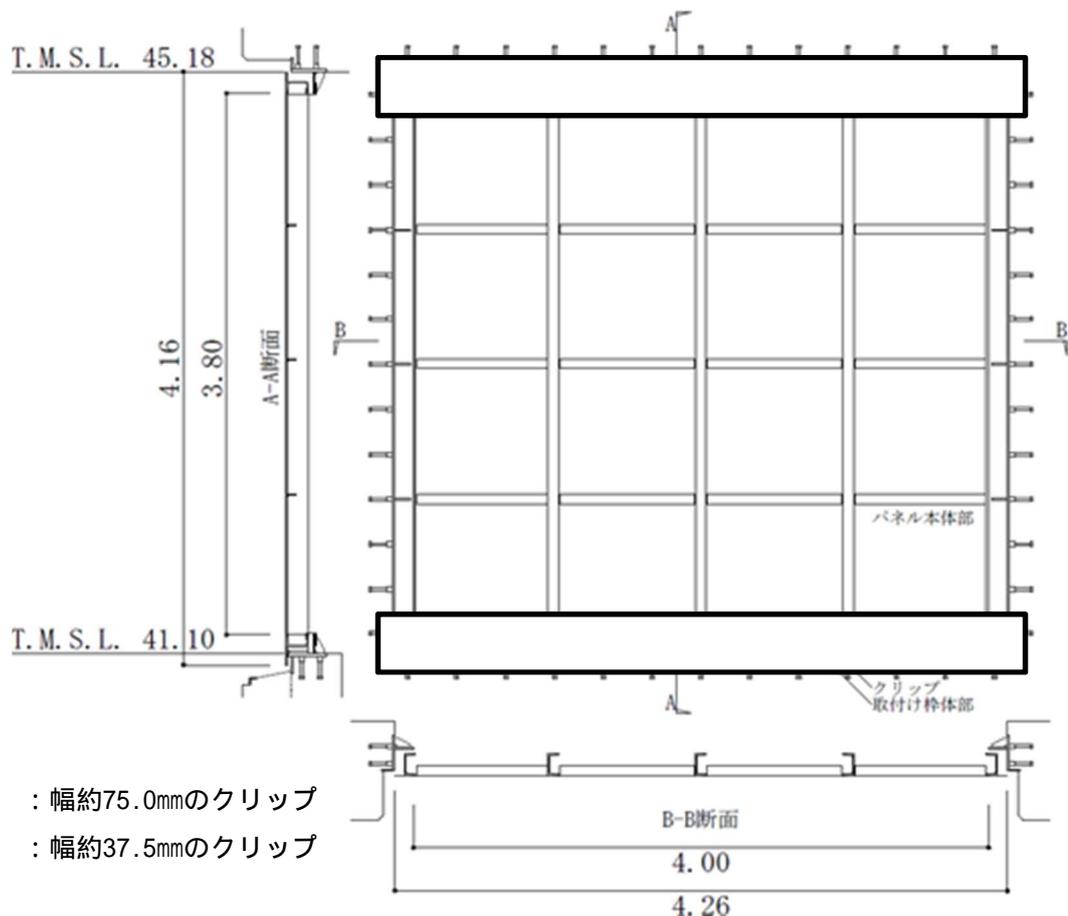


図 4-5 クリップ配置図 (立面図)

4.4 測定内容及び方法

(1) 測定内容

各油圧ジャッキ負荷，変位

(2) 測定方法

各油圧ジャッキに1台ずつ配置したロードセルを使用する。その他の測定項目と連動し，時刻歴測定とする。

計測項目は，ジャッキによる加力荷重4点（上記，荷重計より取得），ブローアウトパネルの変位4点（加力位置近傍の変位），クリップのひずみ4点（試験時の開放状況を動画撮影）とする。荷重，変位及び，ひずみ計測の機器構成を図4-7に示す。加力が短時間で終了する試験のため，動的な計測システムを用い，サンプリング時間は□秒程度とする。

表4-5に計測機器等仕様を示す。

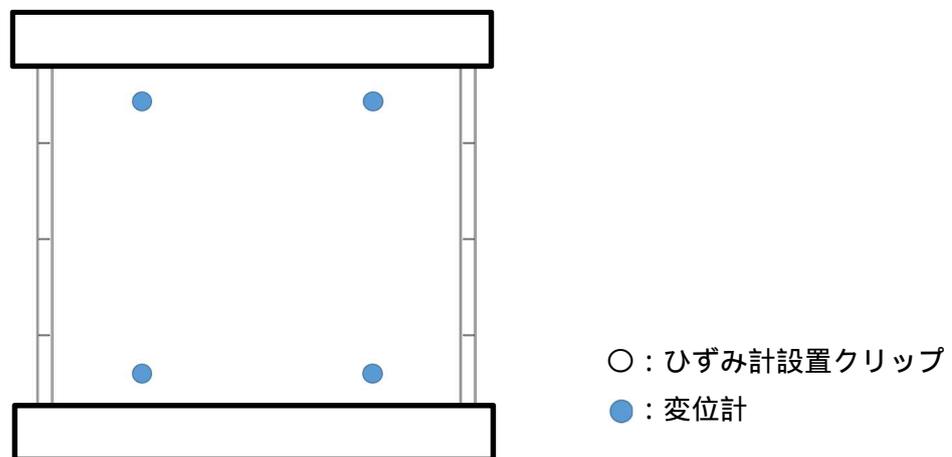


図4-6 計測器取付け位置図（立面図）

表4-5 計測機器等仕様（又は相当品）

No.	機器名	員数	メーカー	型番
1	電動ポンプユニット			
2	複動型油圧ジャッキ			
3	薄型圧縮型ロードセル			
4	レーザ変位計			
5	動ひずみ測定器			
6	ユニバーサルレコーダ			
7	コンディショナカード			
8	ノートパソコン			

注：ケーブル等の付属品は省略

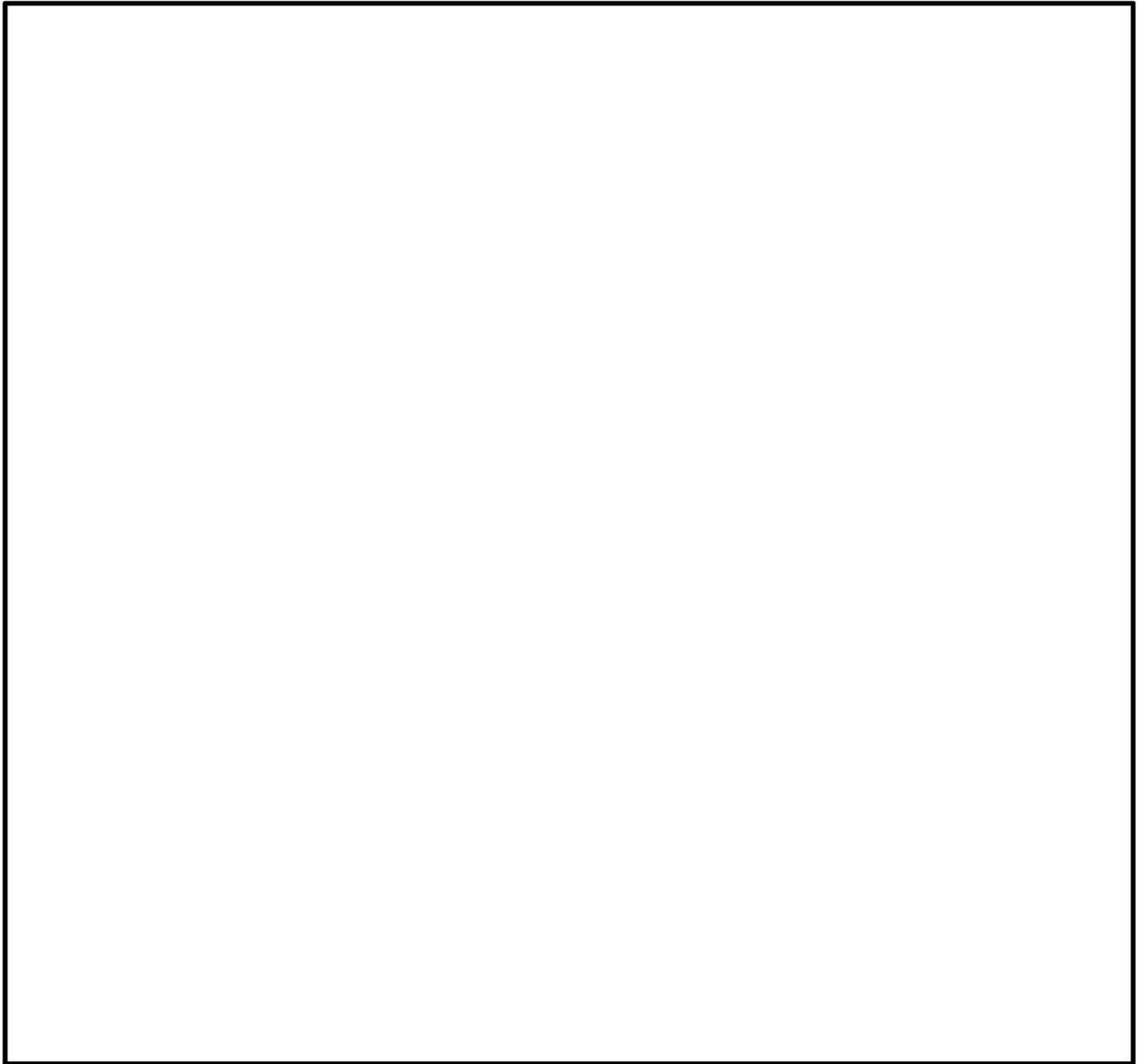


図 4-7 計測システム構成

(3) 確認項目

開放試験における確認項目を以下に示すとともに、オペフロBOPの開放時の荷重と変位及び他の抗力との関係を求める。

開放試験にて得られる記録値とこの関係から、オペフロBOPの耐震性能を確認する。

- ・ ジャッキ荷重 - 変位関係 (グラフ)
- ・ オペフロBOPの開放荷重
- ・ クリップの脱落時荷重
- ・ シール材の抗力と下部の摩擦

(4) 判定基準

【作動確認】

オペフロBOPが設計差圧 (3.43 kPa以下) の圧力にて開放すること

【閉維持確認】

オペフロBOPの開放時の荷重が S d 荷重相当値 (約19.2 kN) 以上であること

5. MS トンネル室 BOP

5.1 試験場所

【作動確認】

場 所：株式会社 ブイテックス 東海工場

【閉維持確認】

場 所：清水建設株式会社 技術研究所 先端地震防災研究棟

5.2 試験項目

- (1) 作動確認 : MS トンネル室 BOP の開機能確認
- (2) 閉維持確認 : MS トンネル室 BOP の耐震性能の確認

MSトンネル室BOP及びその取付け枠を設置した実機大のモックアップ試験体を製作し，設計作動圧の9.81kPa以下で確実に開放されることを確認するため，圧縮空気による破裂試験を実施する。

さらに，加振試験により，MS トンネル室 BOP の耐震性能を確認する。

本試験での確認事項を以下に示す。

【作動確認】

MSトンネル室BOPの破裂圧力の確認

【閉維持確認】

MSトンネル室BOPが弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s 相当荷重で開放しないことの確認

6. MSトンネル室BOP作動確認試験概要

6.1 試験装置概要

試験装置は、実機を模擬したMSトンネル室BOP(ラプチャーパネル及びラプチャーパネル取付け部)と温度調整用のヒーターを取り付けた破裂試験装置で構成する。図6-1に試験で使用するMSトンネル室BOP及び破裂試験装置の概略図を示す。

MSトンネル室BOPのサイズは780 mm×780 mm、比重は約 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。

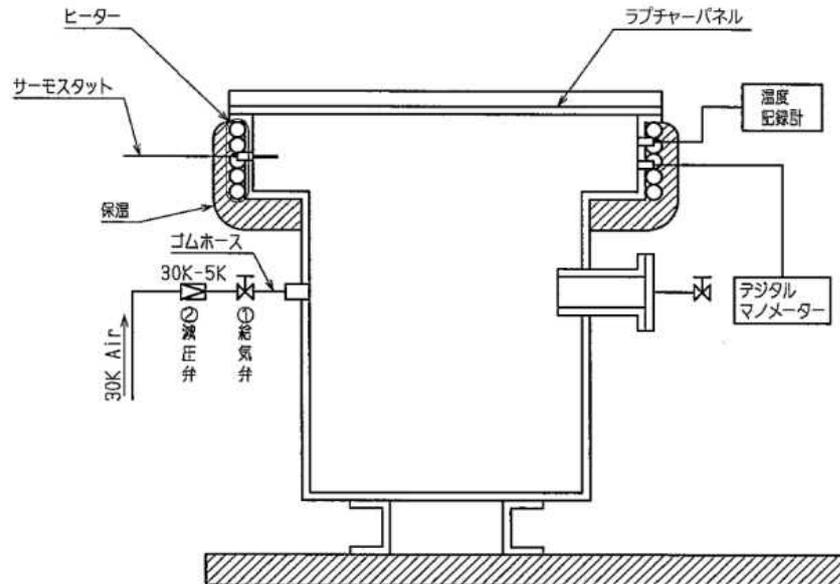


図 6-1 MS トンネル室 BOP 及び破裂試験装置の概略断面図

6.2 MS トンネル室 BOP 試験方法

(1) 試験手順

MSトンネル室BOPを破裂試験装置に組み込み、破裂試験装置の上部をヒーターで加熱し、温度を調整する。

所定温度に到達してから20分以上保持後、給気弁を開き、圧縮空気を装置内へ送り、破裂時の圧力を確認する。

(2) 確認項目

MS トンネル室 BOP 破裂時の圧力。

(3) 判定基準

MS トンネル室 BOP が設計差圧 (9.81 kPa 以下) の圧力にて開放すること。

7. MSトンネル室BOP閉維持確認試験概要

7.1 試験場所概要

閉維持確認試験は、加振試験用枠体に固定したMSトンネル室BOPを振動台上に設置し実施する。図7-1に試験場の配置図を示す。

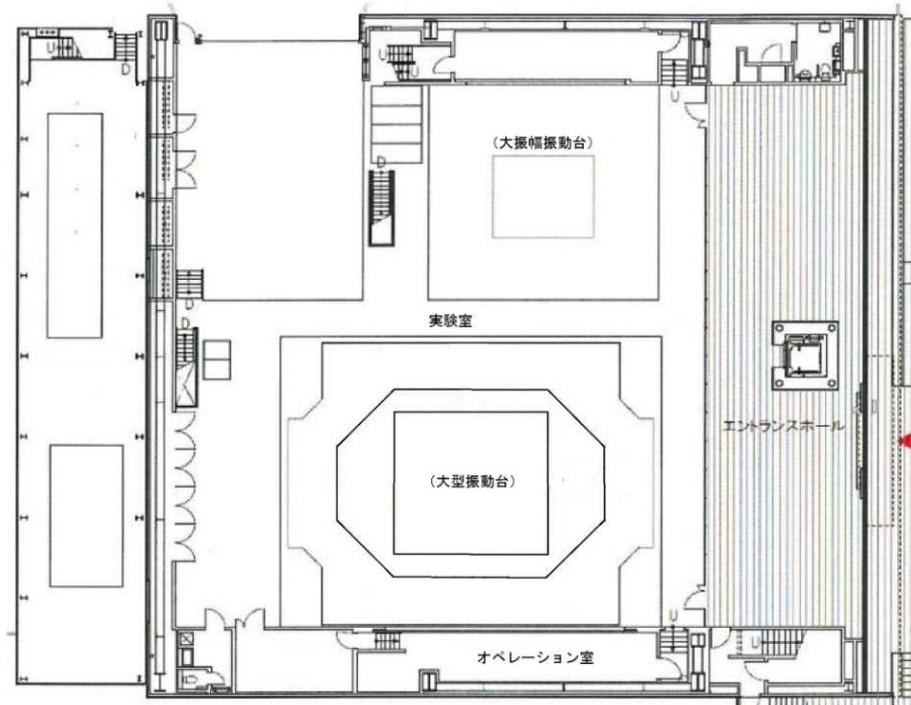


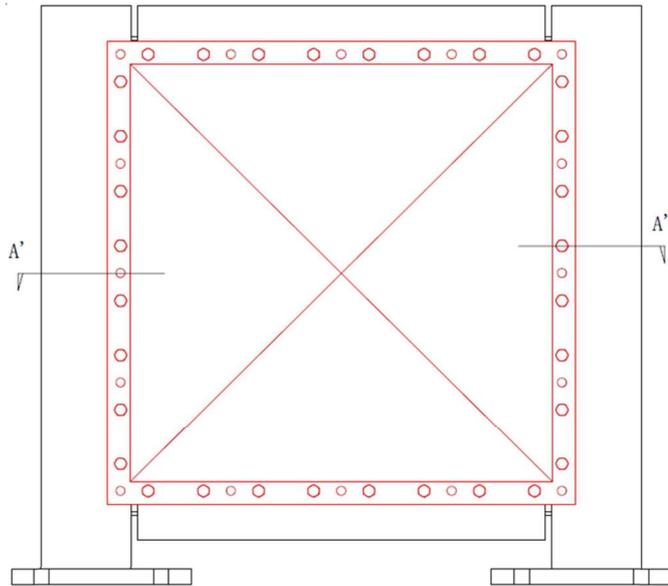
図7-1 試験場配置図（平面図）

7.2 試験装置概要

図7-2に試験で使用するMSトンネル室BOP及び加振試験用枠体の概略図を示す。

MSトンネル室BOPのサイズは780 mm×780 mm，比重は約 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。加振試験用枠体はH形鋼により構成されており，加振試験用枠体を振動台に固定し，ボルトによってMSトンネル室BOPを加振試験用枠体に固定する。

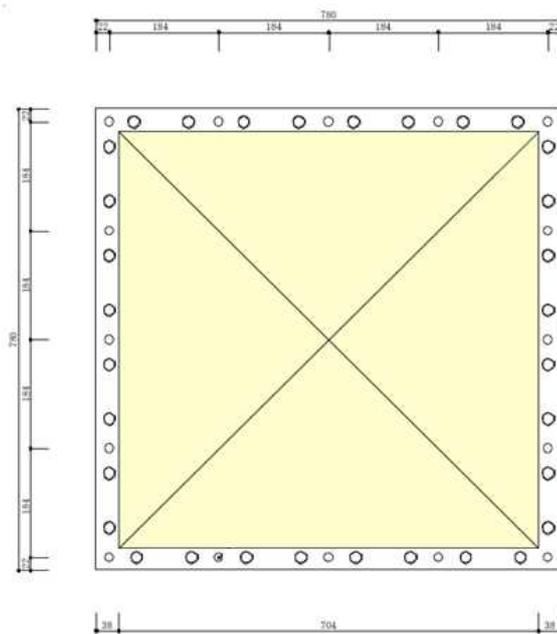
なお，試験体のMSトンネル室BOPは3体製作し，それぞれに対し同一の試験を実施する。



加振試験用枠体
(MS トンネル室 BOP 取付け時)



加振試験用枠体
(A-A 断面図)



MS トンネル室 BOP (立面図)

図 7-2 MS トンネル室 BOP 及び加振試験用枠体の概略図

(1) 試験機器構成

本試験に使用する試験体の仕様を表7-1に示す。

表 7-1 試験体仕様表

製 造	清水建設株式会社
型 式	既存パネル模擬
比 重	約 2.7×10^3 kg/m ³ (アルミ)
数 量	3 枚
サイズ	幅 780 mm × 高さ 780 mm

(2) 試験台の仕様

本試験に使用する振動台の仕様を表 7-2 に示す。

表 7-2 振動台仕様

項 目	仕 様
振動台寸法	7m (X 方向) × 7m (Y 方向)
加振方向	3 軸
最大搭載重量	70t
最大加速度 (10 t 積載時)	水平 : 3.7G, 鉛直 : 2.4G

7.3 試験ケース

MSトンネル室BOPの加振試験による耐震性能確認を行う。試験ケースを表7-3に示す。

表 7-3 試験ケース

加振波	加振方向	備考
模擬地震波	XYZ方向	S d 地震相当
模擬地震波	XYZ方向	S s 地震相当

7.4 加振波

(1) MSトンネル室BOPの基準地震動 S s 加振波

加振試験用の模擬地震波は以下のとおりとする。V-2「耐震性に関する説明書」のうち-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき複数の基準地震動 S s の床応答スペクトル (T.M.S.L.23.50/18.10/12.30m) を包絡する模擬地震波の時刻歴波形, 床応答スペクトルを図 7-3, 図 7-4 に示す。

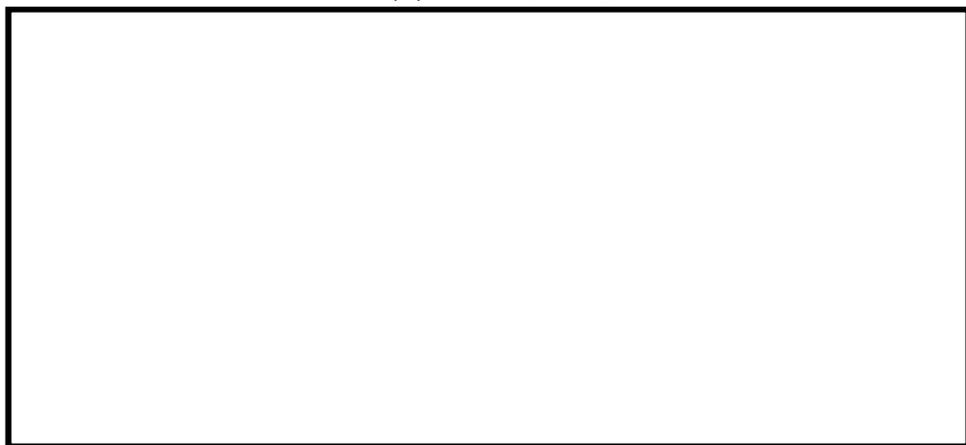
- ・ MS トンネル室 BOP の設置高さを含む上下の原子炉建屋 T.M. S.L.
- ・ 基準地震動 S s 8 波及び建屋影響評価を考慮するばらつきケースを包絡
- ・ 加振目標の包絡スペクトルは減衰定数 % で設定



(1) 水平 (N S) 方向



(2) 水平 (E W) 方向

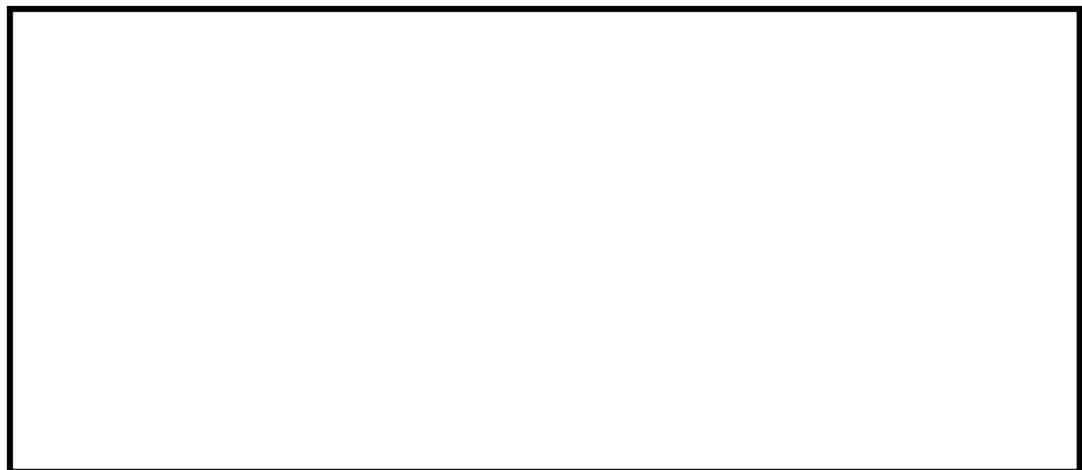


(3) 鉛直方向

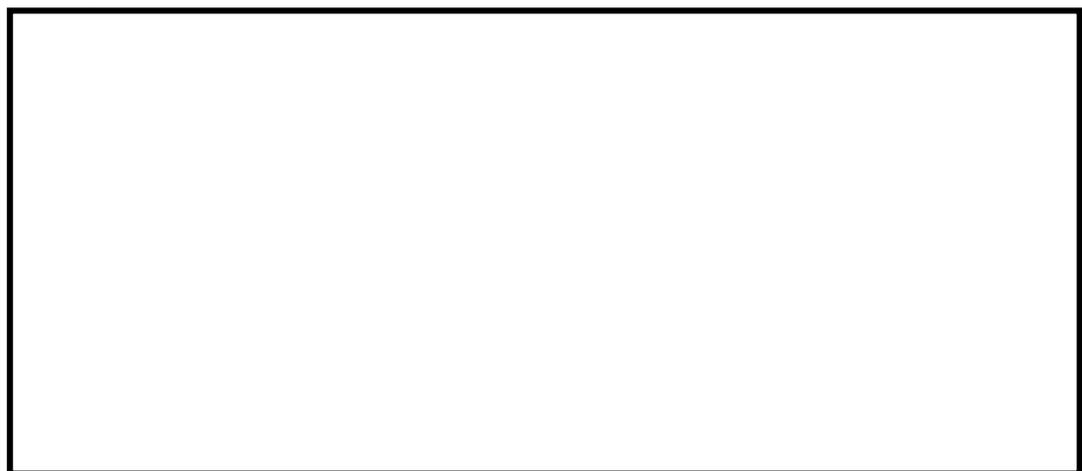
図 7-3 模擬地震波の時刻歴波形



(1) 水平 (N S) 方向



(2) 水平 (E W) 方向



(3) 鉛直方向

図 7-4 模擬地震波の応答スペクトル (減衰定数 %)

7.5 MSトンネル室BOPの加振方法

MSトンネル室BOP試験体を、弾性設計用地震動 S d 相当及び基準地震動 S s 相当の加振波によって加振し、MSトンネル室BOPが開放しないことを確認する。

(1) 試験概要

加振試験用枠体に固定した MS トンネル室 BOP を振動台に設置し、表 7-3 に示す加振波で加振し、試験後、MS トンネル室 BOP スリット部の亀裂の有無を目視により確認する。

7.6 計測機器

計測機器の取付け位置を図 7-5 に示す。

a. 加速度計

メーカー名称：, 型番名称：

設置場所：加振試験用枠体脚部

メーカー名称：, 型番名称：

設置場所：MS トンネル室 BOP 中央部

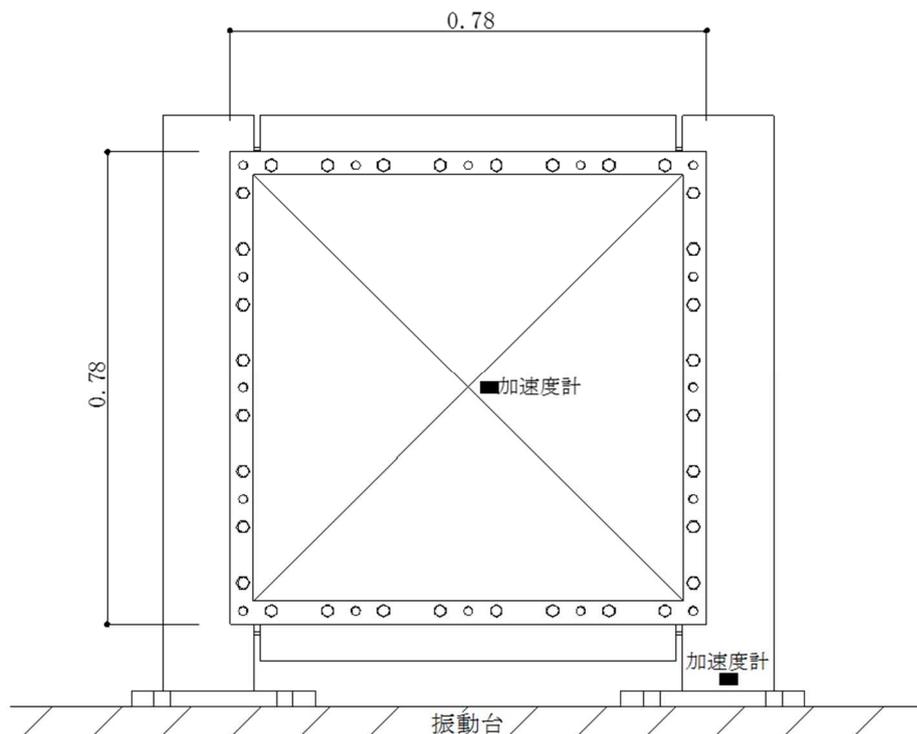


図7-5 計測機器取付け位置図（立面図）

(1) 測定内容

加速度，亀裂の有無

(2) 測定方法

図7-3に示す位置に加速度計を取付け，加振時の加速度を時刻歴で測定し，サンプリング時間は，秒程度とする。

試験時の状況を動画撮影する。

(3) 確認項目

本試験における確認項目を以下に示す。

- ・各加振波におけるMSトンネル室BOPの加速度
- ・MSトンネル室BOPの開放の有無

(4) 判定基準

本試験における判定基準を以下に示す。

- ・MSトンネル室BOPの開放荷重（5.89 kN/m²）以下であること。
- ・亀裂が生じていないこと。

ブローアウトパネル機能確認試験結果について

試験要領書に従って実施した試験結果は以下のとおり。

1. 燃料取替床ブローアウトパネル固有値確認結果

ハンマーによる打撃及び常時微動による燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロBOP」という。）中央の加速度波形から高速フーリエ変換により算定したフーリエスペクトルを図1-1に示す。□ Hz近傍に大きなピークがあり，オペフロBOPの1次振動数である。

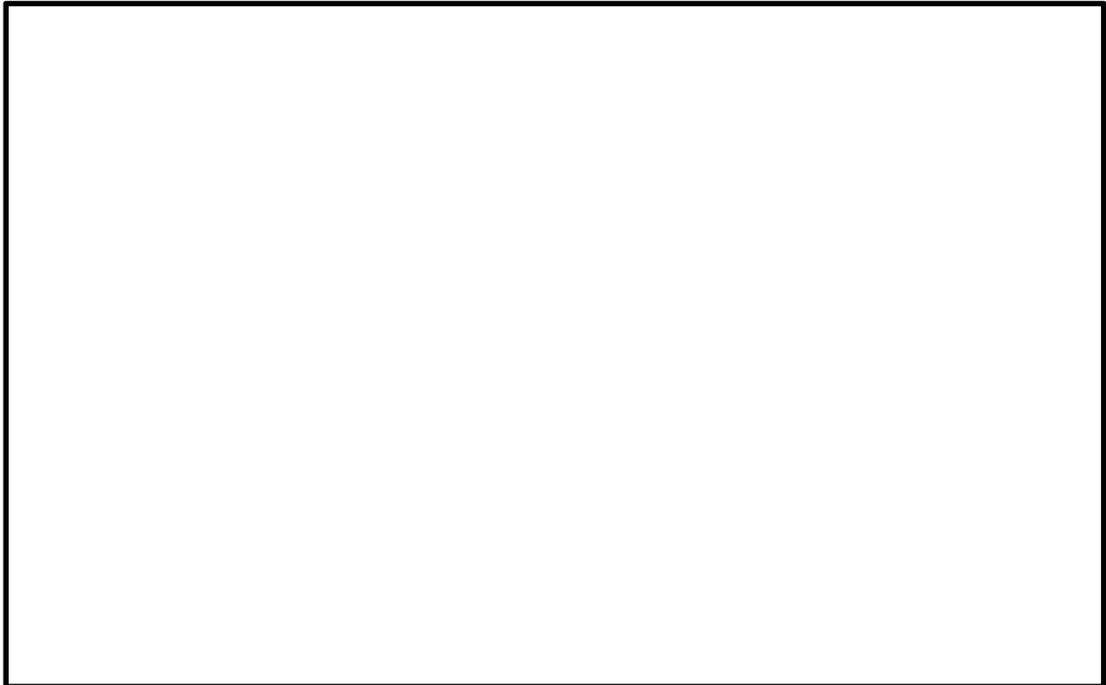


図1-1 オペフロBOPの固有振動数測定結果

2. オペフロBOP作動確認結果

(1) 開放機能確認結果

設計条件としたクリップ数18個(幅約37.5mmを2個,幅約75mmを16個)の実機大モックアップ試験体に対して,4体の油圧ジャッキによる開放試験を実施し,オペフロBOPが設計条件(差圧3.43 kPa以下)の荷重にて開放することを確認した(試験体1)。同条件にて再試験を実施し再現性を確認した(試験体2,3)。試験結果を表2-1に,各油圧ジャッキの反力(オペフロBOPの抗力)を図2-1から図2-6に示す。

表2-1 オペフロBOPの開放荷重試験結果

項目	試験日	測定値 (kN)	許容値(kN) (3.43 kPa相当値)	判定	備考 相当する差圧値 (kPa)
試験体1	2019/7/2		52.2		
試験体2	2019/7/4				
試験体3	2019/7/5				

試験体1

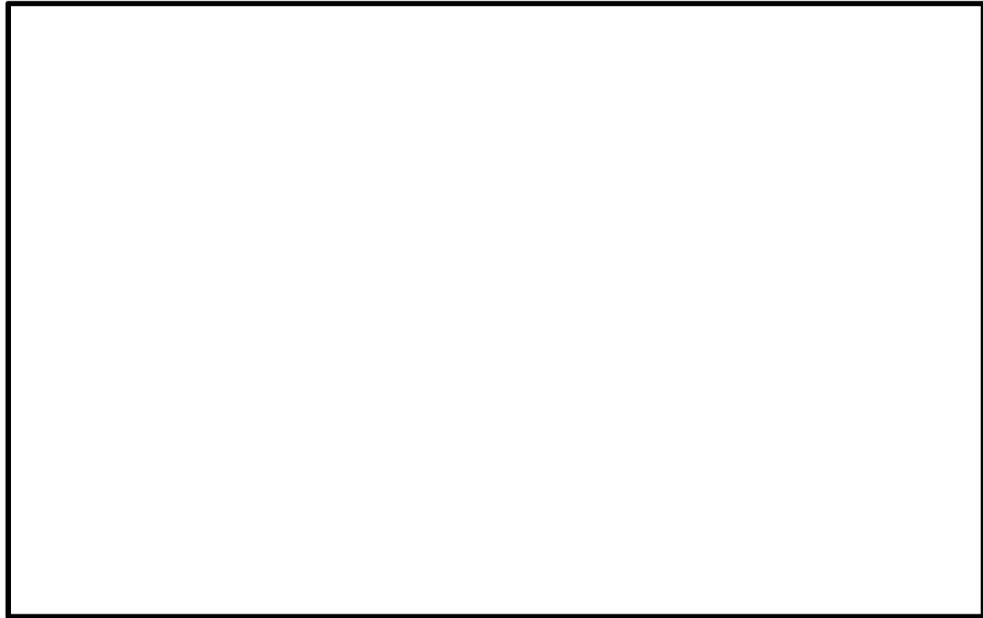


図 2-1 油圧ジャッキの荷重合計と変位図

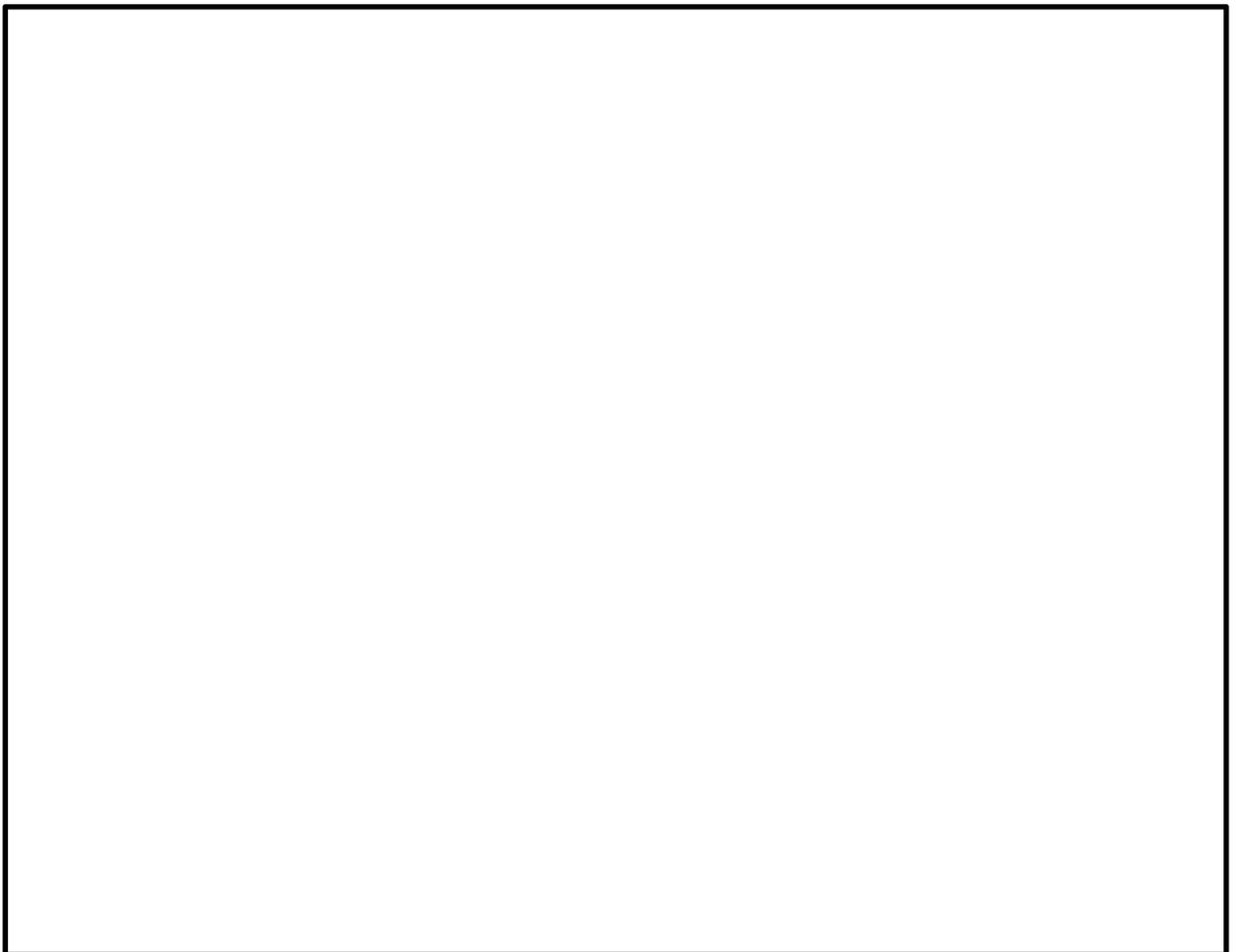


図 2-2 各油圧ジャッキの荷重と変位測定結果（試験体 1）

試験体 2



図 2-3 油圧ジャッキの荷重合計と変位図

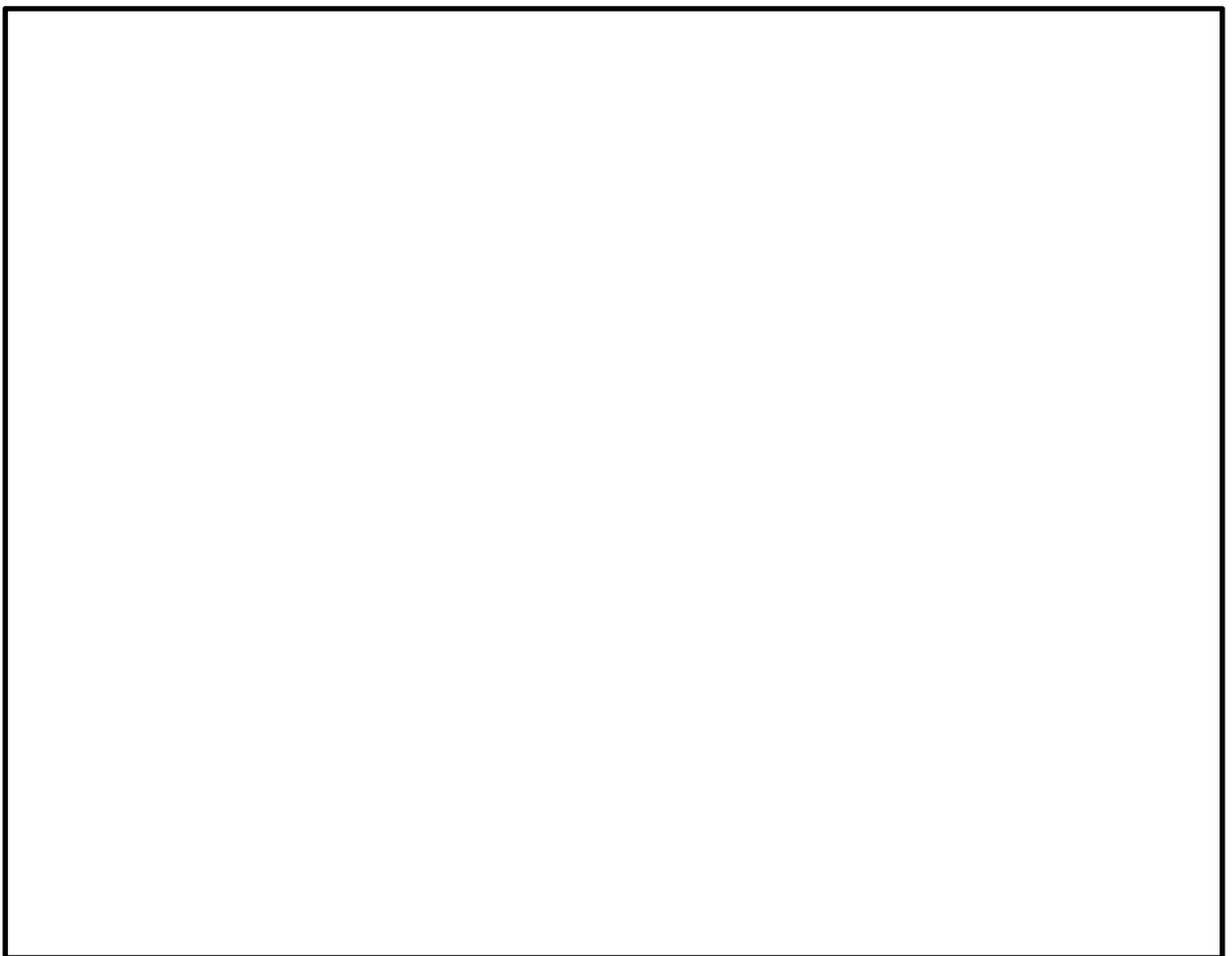


図 2-4 各油圧ジャッキの荷重と変位測定結果（試験体 2）

試験体 3

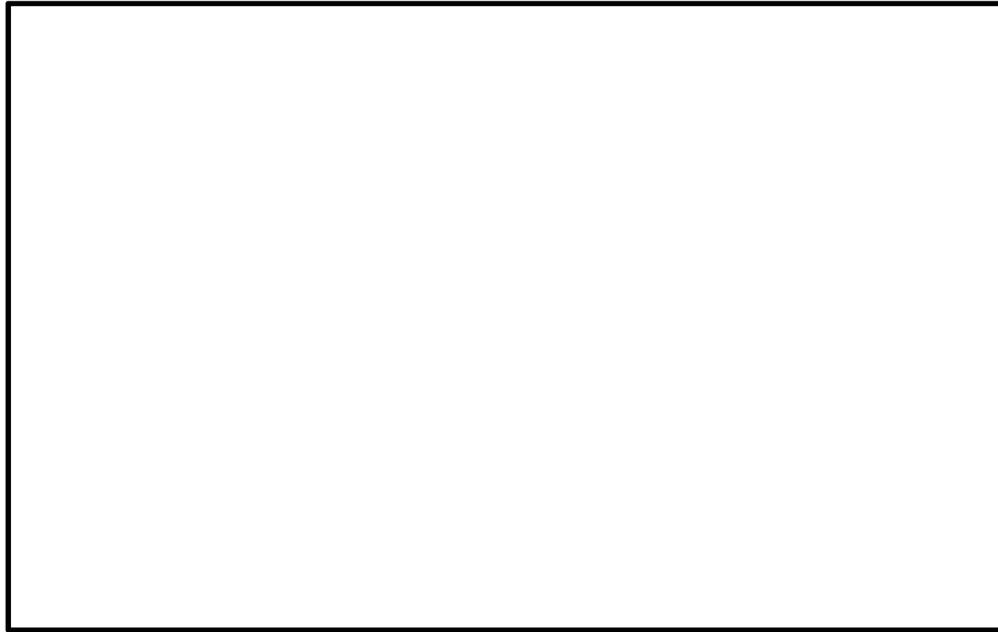


図 2-5 油圧ジャッキの荷重合計と変位図

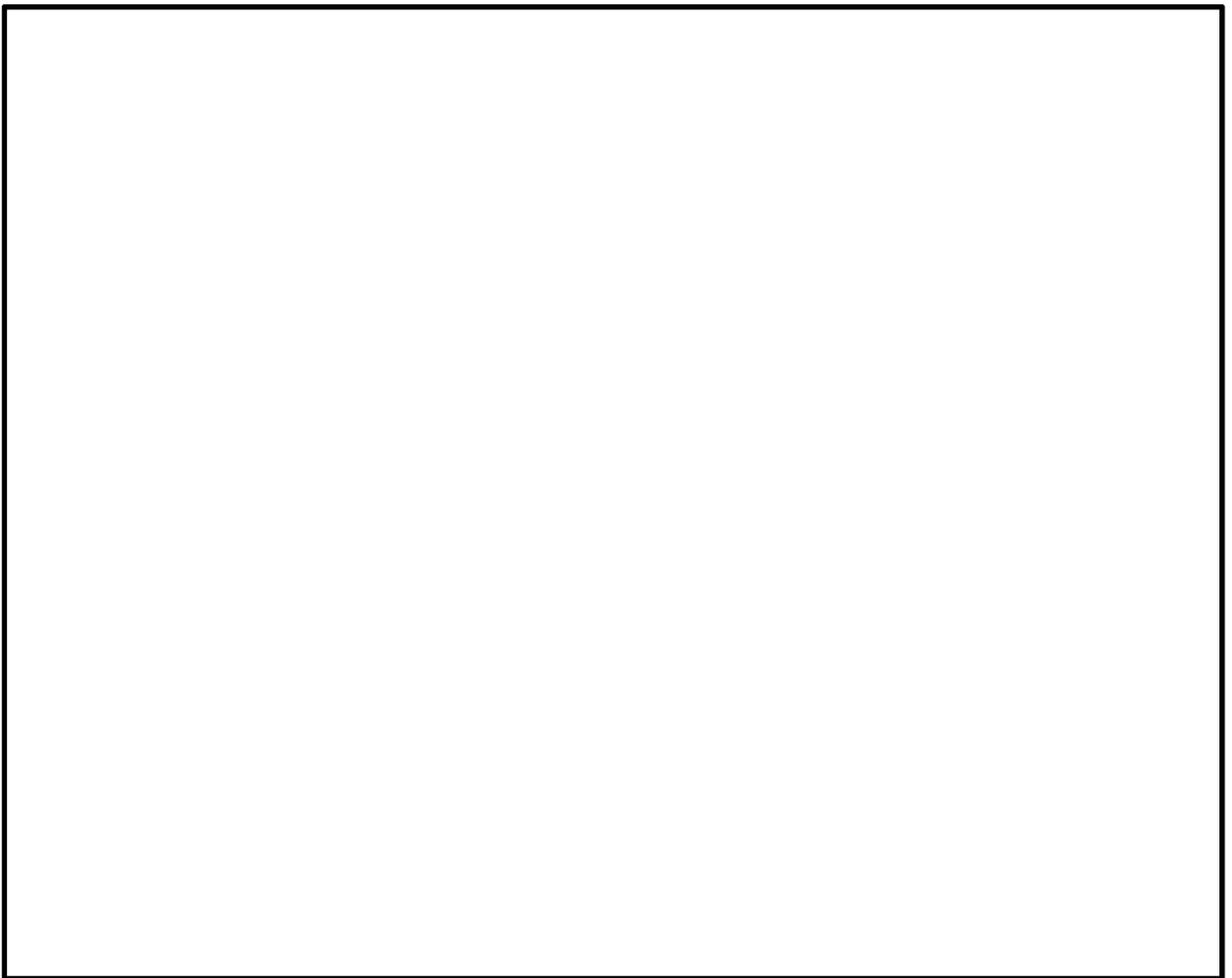


図 2-6 各油圧ジャッキの荷重と変位測定結果（試験体 3）

(2) 閉維持確認結果

(1)開放機能確認結果より、オペフロBOPの開放荷重はS d 荷重相当値(約19.2 kN)以上であることを確認した。評価結果を表2-2に示す。

S d相当荷重値約19.2 kNの根拠は、以下のとおり。

オペフロBOP重量 : 1500 kg

オペフロBOP設置場所 (T.M.S.L.49.7 m) 応答水平震度 : 1.30*

注記* : オペフロBOPの固有振動数 (Hz) を考慮した震度

S d相当荷重値 : $1500 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 1.30 = 19110 \text{ N}$

表2-2 オペフロBOPの耐震性能確認結果

項目	試験日	測定値 (kN)	判定値(kN) (S d 荷重相当)	判定
試験体1	2019/7/2	<input type="text"/>	19.2	
試験体2	2019/7/4			
試験体3	2019/7/5			

3. 実機大モックアップ試験の開放挙動に関する考察

実機大モックアップ試験では、ジャッキ荷重は3回のピーク荷重を形成した。最初のピークは上部クリップの開放、2回目のピークはシール材の破断、最後のピークは下部クリップの開放によるものである。

シール材は使用環境により経年劣化するものであることから、接着力及びパネル開放時のシール材の負担荷重は変化することが考えられるが、開放荷重へのシール材の影響は小さいため、設計差圧以下で開放することには影響を与えないものと想定される。

また、上部クリップの負担荷重に比べ、下部クリップの負担荷重と下部の摩擦荷重が大きいいため、上部クリップと下部クリップの開放に差が生じているが、取付け枠からパネル本体が完全に脱落することを確認している。

4. MSトンネル室BOP作動確認結果

(1) 開放機能確認結果

試験装置に設置したMSトンネル室BOPに対して、加圧による破裂試験を実施し、MSトンネル室BOPが設計差圧(9.81 kPa以下)の圧力にて開放することを確認した。試験結果を表4-1に示す。

表4-1 MSトンネル室BOPの破裂試験結果

項目	試験日	測定値 (kPa)	許容値 (kPa)	判定
試験体1	2019/3/27	7.74	9.81	
試験体2		7.85		
試験体3		7.53		

(2) 閉維持確認結果

-2-9-3-1-2「主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」による S d 荷重の算定値は0.00508kN/m²，加振試験による S d 荷重の測定値は [] ~ [] kN/m²であり，MSトンネル室BOPの開放荷重（5.89 kN/m²）以下であることを確認した。

また，S s 荷重の算定値は0.0108kN/m²，加振試験による S s 荷重の測定値は [] kN/m² ~ [] kN/m²であり，MSトンネル室BOPの開放荷重（5.89 kN/m²）以下であることを確認した。

評価結果を表4-2及び表4-3に示す。

ここで，S d 地震相当及びS s 地震相当の模擬地震波による加振試験において，試験体脚部に設置した加速度計による計測結果が目標値（S d 包絡条件，S s 包絡条件）を上回ることを確認した。表4-4及び表4-5に最大加速度値，図4-1及び図4-2に加速度応答スペクトルの計測結果を示す。目標応答を計測結果が一部下回っているが，ランダム波加振により，ラプチャーパネル中央に設置した加速度計で計測した1次固有振動数は試験体1で []，試験体2で []，試験体3で [] であることから固有振動数帯での計測結果は，目標応答を上回っていることを確認した。

表4-2 MSトンネル室BOPの耐震性能確認結果（S d）

項目	試験日	算定値(kN/m ²) (S d 荷重相当)	測定値 (kN/m ²)	判定値(kN/m ²) (設計開放荷重)	判定
試験体1	2019/5/23	0.00508	[]	5.89	
試験体2	2019/5/24				
試験体3	2019/5/27				

表4-3 MSトンネル室BOPの耐震性能確認結果（S s）

項目	試験日	算定値(kN/m ²) (S s 荷重相当)	測定値 (kN/m ²)	判定値(kN/m ²) (設計開放荷重)	判定
試験体1	2019/5/23	0.0108	[]	5.89	
試験体2	2019/5/24				
試験体3	2019/5/27				

表 4-4 MS トンネル室 BOP の加振試験結果 (試験体脚部加速度, S d 地震相当)

(a) 試験体 1

方向	S d 包絡条件 (m/s ²)	計測結果 (m/s ²)	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(b) 試験体 2

方向	S d 包絡条件 (m/s ²)	計測結果 (m/s ²)	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(c) 試験体 3

方向	S d 包絡条件 (m/s ²)	計測結果 (m/s ²)	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

表 4-5 MS トンネル室 BOP の加振試験結果 (試験体脚部加速度, S s 地震相当)

(a) 試験体 1

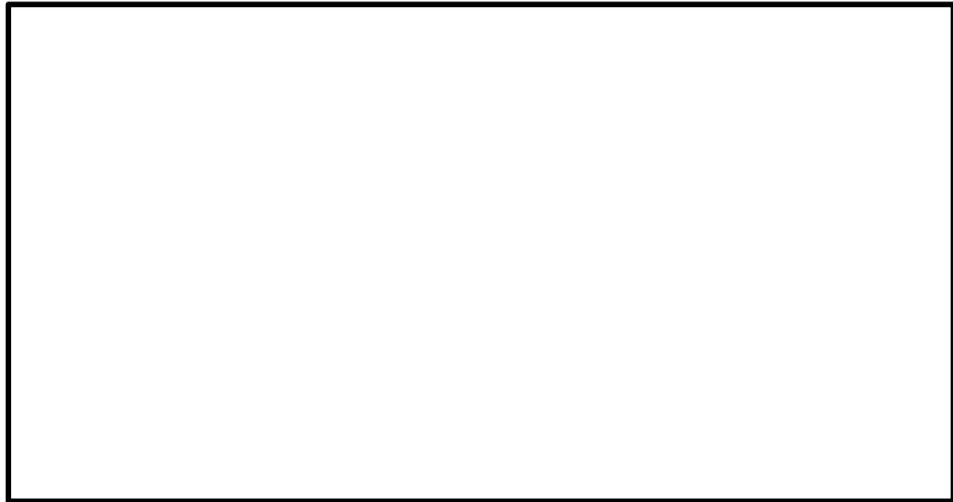
方向	S s 包絡条件 (m/s ²)	計測結果 (m/s ²)	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(b) 試験体 2

方向	S s 包絡条件 (m/s ²)	計測結果 (m/s ²)	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(c) 試験体 3

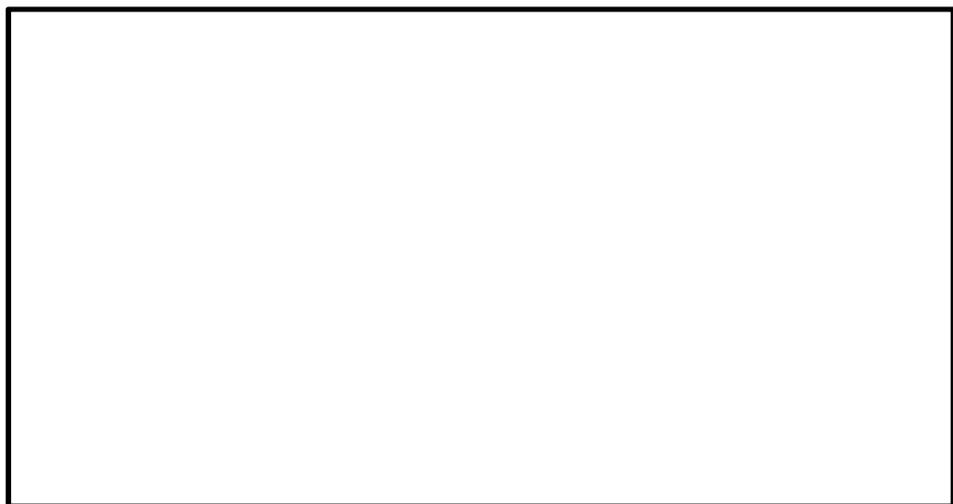
方向	S s 包絡条件 (m/s ²)	計測結果 (m/s ²)	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○



(a) 面外方向



(b) 面内方向

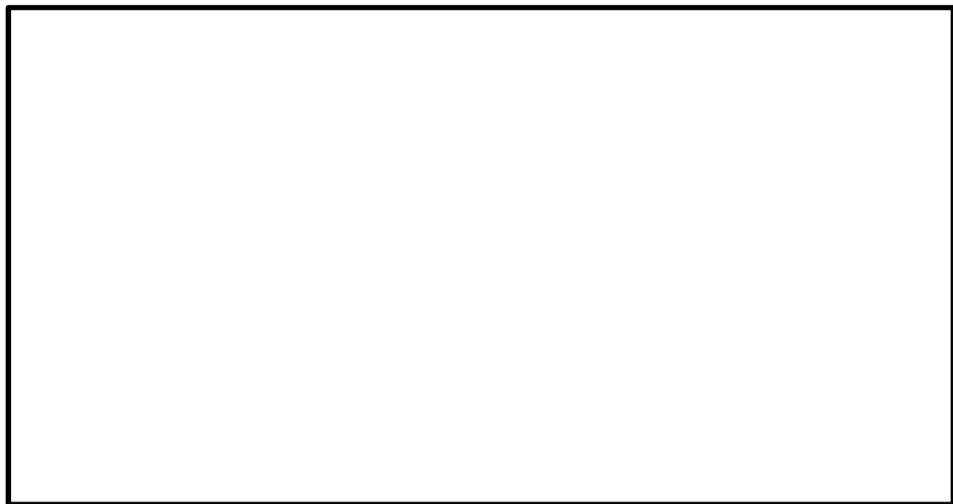


(c) 上下方向

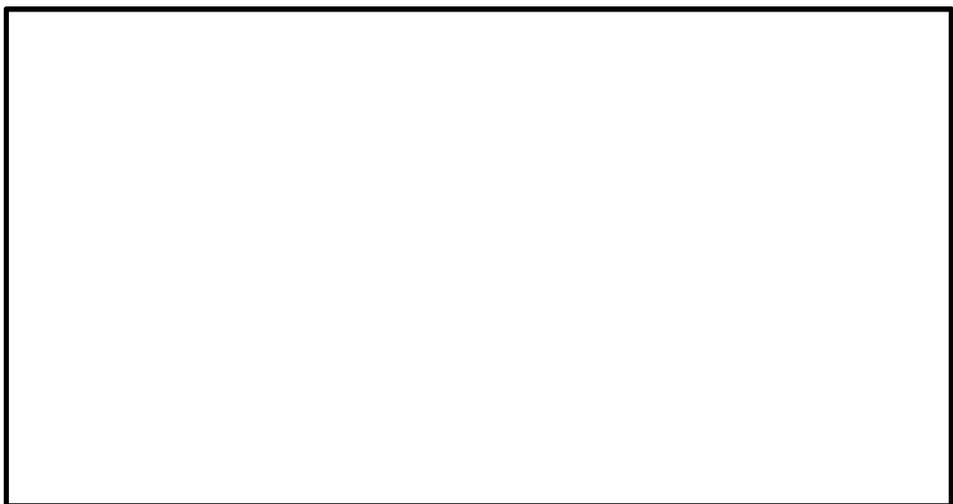
図 4-1(1) MS トンネル室 BOP の加振試験結果
(試験体脚部加速度応答スペクトル, S d 地震相当, 試験体 1, 減衰定数)



(a) 面外方向

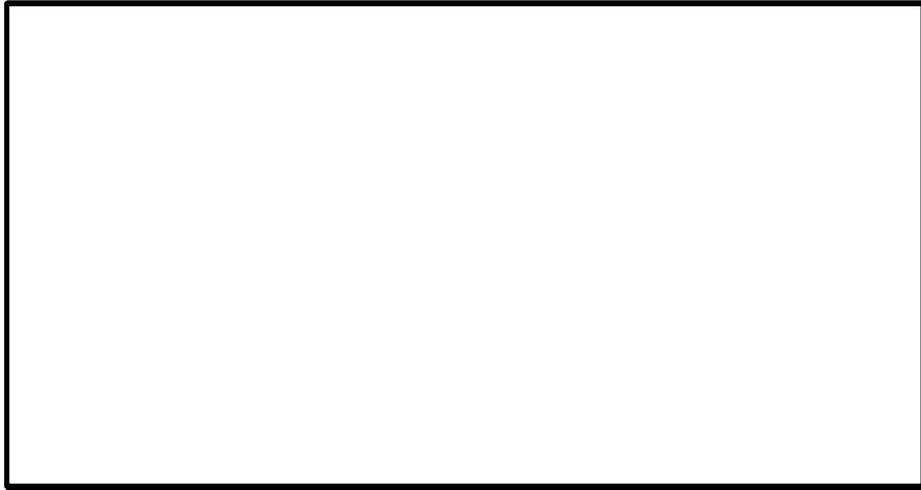


(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-1(2) MS トンネル室 BOP の加振試験結果
(試験体脚部加速度応答スペクトル, S d 地震相当, 試験体 2, 減衰定数)



(a) 面外方向

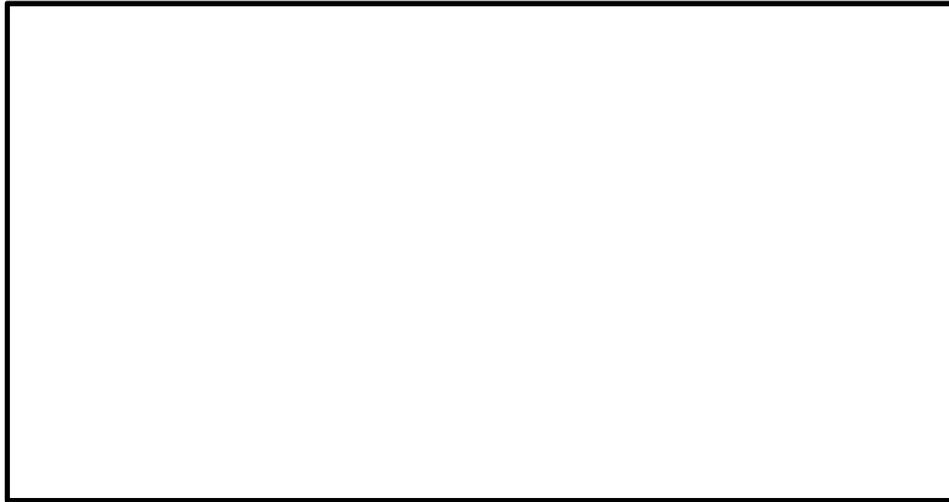


(b) 面内方向



(c) 上下方向

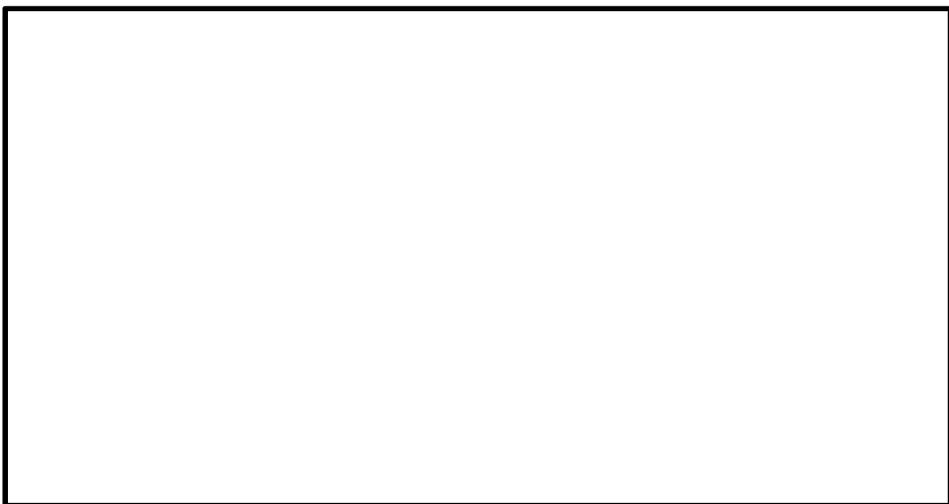
図 4-1(3) MS トンネル室 BOP の加振試験結果
(試験体脚部加速度応答スペクトル, S d 地震相当, 試験体 3, 減衰定数)



(a) 面外方向

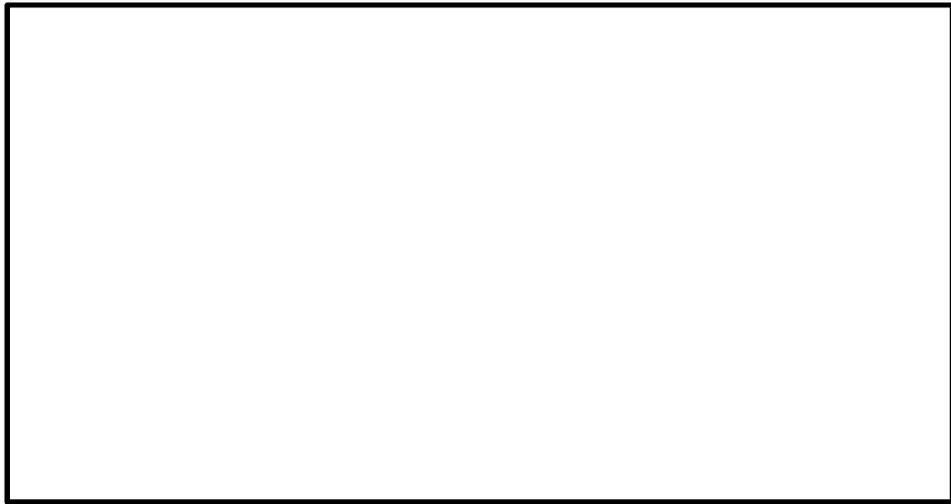


(b) 面内方向



(c) 上下方向

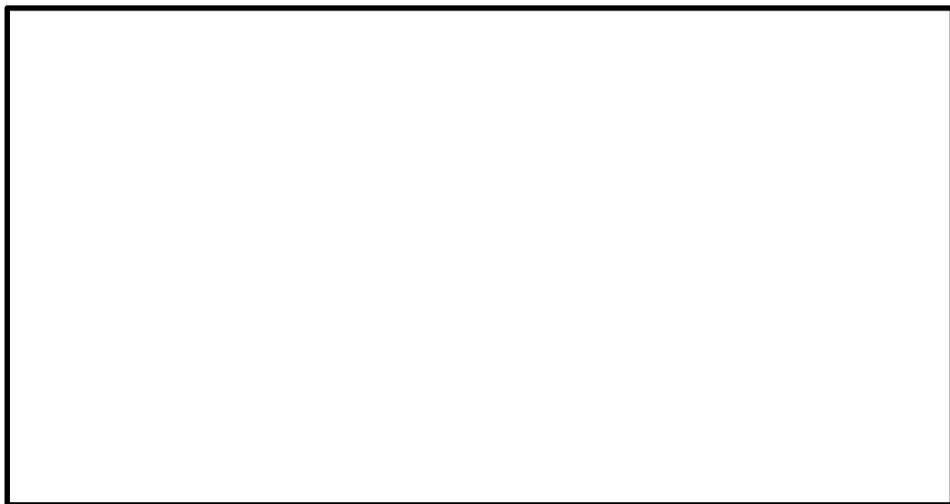
図 4-2(1) MS トンネル室 BOP の加振試験結果
(試験体脚部加速度応答スペクトル, S s 地震相当, 試験体 1, 減衰定数)



(a) 面外方向



(b) 面内方向

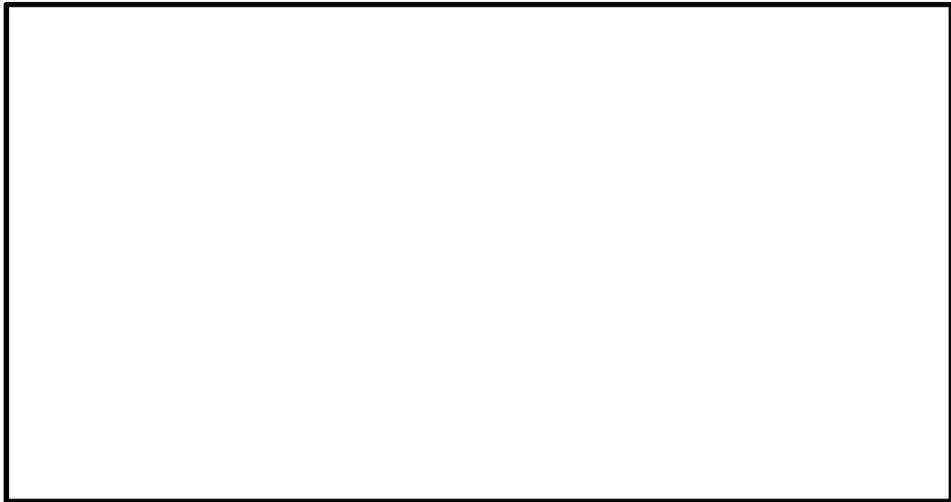


(c) 上下方向

図 4-2(2) MS トンネル室 BOP の加振試験結果
(試験体脚部加速度応答スペクトル, S s 地震相当, 試験体 2, 減衰定数)



(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-2(3) MS トンネル室 BOP の加振試験結果
(試験体脚部加速度応答スペクトル, S s 地震相当, 試験体 3, 減衰定数)

燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験要領について

1. 目的

燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置（以下「オペフロ BOP 閉止装置」という。）に要求される機能を確認するため、実機規模の試験体を用いた加振試験を行い、重大事故等時における閉止装置の機能維持確認を実施する。

2. 試験場所

(1) オペフロ BOP 閉止装置

場 所：国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター

3. 試験項目

3.1 オペフロ BOP 閉止装置に要求される機能について

オペフロ BOP 閉止装置は、燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）が開放状態で炉心損傷が発生した場合に、運転員等の中央制御室での居住性確保のため、オペフロ BOP の開放部を速やかに閉止し、原子炉建屋の気密性を維持することが求められる。具体的には下記の機能が求められる。

- ・ 地震後においても、容易かつ確実に閉止でき、また現場において人力により操作できる作動性を確保し、原子炉建屋原子炉区域を負圧に維持できる気密性を確保していること。
- ・ 開放したオペフロ BOP を復旧するまでの期間においてオペフロ BOP 閉止装置を使用するため、重大事故後、一定期間内に想定される地震が発生した場合においても、原子炉建屋原子炉区域を負圧に維持できる気密性を確保していること。

3.2 加振条件

(1) 基準適合性を確認するための加振（基準地震動 S_s 加振波による加振）

オペフロ BOP 閉止装置の設置位置（最も高所の設置位置）における基準地震動 S_s^* に対する設計用震度を上回るように設定された加振波を用いて加振を行う。

注記 *：閉止状態のオペフロ BOP 閉止装置は、オペフロ BOP と同等の弾性設計用地震動 S_d による荷重が作用した場合の気密性確保が求められるが、耐震裕度を確認するため、基準地震動 S_s 加振波を用いて加振を行う。

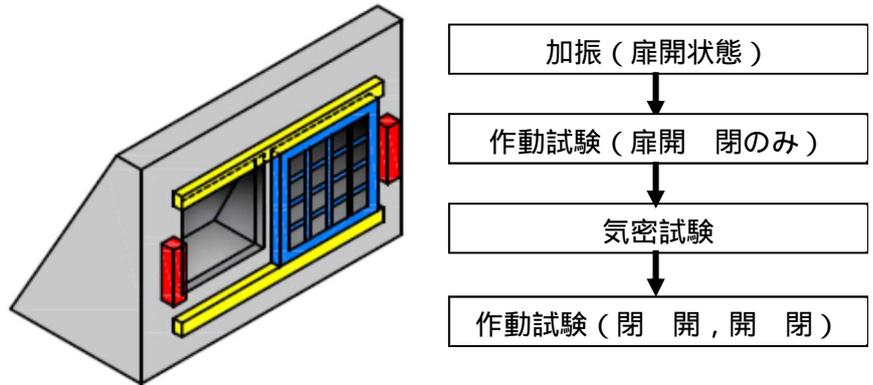
3.3 試験項目

基準地震動 S_s 加振波及び振動台性能限界加振波による加振を行い、オペフロ BOP 閉止装置に要求される機能が確保されていることを確認する。

- ・加振後の作動確認 : オペフロ BOP 閉止装置が開放状態又は閉止状態において、加振後の扉本体の作動性が確保されていることを確認する。また、扉本体の作動確認に合わせて、門の作動性が確保されていることを確認する。
- ・加振後の気密性能試験 : オペフロ BOP 閉止装置が開放状態又は閉止状態において、加振後の気密性を確保していることを確認する。

図 3-1 にオペフロ BOP 閉止装置試験治具概念図を示す。

【扉開放状態】



【扉閉止状態】

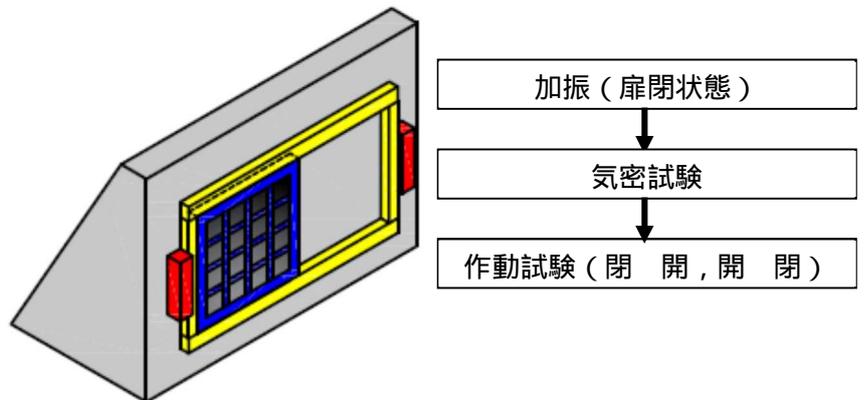


図 3-1 オペフロ BOP 閉止装置試験治具概念図

4. 加振試験

4.1 加振装置（三次元振動台）の概要

(1) 兵庫耐震工学研究センター

振動台の上に試験体を設置し，水平方向と鉛直方向を同時に加振する。表 4-1 に振動台の仕様，図 4-1 に三次元振動台の概要図，図 4-2 に試験体の鳥瞰図を示す。

表 4-1 三次元振動台の仕様

加振自由度	3軸6自由度		
振動台寸法	20 m × 15 m		
最大積載重量	1200 tf		
加振方向	X方向	Y方向	Z方向
最大加速度	900 cm/s ²	900 cm/s ²	1500 cm/s ²
最大速度	200 cm/s	200 cm/s	70 cm/s
最大変位	± 100 cm	± 100 cm	± 50 cm

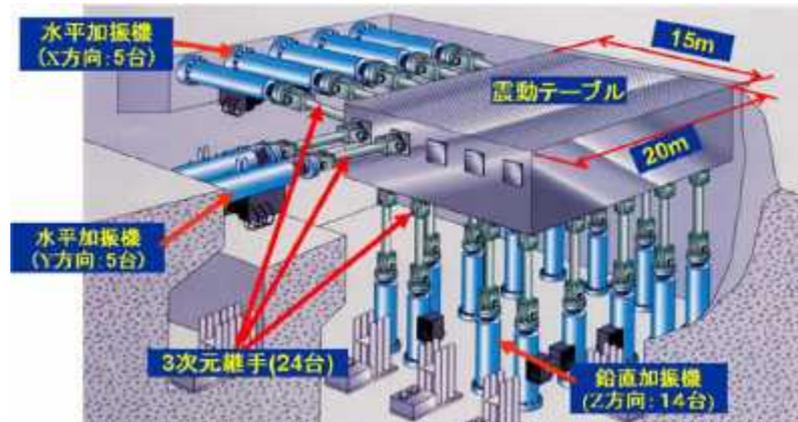


図 4-1 三次元振動台の概要図

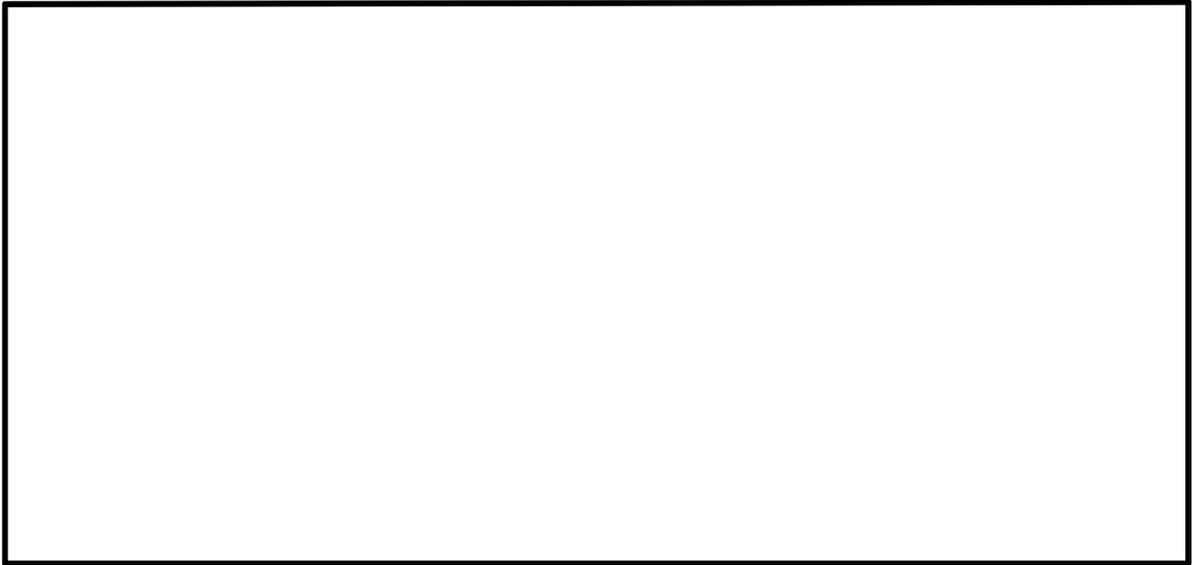


図 4-2 試験体の鳥瞰図

4.2 加振波

(1) オペフロ BOP 閉止装置の基準地震動 S s 加振波

加振試験用の模擬地震波は以下のとおりとする。V-2「耐震性に関する説明書」のうち 2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき複数の基準地震動 S s の床応答スペクトル (T.M.S.L.49.70m) を包絡する模擬地震波の時刻歴波形, 床応答スペクトルを図 4-3, 図 4-4 に示す。

- ・ オペフロ BOP 閉止装置の設置高さより上方の原子炉建屋 T.M.S.L. m
- ・ 基準地震動 S s 8 波及び建屋影響評価で考慮するばらつきケースを包絡
- ・ 加振目標の包絡スペクトルは減衰定数 % で設定



(1) 水平 (NS) 方向



(2) 水平 (E W) 方向



(3) 鉛直方向

図 4-3 模擬地震波の時刻歴波形



(1) 水平 (N S) 方向



(2) 水平 (E W) 方向



(3) 鉛直方向

図 4-4 入力波の応答スペクトル (減衰定数 %)

注記 * : 振動台の性能を考慮し, オペフロ BOP 閉止装置の固有周期近傍の加速度に影響を及ぼさない長周期側の加速度を低減処理した入力地震動にて試験を実施する。

4.3 加振試験項目及び内容

加振試験ケースの項目, 概要は以下のとおりである。各試験ケースの扉の試験体条件 (オペフロ BOP 閉止装置の開閉状態), 加振波等を表 4-1 に示す。

(1) 振動台補償加振

目標とする入力波を精度よく振動台で再現するための振動台補償加振を行う。本試験は, 試験体を振動台に搭載しない条件で行う。

(2) センサ確認試験

センサの取付方向, 感度確認を行うために, 各方向単独で正弦波加振を行う。

(3) 振動特性把握試験

試験体の振動特性を把握するため, オペフロ BOP 閉止装置では ~ 程度の振動数

成分を有する広帯域ランダム波による加振試験を行う。加振方向は各方向単独とし、扉の開状態及び閉状態の振動特性を確認する。なお、試験体の固有振動数が高い場合は、入力波の主要な振動数成分の範囲に固有振動数がないことを確認する。

(4) 地震波加振試験

オペフロ BOP 閉止装置では、加振方向は 3 方向同時とし装置の開状態、閉状態のそれぞれで実施する。

表 4-1 試験ケース一覧 (オペフロ BOP 閉止装置)

	試験項目	試験体条件	加振方向	加振波	加振レベル	備考
-	振動台補償加振	-	X+Y+Z	-	-	-
1	センサ確認試験	扉閉	X	正弦波	1.0 m/s ² 程度	-
2			Y			
3			Z			
4	振動特性把握試験	扉開	X	ランダム波 ^{*1}	2.0 m/s ² 程度	-
5			Y			
6			Z			
7	振動特性把握試験	扉閉	X	ランダム波 ^{*1}	2.0 m/s ² 程度	-
8			Y			
9			Z			
10	地震波加振試験	扉開	X+Y+Z	包絡波 ^{*2}	0.5 × S _s	-
11					1.0 × S _s	-
12		扉閉	X+Y+Z	包絡波 ^{*2}	1.0 × S _s	-

注記 *1 : ~ 程度の振動数成分を有する広帯域ランダム波で加振を行う。

*2 : 水平, 鉛直方向毎に複数の基準時振動 S_s の床応答スペクトルを包絡する模擬地震波を作成して加振。

4.4 計測要領

4.4.1 計測項目

(1) オペフロ BOP 閉止装置の計測項目

計測項目は、試験体の代表的挙動を評価するための項目を計測する。計測項目を表 4-2 に示す。

表 4-2 オペフロ BOP 閉止装置計測項目

項目	計測点
加速度	<ul style="list-style-type: none">・ 振動台・ 支持架台・ 扉・ 扉の駆動装置
ひずみ	<ul style="list-style-type: none">・ 扉・ プッシュローラ（開閉時に扉の面外方向を抑える部位）・ レール（ハンガーレール，下部ガイドレール）・ チェーン（エンドボルト）・ 門周辺（門の荷重を伝達する部位）

4.4.2 計測位置

(1) オペフロ BOP 閉止装置の計測位置

計測点は、試験体の代表的な挙動を評価する位置に設置する。表 4-3 に計測項目の一覧表を示す。

加速度

図 4-5, 図 4-6 に加速度計の設置位置を示す。

ひずみ

図 4-7 から図 4-11 にひずみゲージの設置位置を示す。

4.4.3 測定計器

オペフロ BOP 閉止装置の試験に使用する測定計器を表 4-4 に示す。

表 4-3 オペフロ BOP 閉止装置加振試験計測項目の一覧表 (1/2)

No.	項目	記号	測定点	方向	備考		
1	加速度	A1-1	振動台	X	<ul style="list-style-type: none"> 振動台上加速度を計測 扉開/閉位置における扉中心位置と同じ Y 軸の振動台上に設置 		
2				Y			
3				Z			
4				A2-1		X	
5						Y	
6						Z	
7		A1-2	下部ガイド レール	X	<ul style="list-style-type: none"> 下部ガイドレール上加速度を計測 支持架台による加速度増幅の確認が目的 測定点 A1-1, A2-1 と同じ Y 軸位置の下部ガイドレールに設置 		
8				Y			
9				Z			
10				A2-2		X	
11						Y	
12						Z	
13		A1-3	支持架台 (A1-2, A2-2 裏側)	X	<ul style="list-style-type: none"> 支持架台上加速度を計測 支持架台による加速度増幅の確認が目的 測定点 A1-2, A2-2 と同じ高さ位置の支持架台に設置 		
14				Y			
15				Z			
16				A2-3		X	
17						Y	
18						Z	
19		A3	扉上部(開時)	X	<ul style="list-style-type: none"> 閉時, 開時の扉上部の支持架台に設置 閉時, 開時の BOP 閉止装置の機能維持確認済加速度の計測が目的 支持架台の振動特性確認も兼ねる 		
20				Y			
21				Z			
22				A4		X	
23						Y	
24						Z	
25		A5	扉の駆動装置 本体	X	<ul style="list-style-type: none"> 扉の駆動装置単体の機能維持確認加速度の計測が目的 扉の駆動装置の振動特性確認も兼ねる 		
26				Y			
27				Z			
28		A6	扉の駆動装置 の取付位置	X			
29				Y			
30				Z			
31		A7	扉の中央	X	<ul style="list-style-type: none"> 扉の振動特性, 地震応答の確認が目的 		
32				Y			
33				Z			
34				A8		扉の右・中央	X
35				A9		扉の左・中央	X

前項の続き

36		A10	扉中央(上部)	X	
37				Y	
38		A11	扉中央(下部)	X	
39				Y	

表 4-3 オペフロ BOP 閉止装置加振試験計測項目の一覧表 (2/2)

No.	項目	記号	測定点	備考
40	ひずみ	S1	プッシュローラ (扉開時)	・ 扉閉時 ,開時におけるプッシュローラのひずみを計測
41		S2		
42		S3		
43		S4		
44		S5	プッシュローラ (扉閉時)	
45		S6		
46		S7		
47		S8		
48		S9	レール (ハンガーレール, 下部ガイドレール)	・ S9 ,S10 は ,扉開時のローラ付近のレールのひずみを計測 ・ S11 , S12 は ,扉閉時のローラ付近のレールのひずみを計測
49		S10		
50		S11		
51		S12		
52		S13	チェーン (エンドボルト)	・ チェーンの固定端付近(エンドボルト)を計測
53		S14		
54		S15	門周辺 (扉開時)	・ 閉時 , 開時における門の荷重が伝達する部位のひずみを計測
55		S16		
56		S17	門周辺 (扉閉時)	
57		S18		
58		S19	ハンガーローラのリンク部	・ 鉛直方向の扉の荷重が伝達する部位のひずみを計測
59		S20		
60		S21		
61		S22	扉・中央の梁	・ S22 は水平方向 , S23 は鉛直方向の扉中央のひずみを計測
62		S23		

表 4-4 オペフロ BOP 閉止装置加振試験測定計測器一覧表

	用途	計測器名称	メーカー(型式)	仕様
1	動作試験 (扉開閉, 門押上げ挿入速度測定)	ストップウォッチ		
2	動作試験 (モータ電流値測定)	デジタルクランプ メータ		
3	気密性能試験	デジタル圧力計 (差圧計)		
4		デジタル圧力計 (差圧計)		
5		圧力計 (絶対圧)		
6		熱式風速計		
7		ガラス製単管温度計		
8	加振試験	加速度計		
9		加速度計		
10		ひずみゲージ		

注記* : RO (Rated Output) : 定格出力

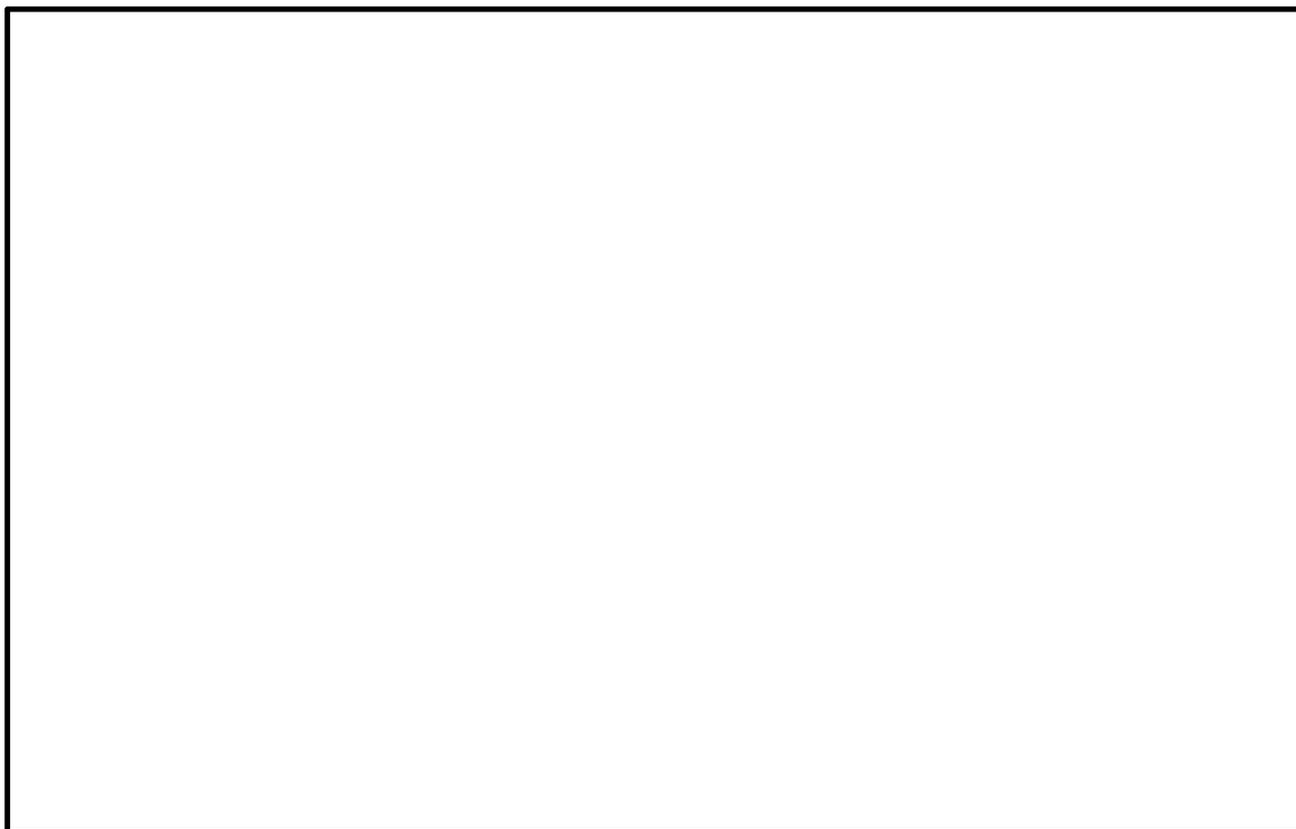


図 4-5 加速度計の設置位置（振動台，支持架台）



図 4-6 加速度計の設置位置（扉，駆動装置）

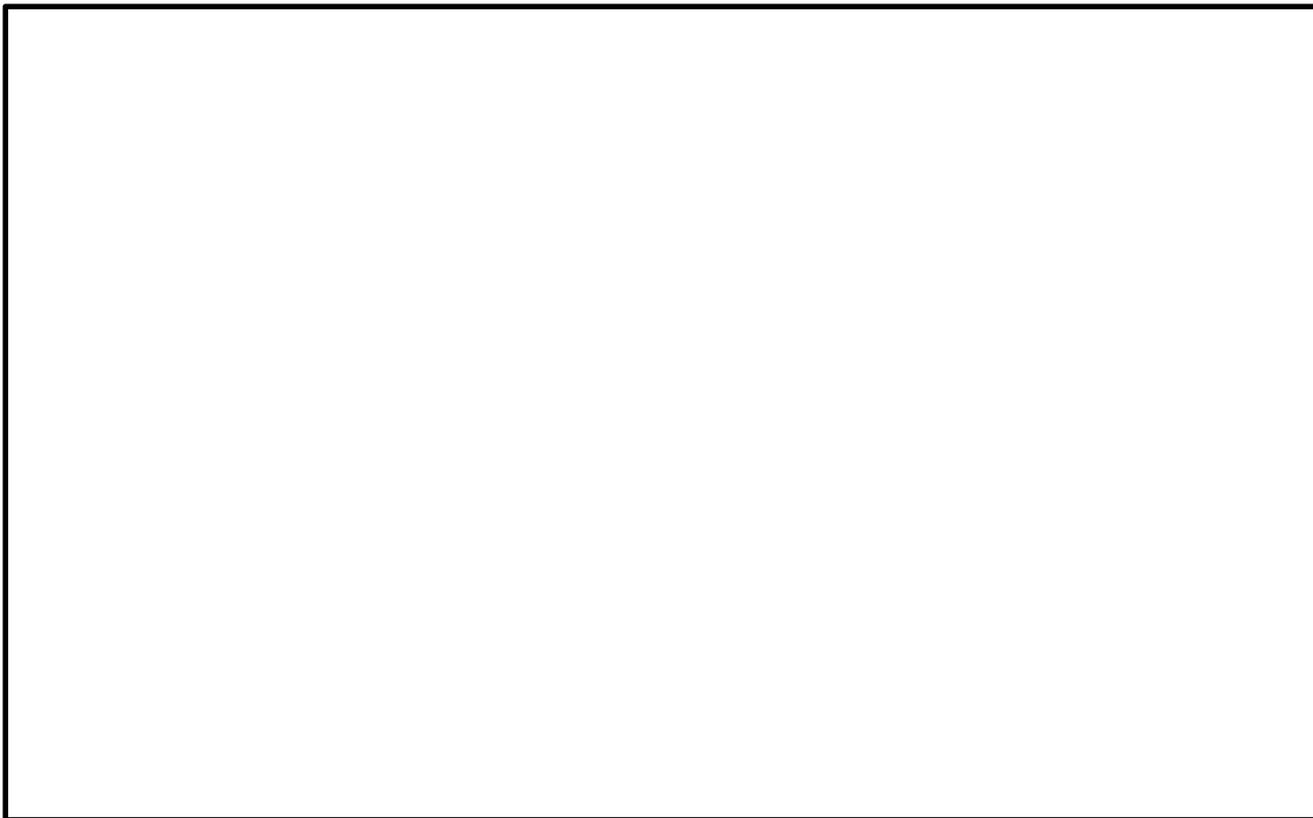


図 4-7 ひずみゲージの設置位置（プッシュローラ）

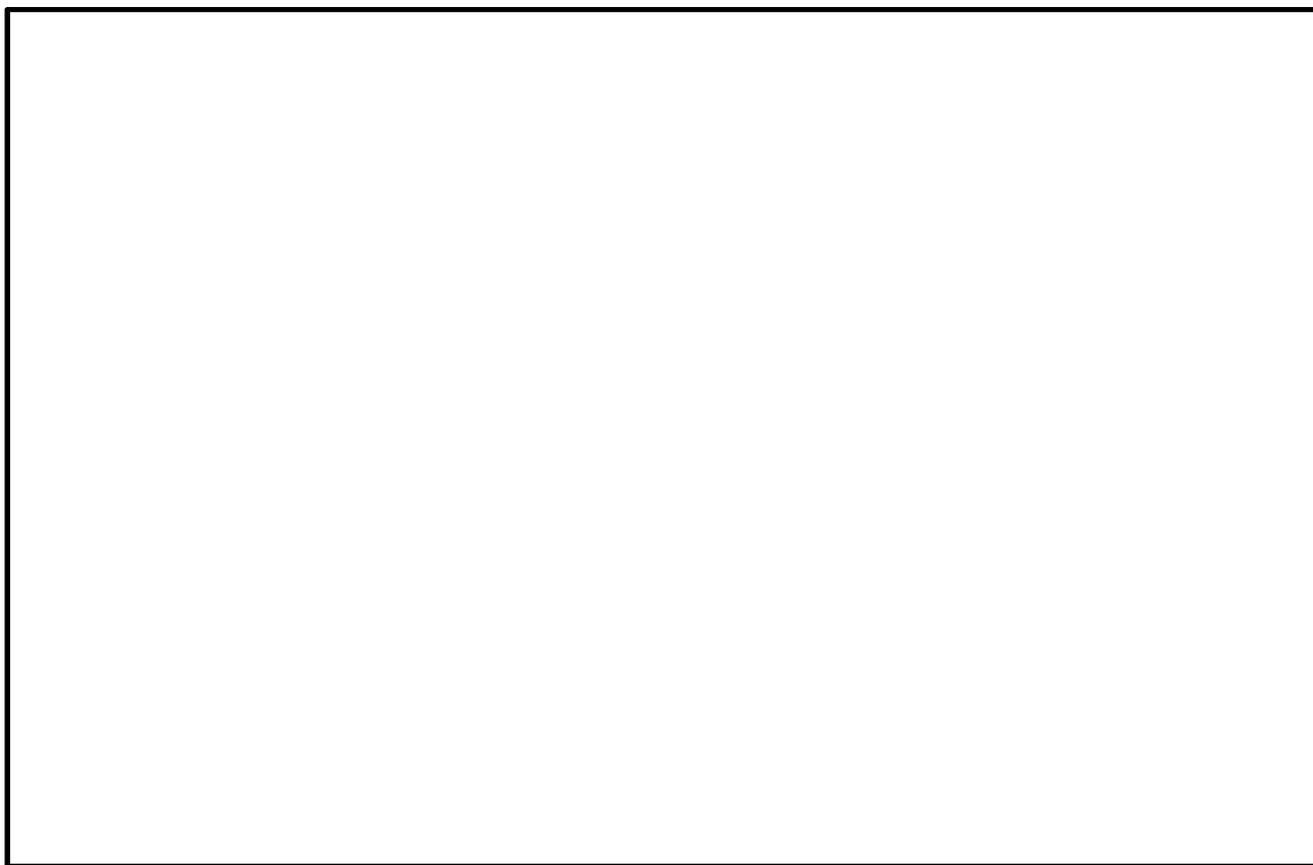


図 4-8 ひずみゲージの設置位置（ハンガーレール，及び下部ガイドレール）

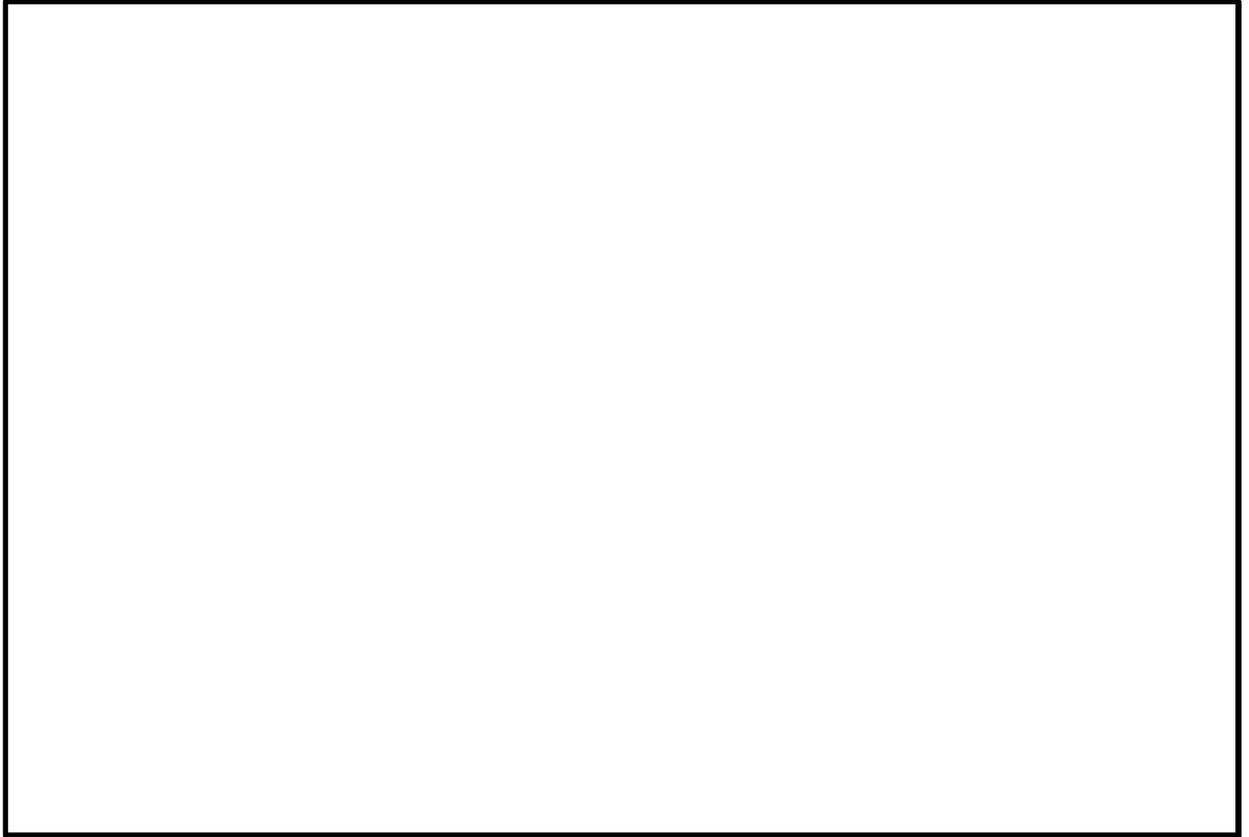


図 4-9 ひずみゲージの設置位置（チェーンのエンドボルト，門周辺）

注1)本図では，扉，モータ等を表示しておらず，開時のチェーン端付近にS13，S14の記号を表示。

注2)チェーンのエンドボルト(S13，S14)，及び門周辺(開時にS15，S16，閉時にS17，S18)のひずみを計測。



図 4-10 ひずみゲージの設置位置（ハンガーローラ）

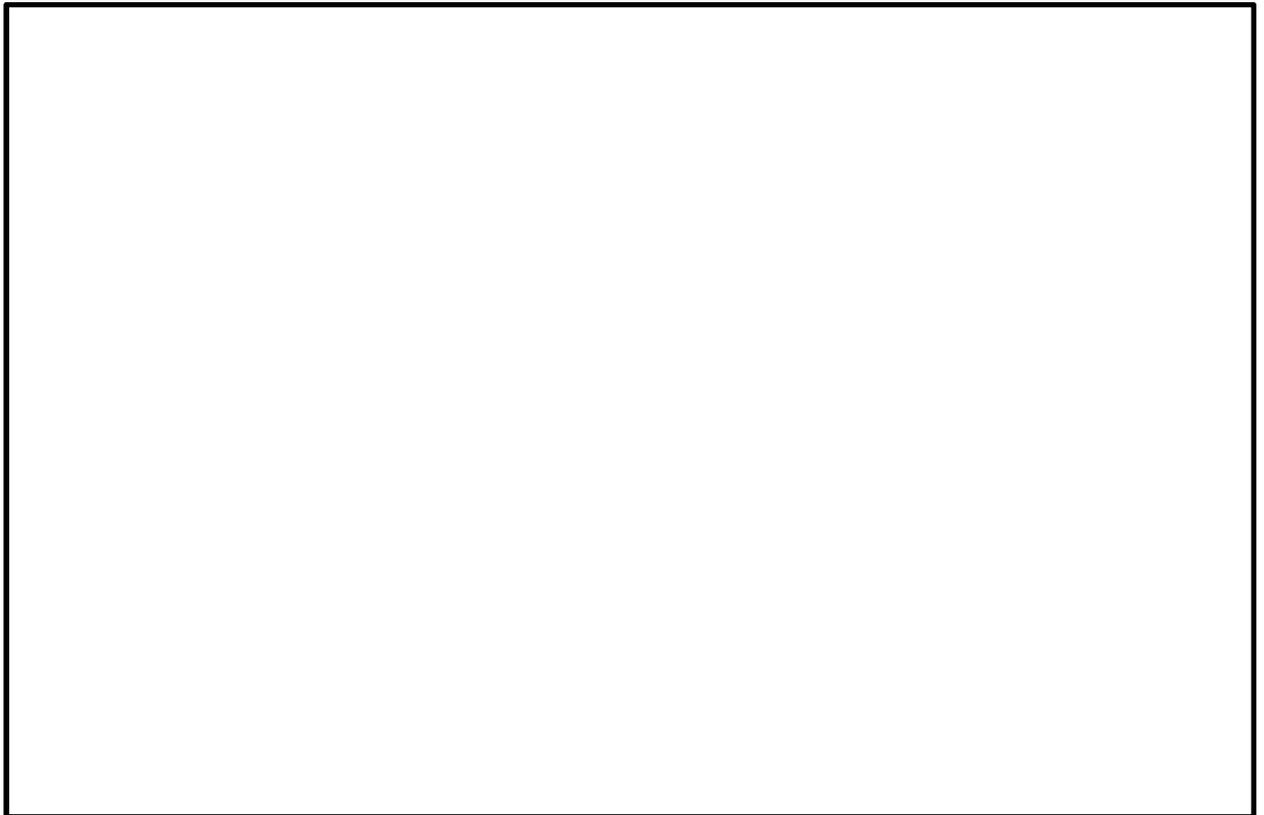


図 4-11 ひずみゲージの設置位置（扉）

5. 試験要領

5.1 オペフロ BOP 閉止装置加振試験手順

目標とする入力波を精度よく振動台で再現するための振動台補償加振の後，試験体を振動台に搭載し，下記の手順で加振及び加振後の作動試験，気密性能試験を実施する。

- (1) 加振試験の準備として，センサ（加速度計及びひずみゲージ）が所定の位置に設置されていることを確認する。また，測定計器の仕様が適切であることを確認する。
- (2) センサ確認試験を以下の手順で実施する。
加振レベル 0.5 m/s^2 程度，振動数 ~ にて，各方向単独で正弦波加振を行う。
センサの取付方向，感度を確認する。
- (3) 振動特性把握試験を以下の手順で実施する。
オペフロ BOP 閉止装置の扉が開放状態であることを確認する。
加振レベル 2.0 m/s^2 程度にて，各方向単独で， ~ 程度の振動数成分を有する広帯域ランダム波の加振を行う。
試験体の固有振動数を測定し，入力波の主要な振動数成分の範囲に固有振動数の有無を確認する。
オペフロ BOP 閉止装置の扉を閉止状態とし，(3) ， を実施する。

【オペフロ BOP 閉止装置の扉開放状態における加振試験】

- (4) 地震波（ $1.0 \times S \text{ s}$ ）加振試験を以下の手順で実施する。
オペフロ BOP 閉止装置の扉が開放状態であることを確認する。
センサ取付状況及び試験体の外観目視点検を行い，異常のないことを確認する。
3 方向同時加振の包絡波による地震波（ $1.0 \times S \text{ s}$ ）で加振する。
加振後，採取データを確認する。
作動試験（扉開から閉操作のみ）を「5.4.1(1) 作動試験」のとおり実施する。
気密性能試験を「5.3(1) 気密性能試験」のとおり実施する。
作動試験を「5.4.1(1) 作動確認」のとおり実施する。

【オペフロ BOP 閉止装置の扉閉止状態における加振試験】

オペフロ BOP 閉止装置の扉を閉止状態とし，加振試験を実施する。ただし，下記に読み替える。

- ・扉の開放状態を閉止状態

5.2 気密性能試験について

(1) 気密性能試験

A S T M E 283-4 (Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen) に準じた装置を用いて実施する。排風機により試験容器内の空気を排出することにより試験体前後に圧力差を生じさせ，試験体のシール部から試験容器へ流入す

る通気量を測定する。

図 5-1 にオペフロ BOP 閉止装置気密性能試験装置図，図 5-2 にオペフロ BOP 閉止装置試験体の内のり寸法図を示す。

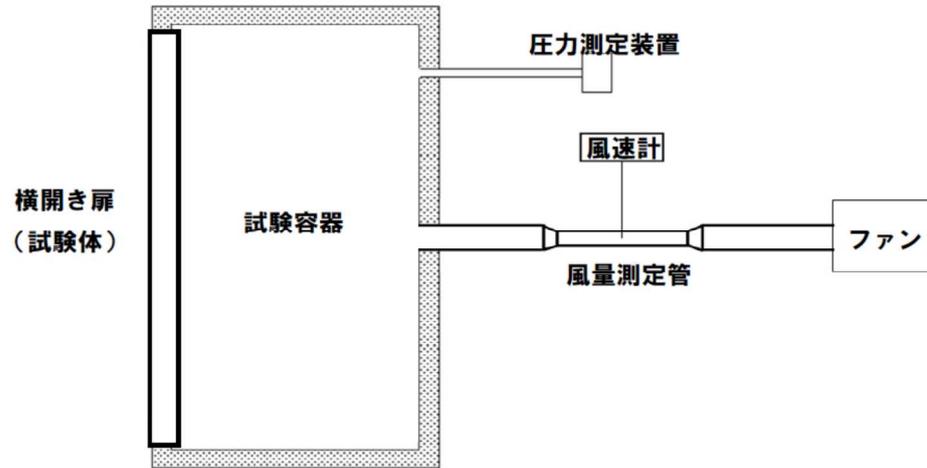


図 5-1 オペフロ BOP 閉止装置気密性能試験装置図

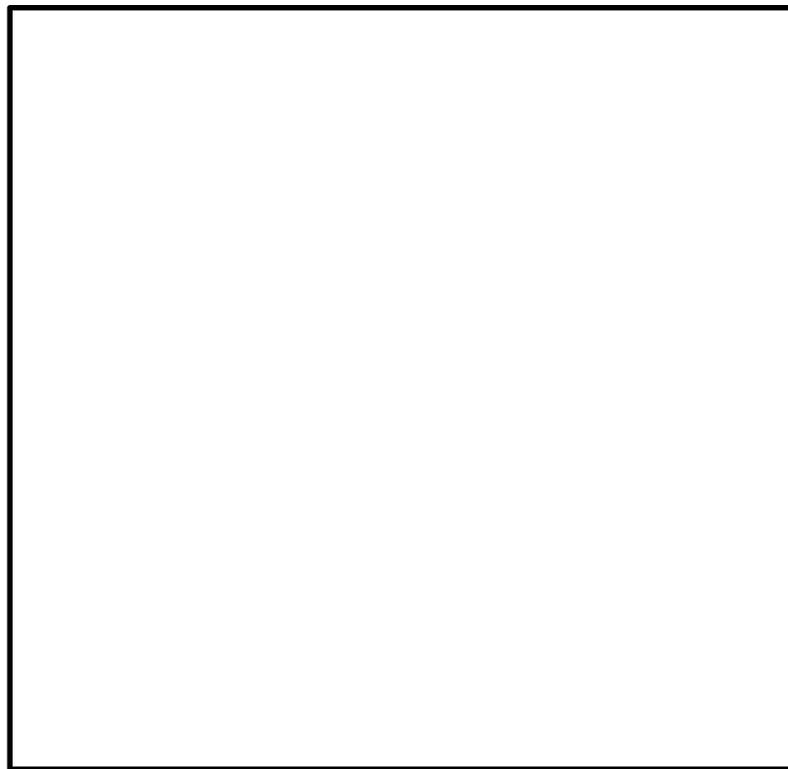


図 5-2 オペフロ BOP 閉止装置試験体の内のり寸法図

試験体を通過した空気量 Q (m³/h) は、風速計の風速 V (m/s)、風量測定管の直径 d (m) から算出する。

$$Q = V \times \frac{\pi d^2}{4} \times 3600$$

試験手順は、「JIS A 1516(建具の気密性試験方法)6.3 試験手順」に準じて(ただし、予備加圧後の開閉確認は省略する。)、負圧での圧力差 と上げ、 と下げていく* (保持時間 1 分)。通気方向は 1 方向(負圧)とする。(図 5-3 負圧試験線図)

注記 * : 負圧を維持できる範囲で試験を実施する。

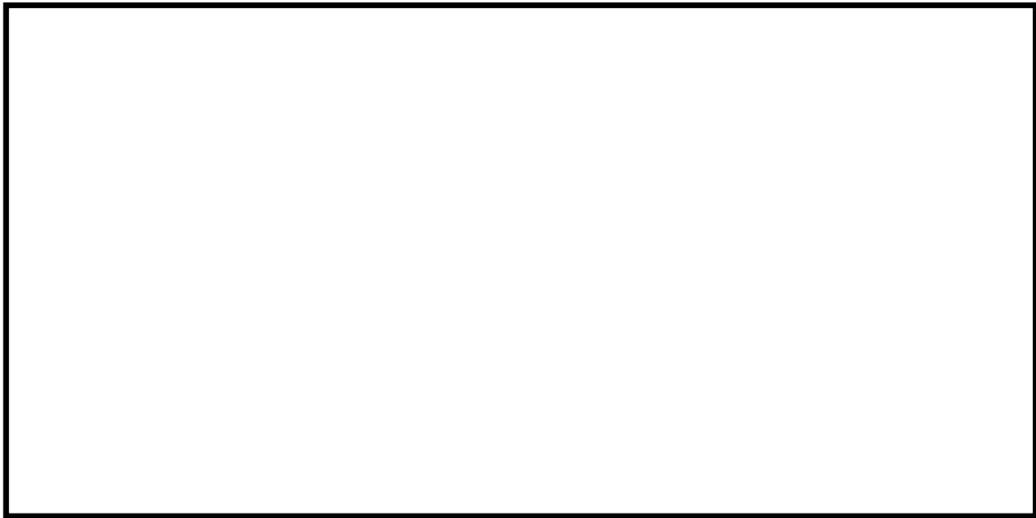


図 5-3 負圧試験線図

試験により得られた試験体を通過した空気量 Q (m³/h) を、標準状態 (20 , 1013 hPa) に換算し、扉の内側の面積 (m²) で除すことにより、単位面積当たり、1 時間当たりの通気量 (m³/h・m²) として算出する。圧力差に応じた通気量の推移を確認する。

$$q = Q' / A$$

ここで、

q : 通気量 (m³/h・m²)

A : 試験体の内側の面積 (m²)

Q' : 通過した空気量 (20 , 1013 hPa 換算値) (m³/h)

$$Q' = Q \cdot \frac{P}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + T}$$

P : 試験容器内の気圧 (hPa)

T : 試験時の空気温度 ()

(2) 判定基準

通気量 : 以下* (差圧 63 Pa 時)

注記 * : 閉止装置単体の判定基準(設計目標)としては, J I S A 1516 で示される A4 等級以上とする。なお, 原子炉建屋原子炉区域全体としての気密性能は確保できることを確認する。試験体は, 実機に取り付ける全ての閉止装置を考慮し, 各々の縦・横寸法を包絡する大きさと製作することにより試験の保守性を確保する。

5.3 作動確認について

5.3.1 作動確認

(1) オペフロ BOP 閉止装置

【電動作動確認】

オペフロ BOP 閉止装置の門引抜きから扉閉閉，門挿入一連の動作を扉の作動確認として，動作可能であることを確認する。併せて，作動時に電動機が定格電流値以下であることを確認するため，電流測定及び開閉時間を測定する。なお，開操作と閉操作は原則各 1 回とするが，初期状態との差異があると判断した場合は，各 5 回計測し，最も保守的な値を判定基準に用いる。なお，電動作動時間については次のとおりとする。

- ・連動動作（扉閉）：操作盤の自動閉スイッチを押してから，門引抜き，扉が閉止動作を行い，門が挿入され，操作盤の動作完了を示すランプが点灯するまでの時間
- ・連動動作（扉開）：操作盤の自動開スイッチを押してから，門引抜き，扉が開放動作を行い，門が挿入され，操作盤の動作完了を示すランプが点灯するまでの時間

また，オペフロ BOP 閉止装置の門が引抜き，挿入できることを確認する。併せて，作動時に電動機が合格基準値以下であることを確認するため電流測定及び開閉時間を測定する。なお，開操作と閉操作は原則各 1 回とするが，初期状態との差異があると判断した場合は，各 5 回計測し，最も保守的な値を判定基準に用いる。なお，電動作動時間については次のとおりとする。

- ・門引抜き時間：操作盤の門引抜きのスイッチを押してから門が引抜かれ，操作盤の動作完了を示すランプが点灯するまでの時間
- ・門挿入時間：操作盤の門挿入のスイッチを押してから門が挿入され，操作盤の動作完了を示すランプが点灯するまでの時間

【手動作動確認】

オペフロ BOP 閉止装置の扉が閉止状態での加振後，手動操作によりの門を引抜き，扉閉止，門を挿入できることを確認する。

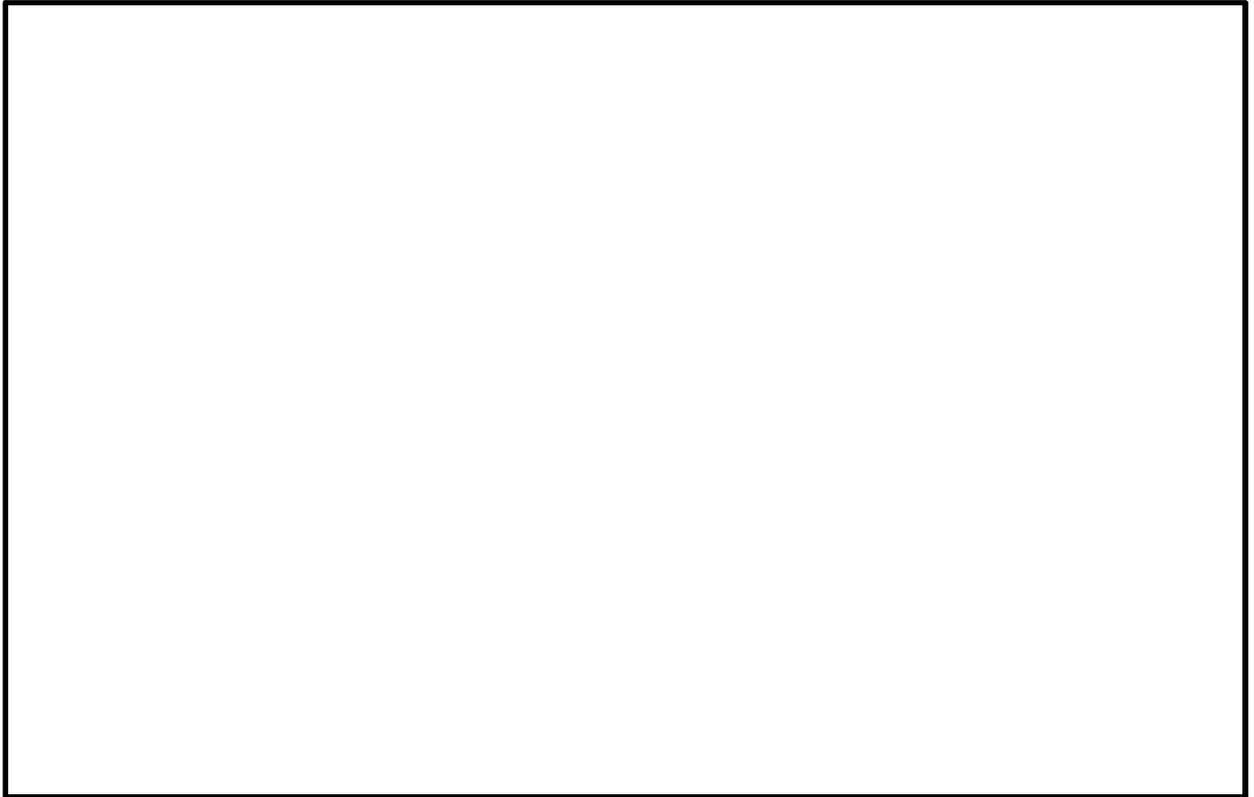


図 5-4 オペフロ BOP 閉止装置手動操作概念図

5.3.2 判定基準

(1) オペフロ BOP 閉止装置

【電動作動確認】

扉

電動駆動により開閉できること。

扉の閉止：全閉位置であること。

開閉時間：120 秒以内

電流値：定格電流値以内であること。

作動試験時の電流値は動作時間が目標値を上回ってしまった場合に、原因特定するための参考情報として取得する。

門

門駆動モータにより門が引抜き、または挿入できること。

門の位置：門が挿入又は引抜き位置であること。

動作時間：20 秒以内

電流値：定格電流値以内であること。

作動試験時の電流値は動作時間が目標値を上回ってしまった場合に、原因特定するための参考情報として取得する。

【手動作動確認】

手動操作により、門を引抜き、扉の閉止または開放、門を挿入の一連の動作ができること。

燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験結果について

1. 試験結果

「試験要領」に基づき実施した燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置（以下「オペフロ BOP 閉止装置」という。）の試験結果概要を以下の表 1-1 に示す。

表 1-1 オペフロ BOP 閉止装置試験結果概要

区分	No	試験項目	目的 / 試験内容	結果
事前確認	1	センサ確認	加速度センサの動作確認	完了
	2	振動特性試験	ランダム波による閉状態での振動特性（固有値）確認	完了
作動確認 （加振無）	3	作動試験	電動での閉止装置作動確認	良好
気密性能確認 （加振無）	4	気密性能試験	気密性能確認	良好
加振試験	5	加振試験 1.0 S s(扉閉) ・ 作動確認 ・ 気密性能試験	・ 加振 扉閉操作（門含む） 気密性能確認 ・ 電動での扉開閉確認（門含む）	良好
	6	加振試験 1.0 S s(扉閉) ・ 作動確認 ・ 気密性能試験	・ 加振 気密性能確認 ・ 電動での扉開閉確認（門含む） ・ 手動での開閉操作	良好

2. 固有振動数

オペフロ BOP 閉止装置の固有振動数を確認するため、扉が開状態と閉状態時に、各方向(X, Y, Z 方向) 単独で Hz ~ Hz 程度の振動数成分を有する広帯域ランダム波(加振レベル m/s² 程度) で加振し、オペフロ BOP 閉止装置の固有振動数を確認した。オペフロ BOP 閉止装置の固有振動数確認結果として、扉開状態では、X 方向(面外方向)、Y 方向(面内方向)、Z 方向(鉛直方向) とともに明確な振動数ピークは確認されず、扉の固有振動数は Hz 以上と評価した。また扉閉状態では、X 方向(面外方向) にのみピークが確認され、閉状態面外方向の固有振動数は、約 Hz (約 秒) と評価した。固有振動数を図 2-1 に示す。

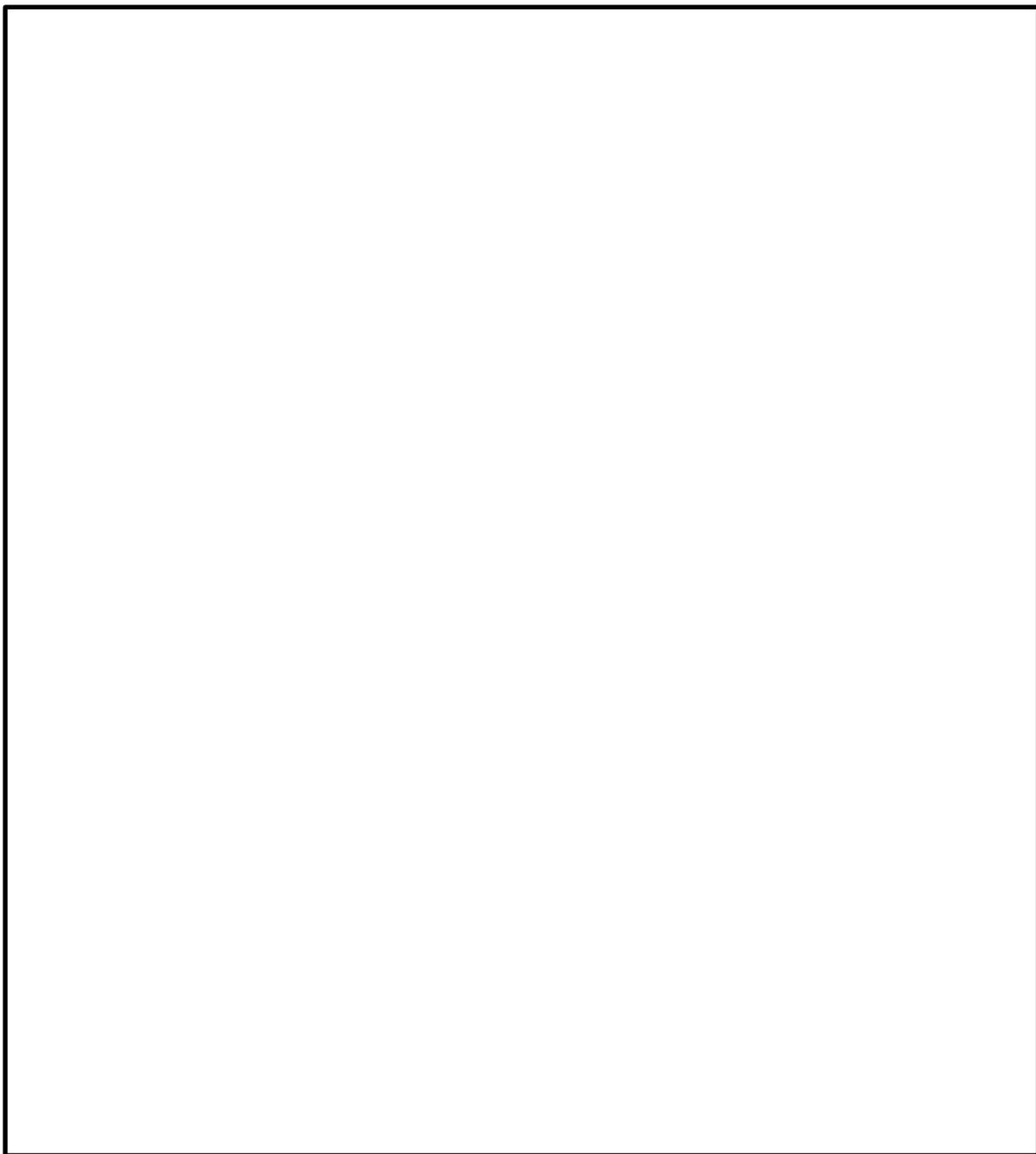


図 2-1 オペフロ BOP 閉止装置の固有振動数

3. 加振試験加速度の妥当性

(1) オペフロ BOP 閉止装置

オペフロ BOP 閉止装置の上部及び下部の最大加速度は、S s 包絡条件を超えており、必要な加振がされていることを確認した。加振レベル 1.0 S s の加速度結果を以下の表 3-1 から表 3-4 に示す。また加振時の応答スペクトルが設計応答スペクトルを超えていることを確認した。応答スペクトルの測定結果を図 3-1 から図 3-4 に示す。

表 3-1 扉「開」上部の加速度評価（試験 No.5）

方向	S s 包絡条件 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	A3(扉上部)	判定結果
		計測結果 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	
X	□ <	□	
Y		□	
Z	□ <	□	

表 3-2 扉「開」下部の加速度評価（試験 No.5）

方向	S s 包絡条件 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	A1-1 (扉下部)	判定結果
		計測結果 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	
X	□ <	□	
Y		□	
Z	□ <	□	

表 3-3 扉「閉」上部の加速度評価（試験 No.6）

方向	S s 包絡条件 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	A4(扉上部)	判定結果
		計測結果 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	
X	□ <	□	
Y		□	
Z	□ <	□	

表 3-4 扉「閉」下部の加速度評価（試験 No.6）

方向	S s 包絡条件 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	A2-1 (扉下部)	判定結果
		計測結果 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	
X	□ <	□	
Y		□	
Z	□ <	□	

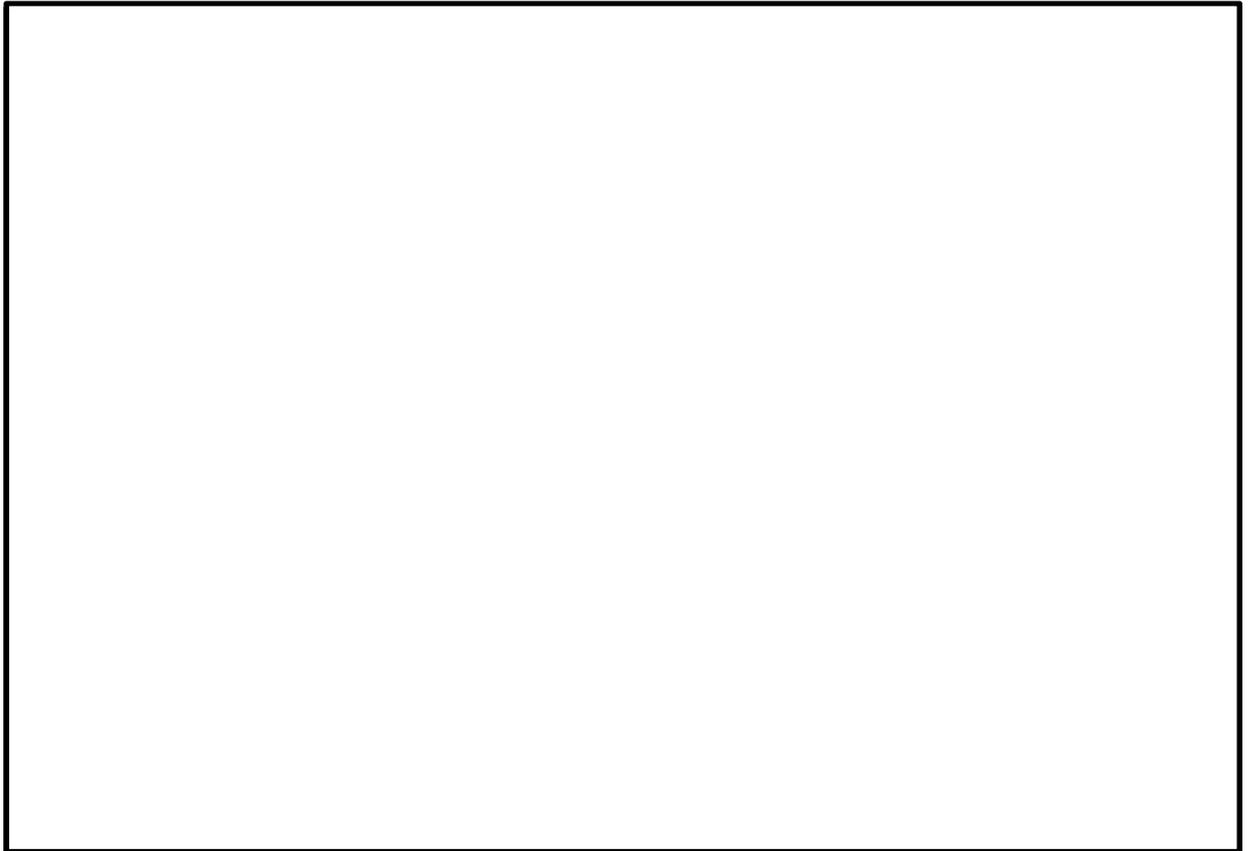


図 3-1 扉開 下部測定結果 (試験 No.5)

図 3-2 扉開 上部測定結果 (試験 No.5)

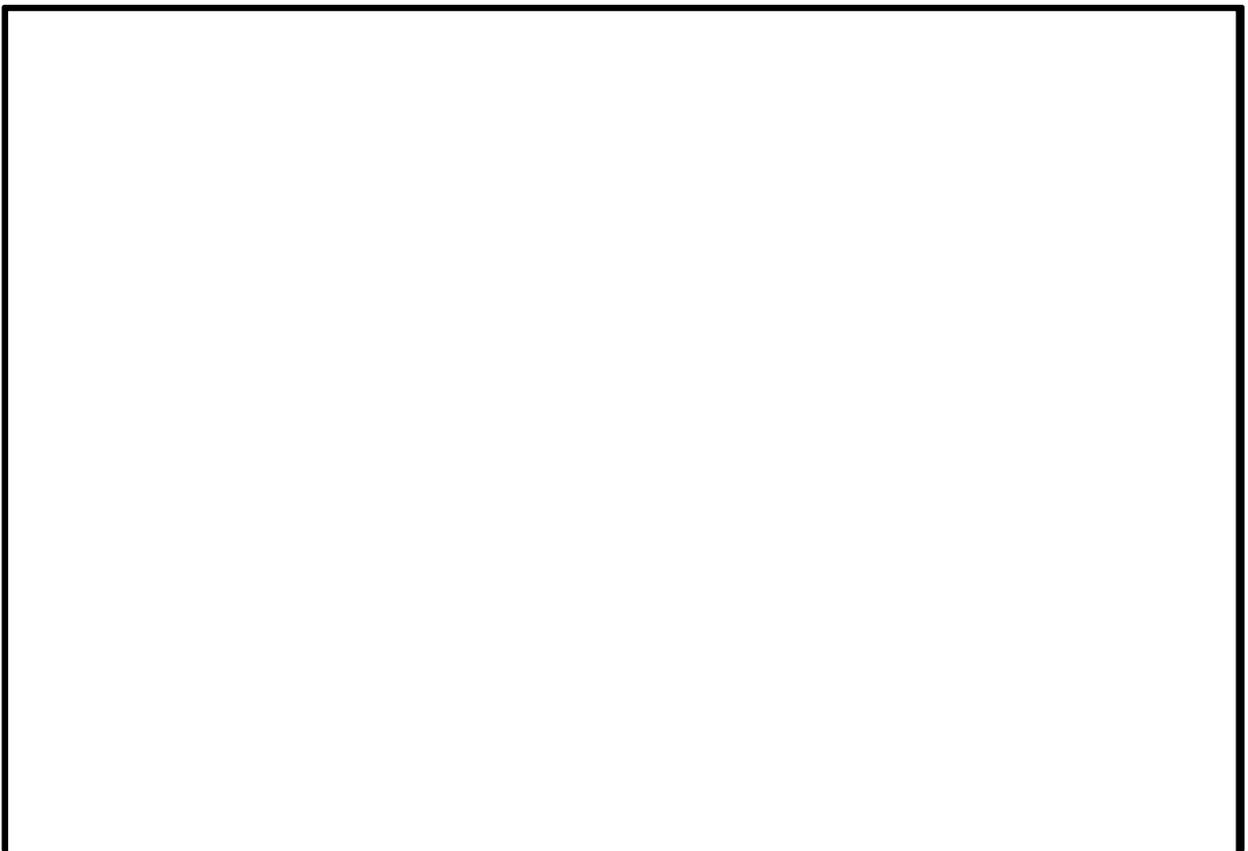


図 3-3 扉閉 下部測定結果 (試験 No.6)

図 3-4 扉閉 上部測定結果 (試験 No.6)

4. 加振試験結果

4.1 気密性能試験結果

オペフロ BOP 閉止装置気密性能試験の初期状態及び加振後については表 4-1 のとおり。加振後の漏えい量も十分に小さく、燃料取替床ブローアウトパネル部に適用し、既設原子炉建屋のインリーク量を考慮した場合でも、原子炉建屋としての気密性能（負圧）は十分に確保できることを確認した。

表 4-1 オペフロ BOP 閉止装置加振後の気密漏洩試験

試験条件		通気量 [m ³ /h・m ²] (63 Pa 時)	備考
扉	加振		
開	初期状態	<input type="text"/>	扉を閉止して試験実施
開	1.0 S s	<input type="text"/>	加振後に扉を閉止し試験
閉		<input type="text"/>	扉閉状態での加振後の状態で試験

<原子炉建屋としての負圧達成について>

今回のオペフロ BOP 閉止装置の気密性能試験結果から，本装置を燃料取替床ブローアウトパネル部に設置した場合の原子炉建屋原子炉区域の負圧達成可否について評価した結果，非常用ガス処理系定格容量（2000 m³/h）は，推定インリーク量 m³/h を十分に上回るため，非常用ガス処理系にて 63 Pa 以上の負圧達成可能である。

- ・ 既設原子炉建屋の推定インリーク量：約 1470 m³/h@63 Pa
- ・ オペフロ BOP 閉止装置 4 台の合計面積：約 m²
- ・ オペフロ BOP 閉止装置 4 台設置時の推定インリーク量： m² × m³/h・m² = m³/h @63 Pa
- ・ 非常用ガス処理系定格容量：2000 m³/h@63 Pa
- ・ オペフロ BOP 閉止装置設置時の原子炉建屋原子炉区域の推定漏えい量：
1470m³/h + m³/h = m³/h@63 Pa < 2000 m³/h@63 Pa
(非常用ガス処理系定格容量)

4.2 扉作動試験

(1) オペフロ BOP 閉止装置

オペフロ BOP 閉止装置加振前後の扉作動試験の結果は表 4-2，表 4-3 とおり。作動時間，電流値ともに設計目標値を満足しており，問題ないことを確認した。

表 4-2 オペフロ BOP 閉止装置加振前の扉作動試験結果

扉 (初期状態)	電動		手動
	時間	電流値	
	120秒以内 (目標値)	<input type="text"/> A以内 (定格値)	
開放 閉止	87秒	<input type="text"/> A	-
閉止 開放	87秒	<input type="text"/> A	-

電流値は動作時間が目標値を上回ってしまった場合に，原因特定するための参考情報として取得した。

表 4-3 オペフロ BOP 閉止装置加振後の扉作動試験結果

試験条件	扉 (初期状態)	電動				手動
		開放	閉止	閉止	開放	
		時間	電流値	時間	電流値	
		120秒以内 (目標値)	<input type="text"/> A以内 (定格値)	120 秒以内 (目標値)	<input type="text"/> A以内 (定格値)	
1.0 S s	開	87秒	<input type="text"/> A	87秒	<input type="text"/> A	閉 開 異常なし 開 閉 異常なし
	閉	87秒	<input type="text"/> A	87秒	<input type="text"/> A	-

電流値は動作時間が目標値を上回ってしまった場合に、原因特定するための参考情報として取得した。

4.3 門作動試験

(1) オペフロ BOP 閉止装置

オペフロ BOP 閉止装置加振前後の門作動試験の結果は表 4-4、表 4-5 のとおり。作動時間、電流値ともに設計目標値を満足しており、問題ないことを確認した。

表4-4 オペフロBOP閉止装置加振前の門作動試験結果

門位置	電動				手動	
	引抜き時		挿入時		押上げ時	挿入時
	時間	電流値	時間	電流値		
	20 秒以内 (目標値)	□ A以内	20 秒以内 (目標値)	□ A以内		
扉開側	20秒	□ A	20秒	□ A	-	-
扉閉側	20秒	□ A	20秒	□ A	-	-

電流値は動作時間が目標値を上回ってしまった場合に、原因特定するための参考情報として取得した。

表4-5 オペフロBOP閉止装置加振後の門作動試験結果

試験条件	扉 (初期状態)	門位置	電動				手動	
			引抜き時		挿入時		引抜き時	挿入時
			時間	電流値	時間	電流値		
			20 秒以内 (目標値)	□ A以内	□ 秒以内 (目標値)	□ A以内		
1.0 S s	開	扉開側	20秒	□ A	20秒	□ A	異常なし	異常なし
		扉閉側	20秒	□ A	20秒	□ A	異常なし	異常なし
	閉	扉開側	20秒	□ A	20秒	□ A		
		扉閉側	20秒	□ A	20秒	□ A		

電流値は動作時間が目標値を上回ってしまった場合に、原因特定するための参考情報として取得した。

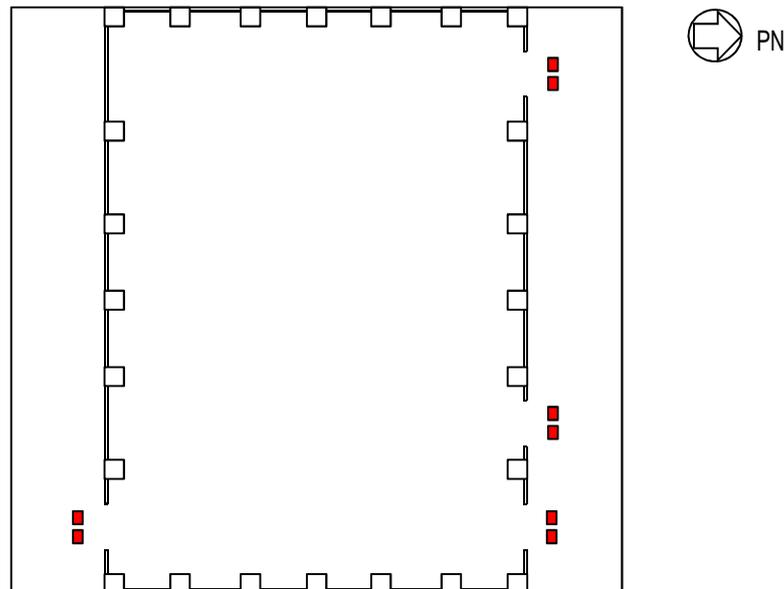
燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置（自主対策設備）の配置と構造について

1. 概要

燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置（以下「オペフロ BOP 強制開放装置」という。）は、仮に、格納容器バイパス事象発生時にオペフロ BOP4 枚のうち複数枚が開放せず、原子炉建屋内の環境改善を目的にブローアウトパネルを強制的に開放する必要が発生した場合を想定して、強制的にオペフロ BOP を開放させるために設置する。本設備は、自主対策設備として設置する。

2. 設置位置及び台数

オペフロ BOP 強制開放装置は、各オペフロ BOP に設置することとし、原子炉建屋屋上に 8 台（各パネルに 2 台）設置する。設置位置を図 2-1 に示す。



原子炉建屋屋上 概略平面図

■（オペフロ BOP 強制開放装置 8 台）

図 2-1 オペフロ BOP 強制開放装置設置位置図

3. 設備概要

本設備は、電動ウインチ及びワイヤロープから構成される。オペフロ BOP 強制開放装置は中央制御室から操作可能とし、操作スイッチにより電動ウインチが稼働し、ワイヤロープを巻き取ることにより、ブローアウトパネルを開放する設計とする。なお、ワイヤロープ巻き取り時にブローアウトパネルが傾くことのないよう、2 台の強制開放装置をインバータにより制御する設計とする。

オペフロ BOP が開放状態になり、オペフロ BOP 閉止装置が稼働する際、その妨げにならないように、オペフロ BOP 強制開放装置はオペフロ BOP を建屋から引き離れた状態を保持する。また、電源が確保できない場合に備え、手動により操作可能な設計とする。

4. 自然現象及び人為事象に対する設計方針

(1) 地震

自然現象のうち地震に関して、オペフロ BOP 強制開放装置は、安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。

(2) 津波

自然現象のうち津波に関して、オペフロ BOP 強制開放装置は津波の影響を受けない位置に設置されることから、設計上考慮しない。

(3) 風（台風）及び竜巻

自然現象のうち風（台風）に関してオペフロ BOP 強制開放装置は、風（台風）による風荷重の影響により、安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。また、自然現象のうち竜巻に関しては、竜巻による風荷重の影響により、安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。

(4) 積雪及び火山の影響

自然現象のうち積雪及び火山の影響に関して、オペフロ BOP 強制開放装置は、積雪及び降下火砕物の堆積の影響により、安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。

(5) その他自然現象及び人為事象

その他自然現象及び人為事象に関して、オペフロ BOP 強制開放装置は、これら事象による影響により、安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。

5. 溢水

溢水に関して、オペフロ BOP 強制開放装置は溢水の影響を受けない位置に設置されることから、設計上考慮しない。

6. 火災

火災に関しては、オペフロ BOP 強制開放装置は火災により、安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。

7. オペフロ BOP 強制開放装置の機能確認試験について

(1) 試験項目

作動確認：強制開放装置によるオペフロ BOP の開放動作確認（電動駆動）

強制開放装置によるオペフロ BOP の開放動作確認（手動操作）

(2) 試験方法

本試験に使用する機器の配置及び構成の概念図を図 7-1 に示す。

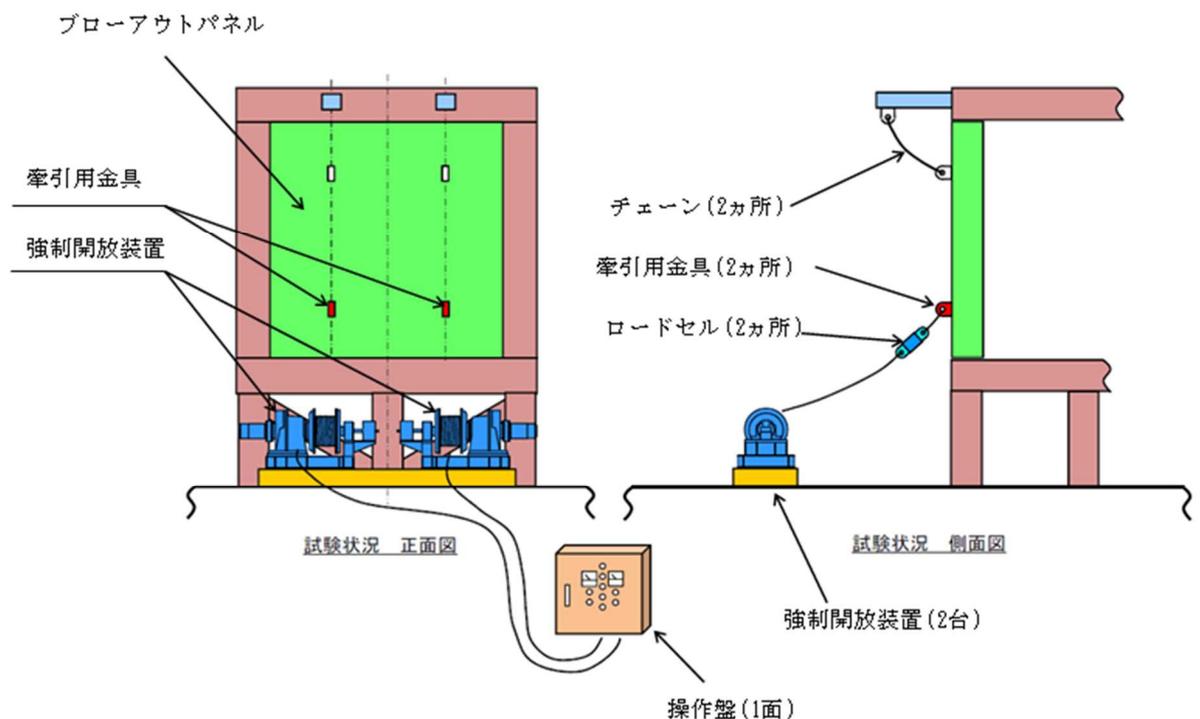


図 7-1 試験機器配置及び構成 概念図

試験装置架構にオペフロ BOP を取り付け。パネル下部に設置した牽引用金具に強制開放装置ワイヤロープを取り付け、強制開放装置によって巻き取り、オペフロ BOP を開放させる。

表7-1 オペフロBOP試験体仕様

製 造	清水建設株式会社
型 式	既存パネル模擬
概算質量	1500 kg
数量	各 1 面
サイズ	幅 4260 mm × 高さ 4160 mm
クリップ取付箇所	18 箇所*
シール材	シリコンシーラント

*オペフロBOP設計上のクリップ個数より開放しづらいクリップ個数に変更して試験を実施

(3) 確認項目および判定基準

(3).1 電動駆動

確認項目：開放時における装置の負荷

判定基準：定格荷重以下であること

(3).2 手動操作

確認項目：手動操作によるパネルの開放可否

判定基準：手動ハンドル操作によりパネルの開放が可能であること

(4) 試験結果

(4).1 開放動作確認

試験条件としたクリップ数 18 個(幅約 75 mmを 18 個)の実機大モックアップ試験体に対して、強制開放装置による強制開放試験を実施し、オペフロ BOP が強制開放装置の定格荷重以下の荷重で開放することを確認した。電動駆動試験は同条件で 3 回実施した。また、手動操作は 1 回実施し、手動操作によりパネルを開放可能であることを確認した。試験結果を表 7-2、表 7-3 に示す。

表 7-2 試験結果（電動駆動）

試験対象	試験日	測定値 (kN)	許容値(kN) (定格荷重)	判定
試験体1	2019/7/17	<input type="text"/>	68.6	○
試験体2	2019/7/18	<input type="text"/>		○
試験体3	2019/7/19	<input type="text"/>		○

表 7-3 試験結果（手動操作）

試験対象	試験日	手動操作による開放可否	判定
試験体2	2019/7/31	可	○

8. オペフロ BOP 強制開放装置の動作による悪影響について

(1) オペフロ BOP の開放挙動について

実機においてオペフロ BOP が開放した際、飛散し他設備へ影響を及ぼさないよう、2本のチェーンにて落下を防止する。オペフロ BOP は、開放後にチェーンの上部吊り点を中心に弧を描くように開放する。

(2) オペフロ BOP 閉止装置への悪影響防止について

開放したオペフロ BOP とオペフロ BOP 閉止装置が最も接近する箇所で のクリアランスを確保しており、オペフロ BOP 閉止装置への干渉は発生しない。また、飛散防止チェーンおよび強制開放装置のワイヤロープがオペフロ BOP 閉止装置に干渉しない設計とする。

(2).1 クリアランスの算出について

上部吊り点およびオペフロ BOP とチェーンとの取り合い点を定点として、オペフロ BOP 開放後に周辺設備と干渉しないチェーン長さ(リンク数)を検討し、設定する。その後、設定したチェーン長における開放後の軌跡を描き、オペフロ BOP 閉止装置のクリアランスの値を確認する。なお、オペフロ BOP を吊ることによって生じるチェーンの伸びについて考慮する。

表 7-4 クリアランスの内訳

			(= -(+))
上部飛散防止チェーン長さ	オペフロ BOP 取合い部からオペフロ BOP 下端	上部吊り点からオペフロ BOP 閉止装置	オペフロ BOP とオペフロ BOP 閉止装置のクリアランス

(2).2 飛散防止チェーンの長さについて

飛散防止チェーンの長さは以下の項目を考慮し、設計する。

- ・オペフロ BOP の開放を阻害しないこと(上部チェーン)
- ・開放したブローアウトパネルがオペフロ BOP 閉止装置と干渉しないこと(上部チェーン)
- ・開放したブローアウトパネルが非常用ディーゼル発電機サイレンサと干渉しないこと(下部チェーン)

強制開放装置によるオペフロ BOP 開放時の軌跡およびオペフロ BOP とオペフロ BOP 閉止装置のクリアランスについて図 8-1 に示す。

また、オペフロ BOP の通常状態を図 8-2 に、オペフロ BOP 強制開放装置で開放した場合の状態を図 8-3 に示す。

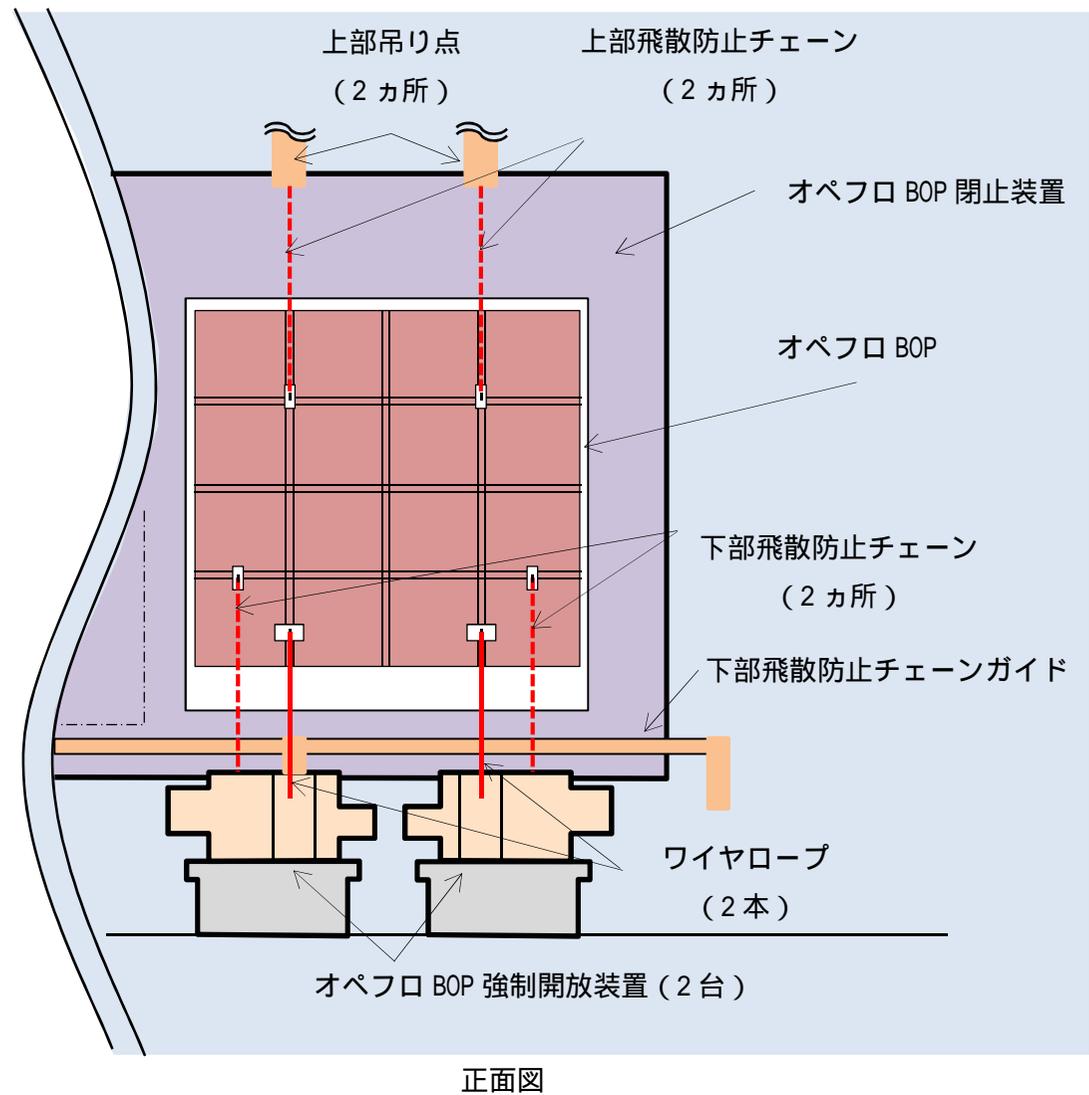
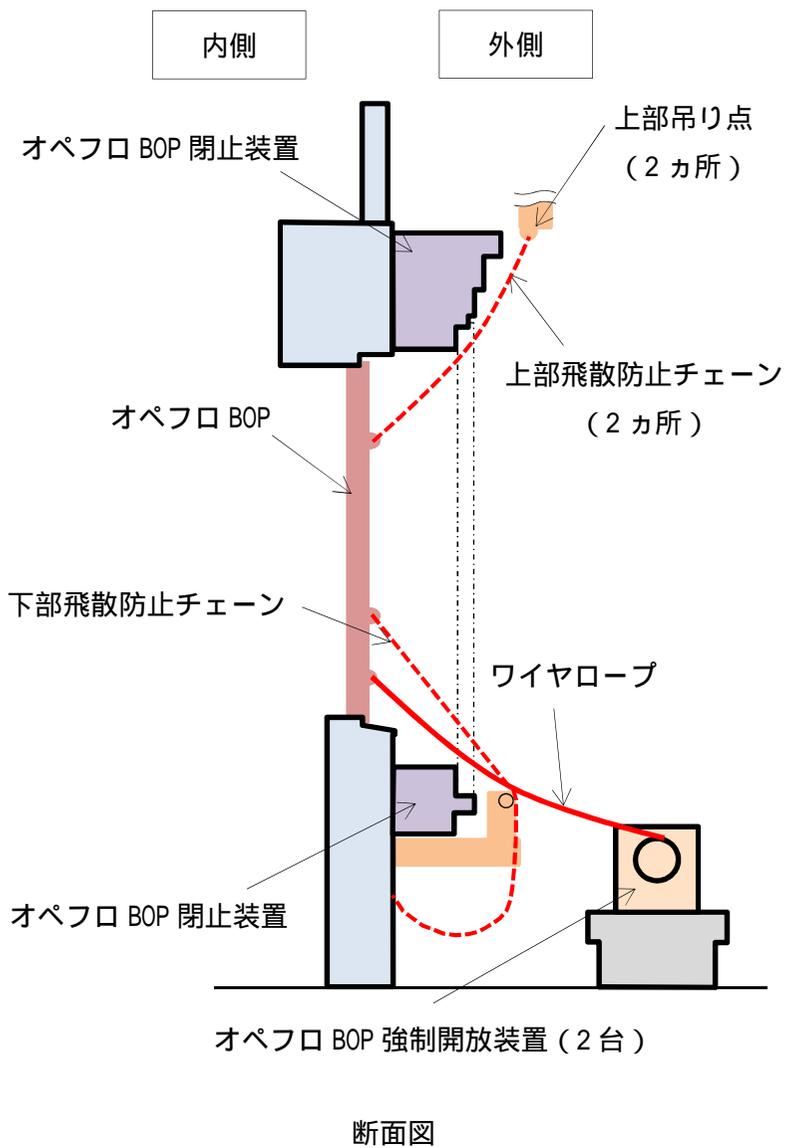


図 8-2 オペフロ BOP 閉止装置と強制開放装置の位置関係

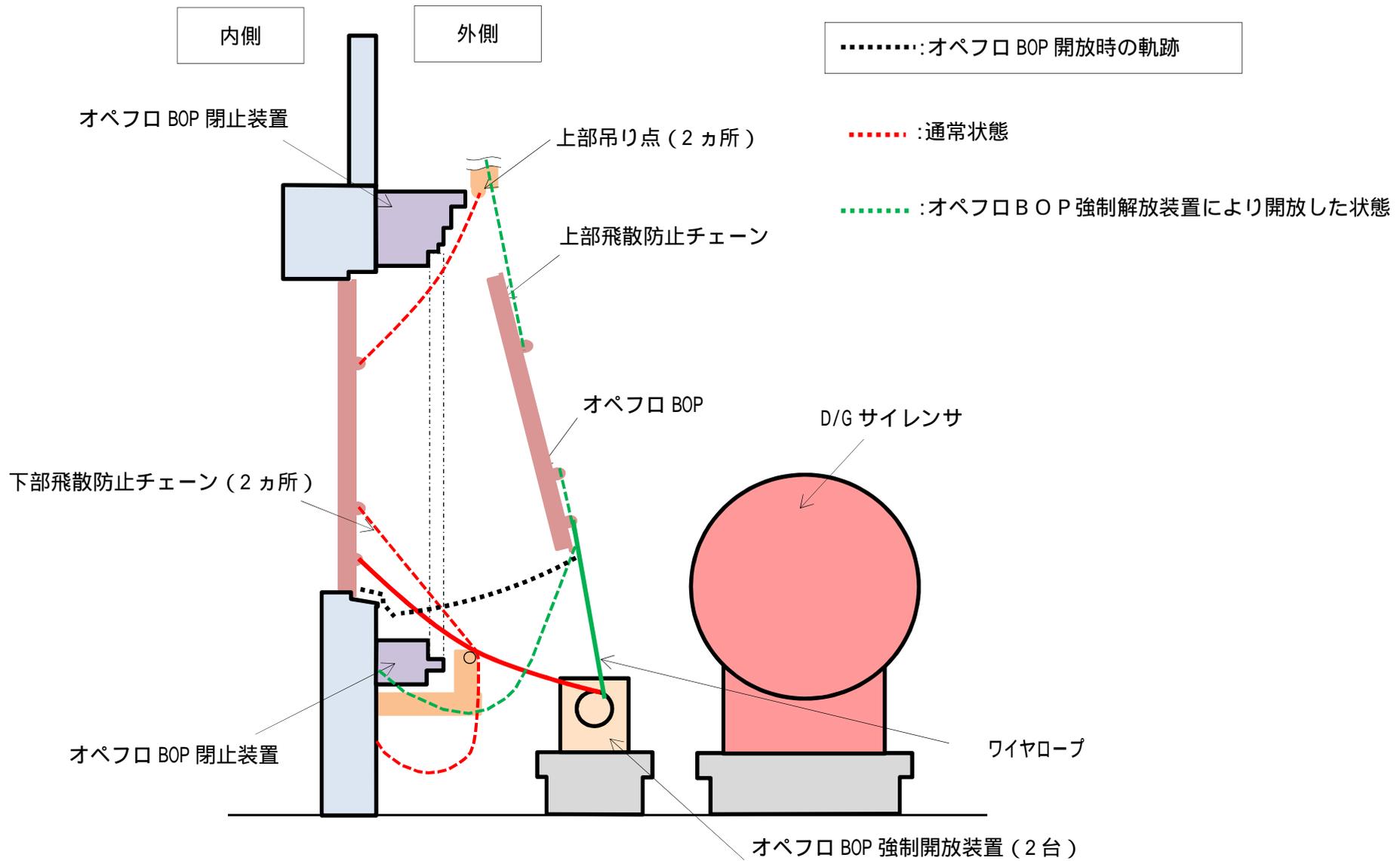


図 8-3 オペフロ BOP 強制開放装置により巻取り状態図

ブローアウトパネル関連設備の先行電力との差異について

1. 概要

ブローアウトパネル関連設備の先行電力との差異について説明する。

2. ブローアウトパネル関連設備の構成比較

ブローアウトパネル関連設備の構成比較について表 2-1 に示す。

表 2-1 ブローアウトパネル関連設備の構成比較

先行電力	柏崎刈羽 7 号機	差異の有無
原子炉建屋外側ブローアウトパネル	燃料取替床ブローアウトパネル	無
	主蒸気配管トンネル室ブローアウトパネル	有
ブローアウトパネル閉止装置	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置	無
ブローアウトパネル強制開放装置 (自主対策設備)	燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置 (自主対策設備)	無

2.1 差異箇所の詳細について

柏崎刈羽 7 号機には主蒸気配管トンネル室ブローアウトパネル（以下「MS トンネル室ブローアウトパネル」という。）があるが先行電力には設置されていない。先行電力は原子炉建屋 5 階及び 6 階にブローアウトパネルが□枚設置されており、主蒸気管破断事故時に発生する蒸気を全て原子炉建屋外側ブローアウトパネルで原子炉建屋外へ逃がす設計としているが、柏崎刈羽 7 号機では原子炉建屋 4 階に設置される燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という）4 枚及び原子炉建屋 1 階に設置される MS トンネル室 BOP79 枚により、主蒸気管破断事故時に発生する蒸気を原子炉建屋外へと逃がす設計としていることから相違しているものである。

3. オペフロ BOP の詳細設計に関する比較

先行電力で設置されている原子炉建屋外側ブローアウトパネルと柏崎刈羽 7 号機で設置するオペフロ BOP の設備詳細比較を表 3-1 に示す。

表 3-1 オペフロ BOP の設備詳細比較

項目	先行電力	柏崎刈羽 7 号機	差異の有無
パネル枚数	□	4 枚	有
設計差圧	□	3.43kPa	有
材料	□	SS400	無
作動方式	□	クリップ式（18 個（幅約 37.5mm を□個，幅約 75mm を□個）/ パネル）	有

クリップ仕様	<input type="text"/> <input type="text"/>	材質 SUS304，幅約 75 mm又は幅約 37.5 mm，厚さ約 <input type="text"/> mm	有
すべり台	無	有	有
コーキング有 無	パネル 4 辺をシール材により コーキング	パネル上部及び左右に水切り板 を設置し，その周囲 3 辺をコー キング	有

3.1 差異箇所の詳細について

(1) パネル枚数について

パネル枚数については 2.1 項でも前述の通り，柏崎刈羽 7 号機では主蒸気管破断事故時に蒸気を逃がす箇所が MS トンネル室側にも存在する為，設置枚数が減少している。

(2) 設計差圧について

設計差圧については 2.1 項でも前述の通り，柏崎刈羽 7 号機では主蒸気管破断事故時に蒸気を逃がす箇所が MS トンネル室側にも存在する為，オペフロ BOP まで到達する蒸気圧が低くなっており設計差圧が小さくなっている。

(3) クリップの個数について

クリップの個数については，弾性設計用地震動による地震力や設計差圧を考慮してクリップを左右対称に配置する観点から，上部 個（幅約 75mm のクリップ 個，幅 37.5mm のクリップ 個），下部 個（幅約 75mm のクリップ 個）としている。

(4) クリップ仕様について

クリップ仕様については先行電力では材質を としているが，耐食性の向上を目的として柏崎刈羽 7 号機では SUS304 に材質を変更している。

(5) すべり台について

パネルと躯体の摩擦力を低減させるため，パネル及び躯体にステンレス製のすべり台を 2 箇所設置している。

(6) コーキングについて

柏崎刈羽 7 号機では，実際に設置されている状況に合わせてパネル下部を除く 3 辺をシール材によりコーキングしている。

4. クリップ引張試験に関する比較

先行電力で実施されているクリップ引張試験と柏崎刈羽7号機で実施されているクリップ引張試験の比較を表4-1に示す。

表4-1 クリップの引張試験比較

項目	先行電力	柏崎刈羽7号機	差異の有無
試験方法	オートグラフ試験機 変位制御(引張速度 1mm/min) クリップ変位:変位計にて測定 ひずみ:ひずみゲージにて測定	オートグラフ試験機 変位制御(引張速度 2mm/min) クリップ変位:変位計にて測定 ひずみ:ひずみゲージにて測定	有
試験体数	30体	幅約75mm:3体 幅約37.5mm:3体	有

4.1 差異箇所の詳細について

(1) 試験方法について

引張速度は十分小さなひずみ速度となるようにするために設定するが、先行電力と柏崎刈羽7号機ではクリップの寸法が異なることから引張速度を変更している。

(2) 試験体数について

試験体数は柏崎刈羽7号機では、補足説明資料4-4に示すように弾性設計用地震動S_dによる地震力や設計開放圧力との間には余裕があり、また金属製品であり公差は小さくできることからJSME 設計・建設規格 SSB-3210 や建築構造部材の耐力試験等で一般的に用いられている3体としている。

5. オペフロ BOP の試験に関する比較

先行電力で実施されている原子炉建屋外側ブローアウトパネルの開放確認試験と柏崎刈羽7号機で実施されているオペフロ BOP の開放確認試験に関する比較を表5-1に示す。

表5-1 オペフロ BOP の開放確認試験比較

項目	先行電力	柏崎刈羽7号機	差異の有無
試験装置	油圧ジャッキ4体にて加力	油圧ジャッキ4体にて加力	無
試験回数	2回	3回	有
試験体数	3体	3体	無
試験用パネル	実機に設置されているパネルのうち、最大の物と同一	実機と同一	有
動作確認	目視にて開放を確認	目視にて開放を確認	無

5.1 差異箇所の詳細について

(1) 試験回数について

先行電力では、開放確認の1回とその再現性を確認するための1回の合計2回としている。柏崎刈羽7号機ではクリップ引張試験と同様に3回の試験をしている。

(2) 試験用パネルについて

試験用パネルについては先行電力では、実機に設置されているパネルサイズが数種類あり、そのうちの最大のものを採用しているのに対して、柏崎刈羽7号機ではパネルサイズが1種類であることから実機と同一としている。

6. 燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の詳細設計に関する比較

先行電力で設置されているブローアウトパネル閉止装置と柏崎刈羽第7号機で設置する燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置（以下「オペフロ BOP 閉止装置」という）の設備詳細比較を表 6-1 に示す。

表 6-1 オペフロ BOP 閉止装置の設備詳細比較

項目	先行電力	柏崎刈羽7号機	差異の有無
材料（扉）	□	□	無
台数	□	□	有
門の構造	電動シリンダ	電動シリンダ+シャフト □	有
門の作動方式（挿入時）	自重	自重+電動	有
門のギャップ	□	□	有
ハンガーレール	□	□	有
ガイドレール	□	□	有
テーパブロック	□	□	有
チェーン材料	□	□	有
作動方式	電動（手動）	電動（手動）	無
手動操作方式	ワイヤー	クランクハンドル	有

6.1 差異箇所の詳細について

(1) 材料について

チェーンに使用した材料は先行プラントの□から、柏崎刈羽7号機では耐候性を考慮して□に変更している。

(2) 台数について

台数については2.1項で前述の通り、ブローアウトパネルの枚数に違いがあり、柏崎刈羽7号機では4台となっている。

(3) 手動操作方式について

先行電力ではブローアウトパネル閉止装置の近傍にアクセスが難しいことからワイヤーを用いた遠隔操作で手動操作を行うこととしているが、柏崎刈羽7号機ではオペフロ BOP 閉止装置近傍までアクセス可能なことから電動機を直接クランクハンドルを用いて操作する手動操作方式としている。

(4) 門の構造について

先行電力及び柏崎刈羽7号機の門の構造を図-1に示す。先行電力では電動シリンダを上昇/下降させることで門機構部をガイドに沿って動作させる構造としているが、柏崎刈羽7号機では門機構部にシャフトを□追加することで、門ピンの挿入精度を向上させた。これにより、門のギャップも先行電力の□から柏崎刈羽7号機では□に変更している。

また、先行電力では電動シリンダを下降させることで、自重で門機構部が下降する構造としていたが、柏崎刈羽7号機では強制引込構造を追加することで、自重に加え、電動シリンダの動力で門機構部を強制的に下降させることも可能な構造に変更している。

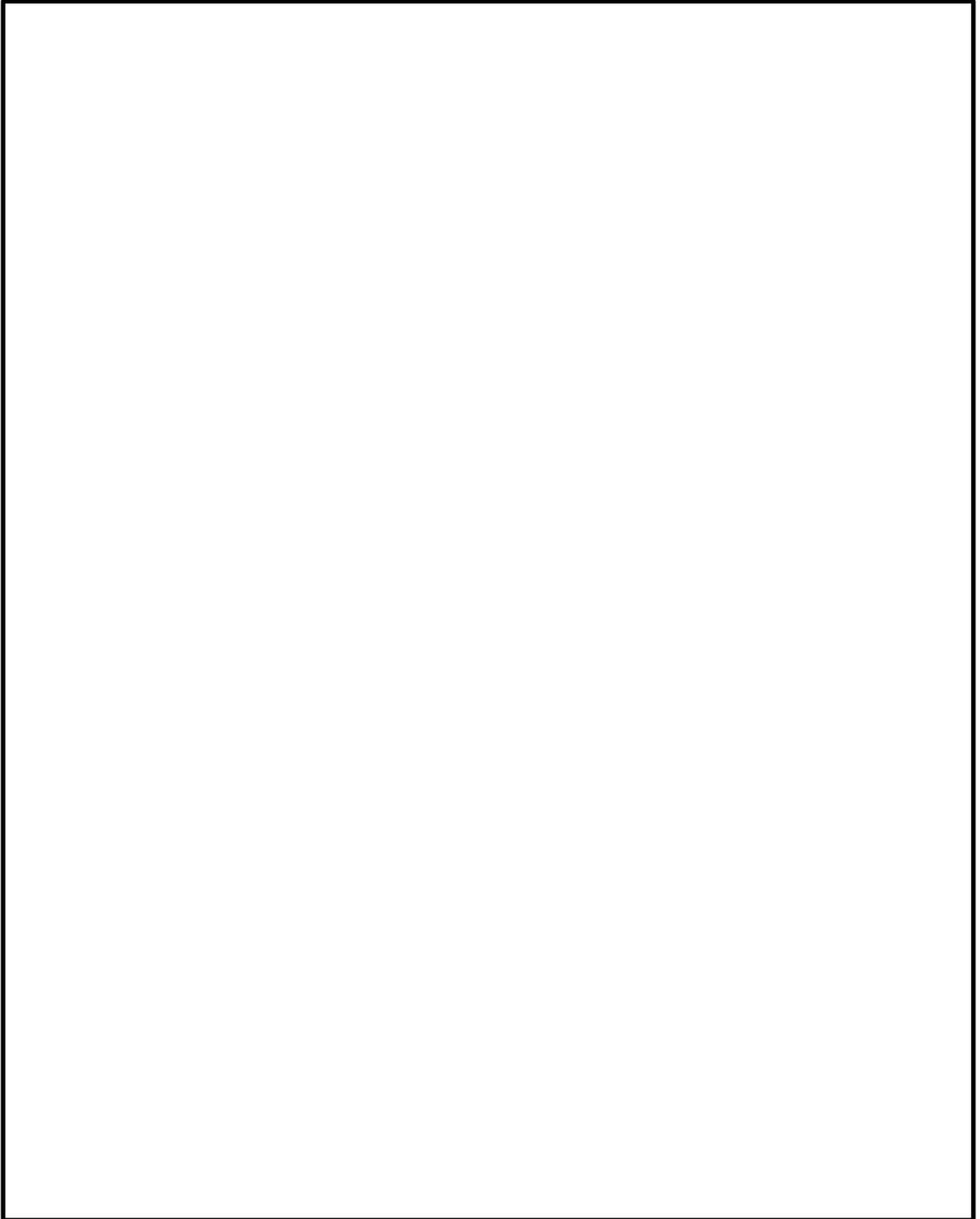


図 6-1 先行電力及び柏崎刈羽 7 号機の門の構造

(5) 部材の構造について

耐震性の向上を目的として、柏崎刈羽 7 号機のオペフロ BOP 閉止装置を構成する部材の一部寸法を先行電力のブローアウトパネル閉止装置から変更している。

7. オペフロ BOP 閉止装置の加振試験・気密試験に関する比較

先行電力で実施されているブローアウトパネル閉止装置の加振試験，気密試験と柏崎刈羽 7 号機で実施されているオペフロ BOP 閉止装置の加振試験，気密試験に関する比較を表 7-1 に示す。

表 7-1 オペフロ BOP 閉止装置の加振試験・気密試験比較

項目	先行電力	柏崎刈羽 7 号機	差異の有無
試験装置	3次元振動台（兵庫耐震工学研究センター）	3次元振動台（兵庫耐震工学研究センター）	無
加振波	オペフロ BOP 閉止装置設置高さより上方の床応答 建屋影響評価等のばらつきを包絡 減衰定数 <input type="text"/>	オペフロ BOP 閉止装置設置高さより上方の床応答 建屋影響評価等のばらつきを包絡 減衰定数 <input type="text"/>	無
振動特性把握試験	実施	実施	無
加振試験方法（扉開状態）	扉開状態加振後に扉閉動作 扉閉状態で気密試験 扉開動作・閉動作	扉開状態加振後に扉閉動作 扉閉状態で気密試験 扉開動作・閉動作	無
加振試験方法（扉閉状態）	扉閉状態加振 気密試験 扉開動作・閉動作	扉閉状態加振 気密試験 扉開動作・閉動作	無
加速度測定箇所	振動台 支持架台 扉 駆動装置	振動台 支持架台 扉 駆動装置	無
ひずみ測定箇所	プッシュローラ レール（ハンガーレール，下部ガイドレール） チェーン（エンドボルト） 門周辺	プッシュローラ レール（ハンガーレール，下部ガイドレール） チェーン（エンドボルト） 門周辺	無
加振後の作動確認（電動）	・扉の開閉，門の引抜/挿入を確認 ・電動機の電流値，扉及び門の動作時間を測定	・扉の開閉，門の引抜/挿入を確認 ・電動機の電流値，扉及び門の動作時間を測定	無
加振後の作動確認（手動）	・扉の開閉，門の引抜/挿入を確認	・扉の開閉，門の引抜/挿入を確認	無
加振後の機密性能試験方法	・ASTM E 283-4 に準じた装置を用いる。	・ASTM E 283-4 に準じた装置を用いる。	無

	・排風機により試験容器内の空気を排出することにより試験体前後に圧力差を生じさせ、試験体のシール部から試験容器へ流入する通気量を測定する。	・排風機により試験容器内の空気を排出することにより試験体前後に圧力差を生じさせ、試験体のシール部から試験容器へ流入する通気量を測定する。	
気密試験結果	通気量： <input type="text"/>	通気量： <input type="text"/>	有

7.1 差異箇所の詳細について

(1) 気密試験結果について

先行電力及び柏崎刈羽7号機のパッキン押え部の構造を図-2に示す。柏崎刈羽7号機では、パッキンのずれ防止を目的として、パッキン押え部に潰し代を設けた構造に変更したことにより、通気量が先行電力の通気量に比べ、小さな値となっている。しかし、いずれの結果も判定値に比べ十分小さい値となっていることから有意な差異ではない。



図 - 2 先行電力及び柏崎刈羽7号機のパッキン押え部の構造

8. 強制開放装置に関する比較

先行電力で設置されている強制開放装置と柏崎刈羽7号機で設置されているオペフロ BOP 強制開放装置に関する比較を表7-1に示す。

表 8-1 強制開放装置の性能確認試験比較

項目	先行電力	柏崎刈羽7号機	差異の有無
作動方式	油圧	電動駆動	有
台数	10	8	有

8.1 差異箇所の詳細について

- (1) 先行電力の強制開放装置は、各パネルに対し建屋内へ油圧式の強制開放装置を1台設置しパネルを押し出す方式としているが、柏崎刈羽7号機では各パネルに対し原子炉建屋外へ電動駆動のオペフロ BOP 強制開放装置を2台設置しパネルを引張る方式としている。主な目的として、原子炉建屋内には竜巻防護ネットが取付けられており、その干渉回避により原子炉建屋外にオペフロ BOP 強制開放装置を設置する必要があるため、先行電力と同様に原子炉建屋内からの油圧による押し出しでの強制開放が出来ないため、作動方式を変更している。また、強制開放時のパネルを可能な限り水平に開放させることを目的として台数を変更している。

-1-1-3-1-1 発電用原子炉施設に対する自然現象等による
損傷の防止に関する基本方針

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 自然現象	1
2.2 人為事象	1
2.3 外部からの衝撃より防護すべき施設	2
2.4 組合せ	3
3. 外部からの衝撃への配慮	3
3.1 自然現象	3
3.1.1 自然現象に対する具体的な設計上の配慮	4
3.2 人為事象	7
3.2.1 人為事象に対する具体的な設計上の配慮	7
4. 組合せ	11
4.1 自然現象の組合せについて	11
4.2 設計基準事故時又は重大事故等時の荷重の考慮について	15
4.3 組合せを考慮した荷重評価について	15

1. 概要

本資料は、自然現象等の外部からの衝撃への配慮について説明するものである。「实用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）」第5条及び50条（地震による損傷の防止）並びにその「实用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（以下「解釈」という。）」については、V-2「耐震性に関する説明書」にてその適合性を説明するため、本資料においては、地震を除く自然現象等の外部からの衝撃による損傷の防止に関する設計が、技術基準規則第6条、第51条（津波による損傷の防止）及び第7条（外部からの衝撃による損傷の防止）並びにそれらの解釈に適合することを説明し、技術基準規則第54条及びその解釈に規定される「重大事故等対処設備」を踏まえた重大事故等対処設備への配慮についても説明する。なお、自然現象の組合せについては、全ての組合せを網羅的に確認するため、地震を含めた自然現象について本資料で説明する。

2. 基本方針

2.1 自然現象

設計基準対象施設は、外部からの衝撃のうち自然現象による損傷の防止において、発電所敷地で想定される津波、風（台風）、竜巻、低温（凍結）、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響及び生物学的事象の自然現象（地震を除く。）又は地震を含む自然現象の組合せに遭遇した場合において、自然現象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件において、その安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他、供用中における運転管理等の運用上の適切な措置を講じる。

また、想定される自然現象（地震を除く。）に対する防護措置には、設計基準対象施設が安全性を損なわないために必要な設計基準対象施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含める。

重大事故等対処設備は、外部からの衝撃による損傷の防止において、V-1-1-7「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」に基づき、想定される自然現象（地震を除く。）に対して、位置的分散、環境条件等を考慮し、設計基準対象施設と同時に必要な機能が損なわれないよう、防護措置その他の適切な措置を講じる。

設計基準対象施設又は重大事故等対処設備に対して講じる防護措置として設置する施設は、その設置状況並びに防護する施設の耐震重要度分類及び重大事故等対処施設の設備分類に応じた地震力に対し構造強度を確保し、外部からの衝撃を考慮した設計とする。

2.2 人為事象

設計基準対象施設は、外部からの衝撃のうち人為による損傷の防止において、発電所敷地又はその周辺において想定される火災・爆発（森林火災、近隣工場等の火災・爆発、航空機墜落による火災）、有毒ガス、船舶の衝突及び電磁的障害により発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）以下「人為事象」という。）に対してその安全性が損なわれないよう、防護措置その他、対象とする発生源から一定の距離を置くことによる適切な措置を講じる。

また、想定される人為事象に対する防護措置には、設計基準対象施設が安全性を損なわない

ために必要な設計基準対象施設以外の施設又は設備等(重大事故等対処設備を含む。)への措置を含める。

想定される人為事象のうち、航空機の墜落については、防護設計の要否を判断する基準を超えないことを評価して設置(変更)許可を受けている。本工事計画認可申請時に、設置(変更)許可申請時から防護設計の要否を判断する基準を超えるような航空路及び航空機落下データの変更がないことを確認していることから、設計基準対象施設に対して防護措置その他の適切な措置を講じる必要はない。なお、定期的に航空路の変更状況を確認し、防護措置の要否を判断することを保安規定に定めて管理する。

航空機の墜落及び爆発以外に起因する飛来物については、発電所周辺の社会環境からみて、発生源が設計基準対象施設から一定の距離が確保されており、設計基準対象施設が安全性を損なうおそれがないため、防護措置その他の適切な措置を講じる必要はない。

重大事故等対処設備は、外部からの衝撃による損傷の防止において、-1-1-7「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」に基づき、想定される人為事象に対して、位置的分散、環境条件等を考慮し、設計基準対象施設と同時に必要な機能が損なわれないよう、防護措置その他の適切な措置を講じる。

設計基準対象施設又は重大事故等対処設備に対して講じる防護措置として設置する施設は、その設置状況並びに防護する施設の耐震重要度分類及び重大事故等対処施設の設備分類に応じた地震力に対し構造強度を確保し、外部からの衝撃を考慮した設計とする。

2.3 外部からの衝撃より防護すべき施設

設計基準対象施設が外部からの衝撃によりその安全性を損なうことがないように、外部からの衝撃より防護すべき施設は、設計基準対象施設のうち、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1、クラス2及びクラス3に属する構築物、系統及び機器とする。その上で、発電用原子炉を停止するため、また、停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能、又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器、並びに、使用済燃料貯蔵プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能、又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器として安全重要度分類のクラス1、クラス2及び安全評価上その機能に期待するクラス3に属する構築物、系統及び機器に加え、それらを内包する建屋を外部事象から防護する対象(以下「外部事象防護対象施設」という。)とする。また、外部事象防護対象施設の防護設計については、外部からの衝撃により外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼすおそれのある外部事象防護対象施設以外の施設についても考慮する。さらに、重大事故等対処設備についても、設計基準対象施設と同時に必要な機能が損なわれないよう、外部からの衝撃より防護すべき施設に含める。

上記以外の設計基準対象施設については、外部からの衝撃に対して機能を維持すること若しくは損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより、その安全性を損なわない設計とする。

また、自然現象のうち津波からの衝撃より防護すべき施設(以下「津波防護対象設備」とい

う。)については、技術基準規則第6条の解釈を踏まえ耐震Sクラスの施設(津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。)を含める。

外部事象防護対象施設の詳細については、-1-1-3-1-2「防護対象の範囲」に示す。

2.4 組合せ

地震を含む自然現象の組合せについて、外部事象防護対象施設及び重大事故等対処設備に影響を与えるおそれのある自然現象の組合せは、設置(変更)許可申請書において示すとおり、地震、津波、積雪及び火山の影響による荷重である。これらの組合せの中から、発電所の地学、気象学的背景を踏まえ、荷重の組合せを考慮する。

また、科学的技術的知見を踏まえ、外部事象防護対象施設及び重大事故等対処設備のうち、特に自然現象(地震を除く。)の影響を受けやすく、かつ、代替手段によってその機能の維持が困難であるか、又はその修復が著しく困難な構築物、系統及び機器は、建屋内に設置すること、又は可搬型重大事故等対処設備によるバックアップが可能となるように位置的分散を考慮して可搬型重大事故等対処設備を複数保管すること等により、当該施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象(地震を除く。)により作用する衝撃が設計基準事故時及び重大事故等時に生じる荷重と重なり合わない設計とする。

3. 外部からの衝撃への配慮

3.1 自然現象

外部事象防護対象施設及び重大事故等対処設備は想定される自然現象(地震を除く。)に対して、その安全性を損なうおそれがないよう設計するとともに、必要に応じて、運転管理等の運用上の措置を含む適切な措置を講じる。

設計上考慮する自然現象(地震を除く。)として、設置(変更)許可を受けた9事象に津波を含め、10事象とする。

- ・津波
- ・風(台風)
- ・竜巻
- ・低温(凍結)
- ・降水
- ・積雪
- ・落雷
- ・地滑り
- ・火山の影響
- ・生物学的事象

3.1.1 自然現象に対する具体的な設計上の配慮

(1) 津波

津波防護対象設備は、基準津波に対して、安全機能又は重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれることのないよう、津波の敷地への流入防止、漏水による安全機能又は重大事故等に対処するために必要な機能への影響防止、津波防護の多重化及び水位低下による安全機能又は重大事故等に対処するために必要な機能への影響防止を考慮した津波防護対策を講じる設計とする。

このため、外郭防護として、取水路、放水路等の経路からの津波を流入させない設計とするため、補機冷却用海水取水槽の上部床面に取水槽閉止板を設置する。

設計基準対象施設の津波防護対象設備(非常用取水設備を除く。)を内包する建屋及び区画については、津波による影響等から隔離可能な設計とするため、内郭防護として、タービン建屋内の区画境界部及び他の建屋との境界部に水密扉及び床ドレンライン浸水防止治具の設置並びに貫通部止水処置を実施する。

引き波時の水位の低下時は、水面が原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能水位を下回る可能性があることから、取水口前面の海中に海水貯留堰を設置し海水を貯留することで、原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能水位を下回らない設計とする。また、大容量送水車(熱交換器ユニット用)及び大容量送水車(海水取水用)の付属品である水中ポンプの取水可能水位を下回らない設計とする。

地震発生後、津波が発生した場合に、その影響を俯瞰的に把握するため、津波監視設備として、補機冷却用海水取水槽に取水槽水位計、7号機主排気筒に津波監視カメラを設置する。

詳細については、-1-1-3-2「津波への配慮に関する説明書」に示す。

(2) 風(台風)

外部事象防護対象施設は、設計基準風速(40.1m/s,地上高10m,10分間平均)による風荷重に対して、機械的強度を有することにより、安全機能を損なわない設計とする。

風(台風)に対する設計は、竜巻に対する設計の中で確認する。

重大事故等対処設備は、建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置するとともに、環境条件等を考慮することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

(3) 竜巻

外部事象防護対象施設は、設置(変更)許可を受けた最大風速92m/sの竜巻(以下「設計竜巻」という。)が発生した場合においても、竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた荷重等に対して安全機能を損なわないために、飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を講じる設計とする。

重大事故等対処設備は、建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。さらに、外部事象防護対象施設

に機械的，機能的及び二次的な波及的影響を及ぼす可能性がある施設の影響について考慮した設計とする。

詳細については， -1-1-3-3「竜巻への配慮に関する説明書」に示す。

(4) 低温（凍結）

外部事象防護対象施設は，設計基準温度（ - 15.2 ， 24 時間及び - 2.6 ， 173.4 時間）による低温（凍結）に対して，屋内設備については換気空調系により環境温度を維持し，屋外設備については保温等の凍結防止対策を必要に応じて行うことにより，安全機能を損なわない設計とする。

重大事故等対処設備は，建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置するとともに，環境条件等を考慮することにより，外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

(5) 降水

外部事象防護対象施設は，設計基準降水量（ 101.3mm/h ）の降水による浸水に対して，設計基準降水量を上回る排水能力を有する構内排水路による海域への排水及び建屋止水処置等を行うとともに，設計基準降水量の降水による荷重に対して，排水口による海域への排水を行うことにより，安全機能を損なわない設計とする。

重大事故等対処設備は，建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置するとともに，環境条件等を考慮することにより，外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

(6) 積雪

外部事象防護対象施設は，設計基準積雪量（ 167cm ）による積雪荷重に対して，機械的強度を有すること，また，閉塞に対して，非常用換気空調系の給・排気口を設計基準積雪量より高所に設置することにより，安全機能を損なわない設計とする。

積雪に対する設計は，同様な堆積荷重の影響を考慮する火山事象に対する設計の中で確認する。

重大事故等対処設備は，建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置するとともに，環境条件等を考慮すること，及び除雪を実施することにより，外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

なお，除雪を適宜実施することを保安規定に定めて管理する。

(7) 落雷

外部事象防護対象施設は，発電所の雷害防止対策として，原子炉建屋等への避雷針の設置を行うとともに，設計基準電流値（ 200kA ）による雷サージに対して，接地網の敷設による接地抵抗の低減等及び安全保護系への雷サージ侵入の抑制を図る回路設計を行うことにより，安全機能を損なわない設計とする。

重大事故等対処設備は、建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置するとともに、必要に応じ避雷設備又は接地設備により防護することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

(8) 地滑り

外部事象防護対象施設は、地滑りに対して、斜面からの離隔距離を確保し地滑りのおそれがない位置に設置することにより、安全機能を損なわない設計とする。

重大事故等対処設備は、建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

(9) 火山の影響

外部事象防護対象施設は、火山事象が発生した場合においても、その安全機能を損なわない設計とする。

将来の活動可能性が否定できない火山について、発電所の運用期間中の噴火規模を考慮して抽出した外部事象防護対象施設の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象は降下火砕物のみであり、設計に用いる降下火砕物特性は、設置（変更）許可を受けた層厚 35cm，粒径 8.0mm 以下，密度 1.5g/cm³（湿潤状態）の降下火砕物を考慮する。

降下火砕物による直接的影響及び間接的影響のそれぞれに対し、安全性を損なうおそれがない設計とする。

重大事故等対処設備は、建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

なお、降下火砕物を適宜除去することを保安規定に定めて管理する。

詳細については、-1-1-3-4「火山への配慮に関する説明書」に示す。

(10) 生物学的事象

外部事象防護対象施設は、生物学的事象に対して、海洋生物であるクラゲ等の発生を考慮し、また小動物の侵入を防止することにより、安全機能を損なわない設計とする。

海洋生物であるクラゲ等の発生に対しては、除塵装置を設置、除塵装置を通過する貝等の海洋生物に対しては、海水ストレーナを設置し、必要に応じて塵芥を除去することにより、原子炉補機冷却海水系等への侵入を防止し、安全機能を損なわない設計とする。さらに、定期的な開放点検及び清掃が可能な設計とする。

小動物の侵入に対しては、屋内設備は建屋止水処置等により、屋外設備は端子箱貫通部の閉止処置等を行うことにより小動物の侵入を防止し、安全機能を損なわない設計とする。

重大事故等対処設備は、生物学的事象に対して、小動物の侵入を防止し、海洋生物から影響を受けるおそれのある屋外の設備は多重性又は予備を有することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

3.2 人為事象

外部事象防護対象施設及び重大事故等対処設備は想定される人為事象に対して、その安全性を損なうおそれがないよう設計するとともに、必要に応じて、運転管理等の運用上の措置を含む適切な措置を講じる。

設計上考慮する人為事象として、設置（変更）許可を受けた4事象とする。

- ・火災・爆発（森林火災，近隣工場等の火災・爆発，航空機墜落による火災）
- ・有毒ガス
- ・船舶の衝突
- ・電磁的障害

なお，危険物を搭載した車両については，燃料輸送車両の火災・爆発として近隣工場等の火災・爆発及び有毒ガスの中で取り扱う。

航空機の墜落については、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」（平成21・06・25原院第1号）等に基づき評価した結果，約 3.4×10^{-8} 回/炉・年であり，防護設計の要否を判断する基準である 10^{-7} 回/炉・年を超えないことを設置（変更）許可において確認している。また，工事計画認可申請時において，航空路を含めた航空機落下確率評価に用いる最新データにおいて，防護設計の要否を判断する基準を超える変更がないことを確認している。

したがって，航空機の墜落については，設計基準対象施設に対して，防護措置その他の適切な措置を講じる必要はない。なお，定期的に航空路を含めた航空機落下確率評価に用いる最新データの変更状況を確認し，防護措置の要否を判断することを保安規定に定めて管理する。ただし，可搬型重大事故等対処設備に対しては航空機の墜落を考慮し，建屋内に設置するか，又は屋外において外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り複数箇所に分散して保管することにより，外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

3.2.1 人為事象に対する具体的な設計上の配慮

(1) 火災・爆発（森林火災，近隣工場等の火災・爆発，航空機墜落による火災）

a. 森林火災

人為事象として想定される森林火災については，延焼防止を目的とした，設置（変更）許可を受けた防火帯（約20m）を敷地内に設ける設計とする。

発電所周辺の植生を確認し，作成した植生データ等をもとに求めた，設置（変更）許可を受けた防火帯の外縁（火災側）における最大火線強度から算出される火炎輻射発散度（ 100kW/m^2 ）を設定し，外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度や建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度が許容温度となる危険距離を算出し，その危険距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

b. 近隣工場等の火災・爆発

(a) 石油コンビナート施設の火災・爆発

発電所敷地外 10km 以内の範囲において、石油コンビナート施設は存在しないため、火災・爆発による外部事象防護対象施設への影響については考慮する必要はない。

(b) 危険物貯蔵施設の火災

発電所敷地外半径 10km 以内の危険物貯蔵施設の火災については、貯蔵量等を勘案して外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度が許容温度となる危険距離及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度が許容温度となる危険距離を算出し、その危険距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

(c) 高圧ガス貯蔵施設の火災・爆発

発電所敷地外半径 10km 以内の高圧ガス貯蔵施設の火災については、貯蔵量等を勘案して外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度が許容温度となる危険距離及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度が許容温度となる危険距離を算出し、その危険距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

爆発については、貯蔵量等を勘案してガス爆発の爆風圧が 0.01MPa となる危険限界距離を算出し、その危険限界距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。また、ガス爆発による容器破裂時の破片の最大飛散距離を算出し、その最大飛散距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

(d) 燃料輸送車両の火災・爆発

発電所敷地外半径 10km 以内の燃料輸送車両の火災については、燃料積載量等を勘案して外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度が許容温度となる危険距離及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度が許容温度となる危険距離を算出し、その危険距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

爆発については、燃料積載量等を勘案してガス爆発の爆風圧が 0.01MPa となる危険限界距離を算出し、その危険限界距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。また、ガス爆発による容器破裂時の破片の最大飛散距離を算出し、その最大飛散距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

(e) 漂流船舶の火災・爆発

発電所敷地外で発生する漂流船舶の火災については、燃料積載量等を勘案して外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度が許容温度となる危険距離及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度が許容温度となる危険距離を算出し、その危険距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。

爆発については、燃料積載量等を勘案してガス爆発の爆風圧が 0.01MPa となる危険限界距離を算出し、その危険限界距離を上回る離隔距離を確保する設計とする。なお、ガス爆発による飛来物の影響については、柏崎刈羽原子力発電所に最も距離が近い航

路でも 30km 以上の離隔距離があり、漂流した船舶が発電所周辺まで流れ着いた後に爆発し、なおかつ爆発に起因した飛来物が発電用原子炉施設に衝突する可能性は非常に低いため、飛来物による外部事象防護対象施設への影響について考慮する必要はない。

(f) 発電所敷地内に設置する危険物タンク等の火災

発電所敷地内に設置する屋外の危険物タンク等の火災については、貯蔵量等を勘案して火災源ごとに外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度が許容温度となる危険距離及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度を算出し、許容温度を満足する設計とする。また、燃料補充用のタンクローリーの火災については、燃料補充時は監視人が立会を実施し、万一の火災発生時は速やかに消火活動を可能とする体制を構築することにより、外部事象防護対象施設へ影響を与えない設計とする。

c. 航空機墜落による火災

航空機墜落による火災については、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」(平成 21・06・25 原院第 1 号(平成 21 年 6 月 30 日原子力安全・保安院一部改正))により落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]となる面積及び離隔距離を算出し、外部事象防護対象施設への影響が最も厳しくなる地点で起こることを想定し、対象航空機の燃料積載量等を勘案して、対象航空機ごとに外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度を算出し、許容温度を満足する設計とする。

発電所敷地内に設置する危険物タンクの火災と航空機墜落による火災の重畳火災については、敷地内の危険物タンクの火災と航空機墜落による火災の評価条件により算出した輻射強度、燃焼継続時間等により、外部事象防護対象施設の受熱面に対し、最も厳しい条件となる火災源と外部事象防護対象施設を選定し、外部事象防護対象施設を内包する建屋の表面温度及び建屋を除く屋外の外部事象防護対象施設の温度を算出し、許容温度を満足する設計とする。

森林火災、石油コンビナート施設の火災、発電所敷地内に設置する危険物タンク等の火災、航空機墜落による火災等に伴うばい煙等発生時の二次的影響については、外気を取り込む空調系統、外気を設備内に取り込む機器及び室内の空気を取り込む機器に対し、ばい煙の侵入を防止するため適切な防護対策を講じることで、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

火災・爆発(森林火災、近隣工場等の火災・爆発、航空機墜落による火災)に対する重大事故等対処設備については、建屋内への設置又は外部事象防護対象施設及び同じ機能を有する他の重大事故等対処設備と位置的分散を図り設置するとともに、防火帯により防護することにより、外部事象防護対象施設の安全機能と同時にその機能を損なわない設計とする。

詳細については、「3.2.1(2) 有毒ガス」と合わせて V-1-1-3-5「外部火災への配慮に関する説明書」に示す。

(2) 有毒ガス

発電所の敷地及び敷地周辺の状況から想定される人為事象のうち、外部火災起因を含む有毒ガスが発生した場合には、中央制御室内に滞在する人員の環境劣化を防止するために設置した外気取入ダンパの閉止、中央制御室内の空気を循環させる再循環運転の実施及び中央制御室以外の空調ファンの停止により、有毒ガスの侵入を防止する設計とする。

なお、有毒ガスの侵入を防止するよう、外気取入ダンパの閉止、再循環運転の実施による外気の遮断及び空調ファンの停止による外気流入の抑制を保安規定に定めて管理する。

主要道路、鉄道路線、一般航路及び石油コンビナート施設は、発電所から離隔距離が確保されていることから、危険物を積載した車両及び船舶を含む事故等による有毒ガスを考慮する必要はない。

詳細については、「3.2.1(1) 火災・爆発（森林火災、近隣工場等の火災・爆発、航空機墜落による火災）」と合わせて V-1-1-3-5「外部火災への配慮に関する説明書」に示す。

(3) 船舶の衝突

発電所の周辺海域の船舶の航路としては、発電所に最も距離が近い航路でも 30km 以上の離隔距離があり、発電所から離れていること、また、小型船舶が発電所近傍で漂流した場合でも、防波堤等に衝突して止まることから取水性を損なうことはない。また、万が一防波堤を通過し、カーテン・ウォール前面に小型船舶が到達した場合であっても、深層から取水しているため、取水性を損なうことはない。

船舶の座礁により重油流出事故が発生した場合は、カーテン・ウォールにより、深層から取水することによって、非常用海水系の取水性を損なうことはない。また、必要に応じてオイルフェンスを設置する措置を講じる。

したがって、船舶の衝突によって取水路が閉塞することはなく、外部事象防護対象施設がその安全機能を損なうことはない。

重大事故等対処設備は、航路からの離隔距離を確保すること、小型船舶が発電所近傍で漂流した場合でも、防波堤等に衝突して止まること及び外部事象防護対象施設と位置的分散を図り設置することにより取水性を損なうことはない。

(4) 電磁的障害

安全機能を有する安全保護系は、電磁的障害による擾乱により機能が喪失しないよう、制御盤へ入線する電源受電部へのラインフィルタや絶縁回路の設置、外部からの信号入出力部へのラインフィルタや絶縁回路の設置によりサージ・ノイズの侵入による影響を防止するとともに、鋼製筐体や金属シールド付ケーブルの適用等により、電磁波の侵入を防止する設計としているため、外部事象防護対象施設及び重大事故等対処設備のうち電磁的障害に対する考慮が必要な機器がその安全性を損なうことはない。

4. 組合せ

4.1 自然現象の組合せについて

外部事象防護対象施設の安全性が損なわれないことを広く確認する観点から、地震を含めた自然現象の組合せについて、発電所の地学、気象学的背景を踏まえて検討する。

(1) 組合せを検討する自然現象の抽出

自然現象が外部事象防護対象施設に与える影響を考慮し、組合せを検討する自然現象を抽出する。

想定される自然現象のうち、外部事象防護対象施設に影響を与えるおそれのある自然現象の組合せは、設置（変更）許可申請書において示すとおり、地震、津波、積雪及び火山の影響による荷重であり、荷重以外の機能的影響については、自然現象の組合せにより外部事象防護対象施設の安全機能が損なわれないことを確認している。荷重の組合せを考慮する自然現象のうち、地震、津波及び火山の影響により発生する設計基準規模の荷重は、発生頻度が低い偶発的荷重であるが、発生すると荷重が比較的大きいことから、設計用の主荷重として扱う。これに対して規模の小さい地震及び積雪による荷重は、発生頻度が主荷重と比べて高い変動荷重であり、発生する荷重は主荷重と比べて小さいことから、従荷重として扱い、主荷重との組合せを考慮する。

なお、柏崎刈羽原子力発電所は多雪区域であることから、従荷重として扱う積雪とは別に、ベース負荷として日最深積雪量の平均値に当たる積雪荷重が常時加わることを考慮し、施設の形状、配置により適切に組み合わせる。

以下、主荷重同士の組合せ並びに主荷重、従荷重及び常時考慮する積雪荷重の組合せについて検討する。

(2) 主荷重同士の組合せについて

主荷重同士の組合せについて表4-1に示す。それぞれの組合せについては、従属事象、独立事象であるかを踏まえ、以下のとおりとする。

地震と津波

基準地震動 S_s の策定における検討用地震はF-B断層及び長岡平野西縁断層帯による地震である。これらの断層については、敷地に近い位置に存在し、地震波と津波は伝播速度が異なることから、両者の組合せを考慮する必要はない。

F-B断層及び長岡平野西縁断層帯の活動に伴い、津波を起こす地震が誘発される可能性については、仮に誘発地震の発生を考慮した場合においても、F-B断層及び長岡平野西縁断層帯の活動に伴う地震動が敷地に到達する地震発生後1分以内に、誘発地震に伴う津波が敷地に到達することはないことから、基準地震動 S_s による地震力と津波荷重の組合せを考慮する必要はない。

一方、津波波源の断層の活動により基準地震動 S_s の震源断層が誘発される可能性については、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域以外での規模の大きな地震事例から考えても、短時間で誘発されることは考えにくいことから、基準地震動 S_s による地震力

と津波荷重の組合せを考慮する必要はない。

地震と火山の影響

基準地震動 S_s の震源と火山とは十分な距離があることから、独立事象として扱い、各々の発生頻度が十分小さいことから、組合せを考慮する必要はない。

津波と地震

基準津波と組み合わせる基準地震動 S_s については のとおり。

基準津波と組み合わせる地震動に関しては、基準津波の波源の活動に伴い発生する可能性がある余震及び誘発地震を想定する。その大きさは弾性設計用地震動 S_d を下回るが、安全側に弾性設計用地震動 S_d のうち全ての周期帯において余震及び誘発地震による地震動を十分に上回る弾性設計用地震動 S_{d-1} による荷重を津波荷重に組み合わせる余震荷重として考慮する。

津波と火山の影響

基準津波の波源と火山とは十分な距離があることから、独立事象として扱い、各々の発生頻度が十分小さいことから、組合せを考慮する必要はない。

火山の影響と地震

火山の影響と組み合わせる基準地震動 S_s については のとおり。

火山性地震については、火山と敷地とは十分な距離があることから、火山性地震とこれに関連する事象による影響はないと判断し、火山と地震の組合せは考慮しない。ただし、火山の影響と独立事象ではあるが、発生頻度が比較的高く規模の小さい地震については火山の影響による荷重と同時に発生することを想定し、これらの組合せを考慮する。(設置変更許可申請書添付書類六「7.7.5.7 火山性地震とこれに関連する事象」参照)

火山の影響と津波

火山の影響と組み合わせる基準津波については のとおり。

敷地周辺において、火山現象による歴史津波の記録は知られておらず、海底火山の存在も認められないため、火山事象に起因する津波について、敷地への影響はないと判断し、津波と火山の組合せは考慮しない。(設置変更許可申請書添付書類六「7.7.5.5 津波及び静振」参照)

(3) 組合せを検討する主荷重と従荷重の規模について

組み合わせる荷重の規模は、設置(変更)許可申請書において示すとおり、基本的には単純性・保守性のために、主荷重[設計基準規模]×従荷重[年超過確率 10^{-2} 規模]の組合せを想定した上で、荷重の大小関係や影響度合いに応じて代表性のある組合せのケースを検討し、防護措置その他、運用上の措置を適切に考慮して評価する条件を設定する。

(4) 主荷重，従荷重及び常時考慮する積雪荷重の組合せについて

自然現象の組合せについて，(1)，(2)，(3)及び設置(変更)許可申請書に示す内容を踏まえ，主荷重，従荷重及びベース負荷として常時考慮するとした積雪荷重の組合せについて検討する。

a. 荷重の性質

主荷重及び従荷重の性質を表4-2に示す。荷重の大きさについては，主荷重は従荷重と比較して大きく，主荷重が支配的となる。最大荷重の継続時間については，地震及び津波は最大荷重の継続時間が短い。これに対し，火山の影響及び積雪は，一度事象が発生すると，降下物が降り積もって堆積物となり，長時間にわたって荷重が作用するため，最大荷重の継続時間が長い。発生頻度については，主荷重は従荷重と比較して発生頻度が非常に低い。

上記の荷重の性質を考慮して，主荷重，従荷重及び常時考慮する荷重の組合せについて検討する。

b. 火山の影響による荷重と地震荷重又は積雪荷重の組合せ

火山の影響と地震については，降下火砕物による荷重の継続時間が他の主荷重と比較して長いこと，発生頻度が比較的高く，荷重の大小関係等の観点で代表性のある地震荷重を適切に組み合わせる。同様に，火山の影響と積雪については，降下火砕物による荷重の継続時間が他の主荷重と比較して長く，積雪荷重の継続時間も長いことから，施設の形状及び配置に応じて適切に組み合わせる。従荷重として組み合わせる地震及び積雪荷重の規模は，それぞれ年超過確率 10^{-2} 相当地震動，建築基準法の多雪区域における地震荷重と積雪荷重の組合せの考え方よりも保守的な値である，柏崎市における1日当たりの積雪量の年超過確率 10^{-2} 規模の値(84.3cm)とし，これらの値にベース負荷である常時考慮するとした積雪量(31.1cm)を合算し組合せとして考慮する。ただし，火山の影響及び積雪については，除灰・除雪による緩和措置が図られる場合にはその運用上の措置を踏まえた荷重を用いる。

c. 地震荷重と積雪荷重の組合せ

地震と積雪については，地震荷重の継続時間は短い，積雪荷重の継続時間が長いこと，組合せを考慮し，施設の形状及び配置に応じて適切に組み合わせる。従荷重として組み合わせる積雪荷重の規模は，建築基準法の多雪区域における地震荷重と積雪荷重の組合せの考え方よりも保守的な値である，柏崎市における1日当たりの積雪量の年超過確率 10^{-2} 規模の値(84.3cm)とし，この値にベース負荷である常時考慮するとした積雪量(31.1cm)を合算した115.4cmを組合せとして考慮する。ただし，積雪については，除雪による緩和措置が図られる場合にはその運用上の措置を踏まえた荷重を用いる。

d. 津波荷重と地震（余震）荷重又は積雪荷重の組合せ

津波と地震については，基準津波の継続時間のうち最大水位変化を生起する時間帯を踏まえ，余震発生の可能性に応じて適切に組み合わせる。従荷重として組み合わせる地震（余震）荷重の規模は，基準津波の波源を震源とする余震及び基準津波の波源の活動に伴い発生する可能性のある誘発地震を想定するが，その大きさを十分に上回る弾性設計用地震動 S_d-1 とし，この値にベース負荷である常時考慮するとした積雪量(31.1cm)を合算し組合せとして考慮する。

津波と積雪については，津波荷重の継続時間は短い，積雪荷重の継続時間が長い，ため組合せを考慮し，施設の形状及び配置に応じて適切に組み合わせる。従荷重として組み合わせる積雪荷重の規模は，建築基準法の多雪区域における地震荷重と積雪荷重の組合せの考え方よりも保守的な値である，柏崎市における1日当たりの積雪量の年超過確率 10^{-2} 規模の値(84.3cm)とし，この値にベース負荷である常時考慮するとした積雪量(31.1cm)を合算した115.4cmを組合せとして考慮する。ただし，積雪については，除雪による緩和措置が図られる場合にはその運用上の措置を踏まえた荷重を用いる。

以上の検討内容について整理した結果を，表4-3に示す。

(5) 自然現象の組合せの方針

自然現象の組合せについて，火山の影響については地震（年超過確率 10^{-2} 相当地震動）と積雪，基準地震動 S_s については積雪，基準津波については弾性設計用地震動 S_d-1 と積雪の荷重を，施設の形状及び配置に応じて考慮する。

組み合わせる主荷重と従荷重の規模は，基本的には主荷重[設計基準規模] × 従荷重[年超過確率 10^{-2} 規模]の組合せを想定する。

従荷重として組み合わせる地震 積雪深の大きさはそれぞれ年超過確率 10^{-2} 相当地震動，柏崎市における1日当たりの積雪量の年超過確率 10^{-2} 規模の値84.3cmとし，また，従荷重とは別に，ベース負荷として日最深積雪量の平均値に当たる積雪量31.1cmを考慮する。

4.2 設計基準事故時又は重大事故等時の荷重の考慮について

外部事象防護対象施設のうち、建屋内に設置される外部事象防護対象施設については、建屋によって地震を除く自然現象の影響を防止できることから、建屋内に設置されている外部事象防護対象施設は、地震を除く自然現象の荷重が外部事象防護対象施設に影響を与えることはなく、設計基準事故が発生した場合でも、地震を除く自然現象による影響はない。

また、外部事象防護対象施設のうち、屋外に設置されている外部事象防護対象施設としては、軽油タンク等があるが、これらの機器については、設計基準事故が発生した場合でも、ポンプの運転圧力や温度等が変わらないため、設計基準事故時荷重が発生するものではなく、自然現象による衝撃と重なることはない。

重大事故等対処設備のうち、建屋内に設置される重大事故等対処設備については、建屋によって地震を除く自然現象の影響を防止できることから、地震を除く自然現象の荷重が重大事故等対処設備に影響を与えることはなく、重大事故等が発生した場合でも、地震を除く自然現象による影響はない。

また、重大事故等対処設備のうち、屋外に設置される重大事故等対処設備について、設計上考慮する自然現象及び人為事象と重大事故等時の荷重の組合せを表 4-4 に示す。設計上考慮する自然現象及び人為事象のうち、事象により重大事故等対処設備への荷重による影響を考慮するものは、地震、津波、風（台風）、竜巻、降水、積雪、地滑り、火山の影響である。これらのうち、風（台風）は他の自然現象の評価に包絡されるため、単独での評価は実施しない。さらに、津波に対しては津波高さを考慮した重大事故等対処設備の配置、竜巻に対しては重大事故等対処設備の位置的分散を考慮した配置、降水に対しては構内排水路等による雨水が滞留しない設計、積雪に対しては重大事故等対処設備の除雪、地滑りに対しては地滑り影響箇所を考慮した重大事故等対処設備の配置、火山の影響に対しては重大事故等対処設備の除灰をそれぞれ行うことにより、重大事故等が発生した場合でも、重大事故等時の荷重と地震を除く自然現象による衝撃を同時に考慮する必要はない。

したがって、地震を除く自然現象による衝撃と設計基準事故又は重大事故等時の荷重は重なることはない。

4.3 組合せを考慮した荷重評価について

自然現象の組合せによる荷重、設計基準事故又は重大事故等時に生じる荷重、その他、常時作用する荷重(自重等)、運転時荷重の組合せについては、表 4-5 に示す説明書にて評価する。

表 4 - 1 主荷重同士の組合せ

		後発事象		
		地震	津波	火山の影響
先発事象	地震			
	津波			
	火山の影響			

注：丸数字は、「4.1(2) 主荷重同士の組合せについて」の対応番号を示す。

表 4 - 2 主荷重及び従荷重の性質

荷重の種類		荷重の大きさ	最大荷重の 継続時間	発生頻度 (/年)
主荷重	地震	特大	短 (90 秒程度)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
	津波	特大	短 (15 分程度)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
	火山の影響	大	長 (30 日程度) *1	$1.0 \times 10^{-4} \sim$ *2
従荷重	地震	小	短 (90 秒程度)	1.0×10^{-2} *3
	積雪	小	長 (30 日程度) *1	1.0×10^{-2} *3

注記 *1：必要に応じて緩和措置を行う。

*2：発電所運用期間中に噴火の可能性のある火山に関して、発電所敷地周辺の地層調査で観測されたテフラは数万年前のものであるから、 $1.0 \times 10^{-4} \sim$ /年相当とした。

*3：100 年再現期待値

表 4 - 3 主荷重、従荷重及び常時考慮する積雪荷重の組合せ

			主荷重 (主事象)		
			地震	津波	火山の影響
従荷重 (副事象)	地震	継続時間	短 + 短	短 + 短	長 + 短
		荷重の大きさ	特大 + 小	特大 + 小	大 + 小
		組合せ	*1	*2	*3
	積雪	継続時間	短 + 長	短 + 長	長 + 長
		荷重の大きさ	特大 + 小	特大 + 小	大 + 小
		組合せ *4, *5			
ベース負荷 (平均規模)	積雪	組合せ *4, *5	(常時)	(常時)	(常時)

注記 *1：同時に発生するものではないため組合せは考慮しない。

*2：基準津波と余震荷重の組合せを考慮する。

*3：火山の影響と年超過確率 10^{-2} 相当地震動の組合せを考慮する。

*4：施設の形状、配置により適切に考慮する。

*5：耐震・強度評価に用いる堆積荷重は、除灰・除雪により除去される堆積物を考慮した荷重を用いる。

表 4 - 4 屋外に設置する重大事故等対処設備に対して設計上考慮する自然現象及び人為事象と重大事故等時の荷重の組合せ

自然現象及び人為事象	荷重の発生	重大事故等時の荷重の考慮	荷重の組合せ
地震		重大事故等時の荷重を考慮する。	
津波		津波高さを考慮した重大事故等対処設備の配置により、重大事故等時の荷重を考慮する必要はない。	×
風（台風）		竜巻の影響による荷重の考慮に包含される。	×
竜巻		重大事故等対処設備の分散配置により、重大事故等時の荷重を考慮する必要はない。	×
低温（凍結）	×		×
降水		構内排水路や排水口により雨水が滞留しない設計のため、重大事故等時の荷重を考慮する必要はない。	×
積雪		重大事故等対処設備の除雪を行うことから、重大事故等時の荷重を考慮する必要はない。	×*
落雷	×		×
地滑り		地滑り地形を考慮した重大事故等対処設備の配置により、重大事故等時の荷重を考慮する必要はない。	×
火山の影響		重大事故等対処設備の除灰を行うことから、重大事故等時の荷重を考慮する必要はない。	×
生物学的事象	×		×
森林火災	×		×
近隣工場等の火災・爆発	×		×
航空機墜落による火災	×		×
有毒ガス	×		×
船舶の衝突	×		×
電磁的障害	×		×

注記*：除雪による除去がし難いと考えられるような構造や配置の施設については、ベース負荷にあたる積雪荷重の組合せを適切に考慮する。

表 4 - 5 自然現象の組合せによる荷重，設計基準事故又は重大事故等時に生じる荷重，常時作用する荷重（自重等），運転時荷重の組合せ

添付書類	自然現象の組合せ				設計基準事故時の荷重	重大事故等時の荷重	常時作用する荷重（自重等）	運転時荷重
	地震	津波	火山の影響	積雪				
-2 耐震性に関する説明書				*2				
-1-1-3-2 津波への配慮に関する説明書 *4	*1			*2				
-1-1-3-4 火山への配慮に関する説明書 *4	*3		*2	*2				

：荷重評価における主荷重 ：主荷重に対して組合せを考慮する荷重

注記 *1：基準津波と余震荷重の組合せでは，弾性設計用地震動 S d -1 を考慮する。

*2：施設の形状及び配置により適切に考慮する。

*3：火山の影響と地震荷重の組合せでは，年超過確率 10^{-2} 相当地震動を考慮する。

*4：計算方法，計算結果については， -3 「強度に関する説明書」 に示す。

-1-1-3-1-2 防護対象の範囲

目 次

1. 概要	1
2. 防護対象の範囲	1
2.1 技術基準規則の要求について	1
2.2 安全評価において考慮する安全機能	1
2.3 外部からの衝撃より防護すべき施設の範囲	1

1. 概要

本資料は、設計基準対象施設が自然現象等によりその安全性を損なわないという技術基準の要求を満足させるために必要な安全機能を確認し、それらの安全機能が自然現象等により損なわれないために、防護すべき施設について説明するものである。

2. 防護対象の範囲

2.1 技術基準規則の要求について

「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）」第6条及び第7条並びにそれらの「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（以下「解釈」という。）」においては、設計基準対象施設が自然現象等によりその安全性を損なわないことが要求されている。この要求を満足させるためには、通常運転時だけでなく、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故時においても発電用原子炉施設の安全性を確保する必要がある。

設置（変更）許可申請書添付書類十において、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づき行った運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故時の安全評価（以下「安全評価」という。）では、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故として想定される事象に対して解析を行い、いずれの事象についても判断基準を満足しており、発電用原子炉施設の安全性が確保されることを確認している。

したがって、安全評価において考慮する安全機能が自然現象等により損なわなければ、「運転時の異常な過渡変化」及び「設計基準事故」時においても発電用原子炉施設の安全性を確保することができ、技術基準規則第6条及び第7条並びにそれらの解釈の要求を満足することができる。

2.2 安全評価において考慮する安全機能

安全評価では、表2-1及び表2-2に示す安全機能を考慮して解析を行った結果、発電用原子炉施設の安全性が確保されることを確認している。

安全評価において期待する安全機能は、原則として「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されている安全重要度分類のMS-1又はMS-2に属するものである。しかしながら、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の付録解説に示すとおり、MS-3に属する安全機能のうち表2-1及び表2-2に示す安全機能については、信号の多重化により作動系に高い信頼性を有するものとして考慮している。

2.3 外部からの衝撃より防護すべき施設の範囲

設計基準対象施設が外部からの衝撃によりその安全性を損なうことがないように、外部からの衝撃より防護すべき施設は、設計基準対象施設のうち「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されている安全重要度分類のクラス1、クラス2及びクラス3に属する構築物、系統及び機器とする。

表 2 - 1 運転時の異常な過度変化の解析において考慮する安全機能

分類	機能	構築物，系統又は機器
MS-1	原子炉の緊急停止機能	制御棒及び制御棒駆動系 (スクラム機能)
	未臨界維持機能	制御棒及び制御棒駆動系 (未臨界維持機能)
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系
MS-2		
MS-3	原子炉圧力の上昇の緩和機能	主蒸気逃がし安全弁(逃がし弁機能) タービンバイパス弁
	出力上昇の抑制機能	原子炉冷却材再循環系 (再循環ポンプトリップ機能) 原子炉核計装 (起動領域モニタ(原子炉周期短制御棒引抜阻止機能)及び制御棒引抜監視装置)
	原子炉冷却材再循環ポンプの電源の確保機能	原子炉冷却材再循環ポンプ MG セット

表 2 - 2 設計基準事故の解析において考慮する安全機能

分類	機能	構築物，系統又は機器
MS-1	原子炉の緊急停止機能	制御棒及び制御棒駆動系（スクラム機能）
	未臨界維持機能	制御棒及び制御棒駆動系（未臨界維持機能）
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	主蒸気逃がし安全弁（安全弁としての開機能）
	原子炉停止後の除熱機能	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード） 原子炉隔離時冷却系 主蒸気逃がし安全弁（手動逃がし機能） 自動減圧系（手動逃がし機能）
	炉心冷却機能	低圧注水系（残留熱除去系低圧注水モード） 高圧炉心注水系 原子炉隔離時冷却系 自動減圧系
	放射性物質の閉じ込め機能 放射線の遮蔽及び放出低減機能	格納容器 格納容器隔離弁（主蒸気隔離弁を含む） 主蒸気流量制限器 格納容器スプレイ冷却系（残留熱除去系格納容器スプレイ冷却モード） 原子炉建屋原子炉区域 非常用ガス処理系 可燃性ガス濃度制御系 主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能）
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系
	安全上特に重要な関連機能	非常用電源設備
MS-2	放射性物質放出の防止機能	気体廃棄物処理施設の隔離弁 主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能以外）
MS-3	異常状態の把握機能	放射線監視設備の一部 （気体廃棄物処理系設備エリア排気放射線モニタ）

工事計画に係る説明資料
(発電用原子炉施設に対する自然現象等による
損傷の防止に関する説明書)

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 外部事象の重畳の考え方について
2. 自然現象の組合せによる荷重の考え方について
3. 積雪について
4. 航空機落下確率評価について

1. 外部事象の重畳の考え方について

1. 外部事象の重畳の考え方について

設計上考慮すべき事象として設定した 61 事象に地震,津波を加えた 63 事象に対する「単一の事象における評価基準の重畳への適合性」の確認結果を踏まえて整理を行い,重畳を考慮すべき事象として 32 事象が抽出された。抽出された 32 事象同士の重畳を考慮した場合に,発電用原子炉施設に与える影響パターンの分類を行い,詳細評価が必要となった発電用原子炉施設への影響が想定される組合せについては個別に評価を実施し,問題ないことを確認している。

なお,詳細評価のうち荷重評価については,荷重の大きさ等の観点で代表性のある,地震,津波*,積雪,火山の組合せに対して影響評価を実施し,評価結果については,-2「耐震性に関する説明書」及び -3「強度に関する説明書」に示す。(重畳の考え方及び詳細評価が必要と判断された組合せの評価結果については「別紙 - 1」を,組合せ荷重の考え方については「2. 自然現象の組合せによる荷重の考え方について」を参照)

注記* : 津波を含む荷重の組合せの詳細については,資料 2「津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料」参照

□ : 設置変更許可まとめ資料「第6条：外部からの衝撃による損傷の防止」より抜粋

添付資料 17

重畳の考え方について

1.1 検討対象

1.1.1 検討対象事象

検討対象とする外部事象は、文献より集約、整理した 83 事象（自然現象 55 事象、人為事象 28 事象）から類似事象・随伴事象の観点で設計上考慮すべき事象を整理した 61 事象（自然現象 42 事象及び人為事象 19 事象）に対して、地震、津波を加えた 63 事象とする。

1.1.2 単一の事象における評価基準の重畳検討への適合性

単一の自然現象/人為事象として一次評価で評価基準 A~D と判定された事象についても、重畳を考えた場合にはプラントの安全性に影響を及ぼす可能性があるため、検討対象の評価基準を見直す。単一の自然現象/人為事象で設定した評価基準及び重畳の検討への適用性について表 1 に示す。また、人為事象のうち、意図的事象については重畳の検討の対象外とする。基準 D については、対象事象のうち他事象との相関性（1.2.1 節で検討）が存在する場合に留意する。

表 1 評価基準の重畳検討への適用性

評価基準	重畳への適用性検討
基準 A プラントに影響を与えるほど接近した場所で発生しない。	○：発生しない事象については重畳検討においても考慮する必要がない。
基準 B ハザードの進展・襲来が遅く、事前にそのリスクを予知・検知し、ハザードを排除できる。	×：他事象の影響により進展・襲来が早くなる可能性がないか、また予知・検知・排除が困難な状況とならないか検討する。
基準 C プラント設計上、考慮された事象と比べて、設備等への影響度が同等若しくはそれ以下、又は、プラントの安全性が損なわれない。	×：影響度が他事象以下であっても、重畳を考慮する場合には他事象にその影響度が上乗せされるため、検討する必要がある。
基準 D 影響が他の事象に包絡される。	△：基本的には包絡される他事象において検討するが、他事象との相関性や新たな影響モードの発生については適切に考慮する。

検討対象とした外部事象のうち、表 1 の評価基準に該当する事象は以下のとおり。

基準 A

自然 [雪崩]、[結氷板]、[流水]、[氷壁]、[砂嵐]、[洪水]、[池・河川の水位低下]、[河川の迂回]、
[干ばつ]、[隕石]、[衛星の落下]、[土石流]
人為 [航空機落下]、[ダムの崩壊]、[パイプライン事故]、[タービンミサイル]

基準 D

自然 [ひょう]、[あられ]
→衝突影響について、[竜巻]にて評価。
[吹風]、[雨氷]、[みぞれ]、[氷晶]
→増積荷重の影響については[積雪]や[火山]に包絡される。閉塞（空調）の影響については[積雪]に包絡される。

6 条-別添 1(外事)-1-添付 17-1

【極限的な圧力(気圧高/気圧低)】

→気圧差による影響については【竜巻】に包絡される。

【高潮】、【波浪】、【風津波】、【静振】

→高潮(風津波)は耐津波設計において考慮されている。波浪、静振の影響は一時的であるため、防潮堤の設計津波に対する余裕や降水の影響評価で包絡できる。

【海水中の地滑り】

→第5条(津波による損傷の防止)において【津波】事象として考慮。

【地面隆起(相対的な水位低下)】、【泥湧出】

→基礎地盤安定性において評価されている。地面隆起に伴い海面が相対的に下降するが、潮位変化による取水への影響はない。影響モードについては、【地震】事象として考慮。

【地下水(多量/枯渇)】

→土壌に地下水が浸透することにより、地滑りや建屋への浸水が考えられるが、地滑りについては、【地滑り】にて考慮し、浸水については、【地下水による浸食】にて考慮。なお、地下水を水源とした設備はないことから、枯渇による影響はない。

人為【産業施設の事故】、【輸送事故】

→【火災・爆発】、【有毒ガス】において評価。

【油流出】

→【火災・爆発】、【船舶の衝突】において評価。

1.1.3 重畳検討対象の抽出結果

抽出された、重畳の検討対象となる自然現象及び人為事象を以下の表 2 に示す。

表 2 重畳検討対象

No.	自然現象	No.	自然現象
1	地震	18	土の伸縮
2	津波	19	海岸浸食
3	降水	20	地下水による浸食
4	積雪	21	森林火災
5	霜、霜柱	22	生物学的事象
6	風(台風)	23	塩害、塩雲
7	竜巻	24	太陽フレア、磁気嵐
8	霧、露		
9	高温	No.	人為事象
10	低温(凍結)	1	火災・爆発
11	高温水(海水温高)	2	有毒ガス
12	低温水(海水温低)	3	船舶の衝突
13	落雷	4	電磁的障害
14	火山	5	サイト内外での掘削
15	地滑り	6	内部溢水
16	海水中の地滑り	7	重量物輸送
17	土地の浸食、カルスト	8	化学物質の放出による水質悪化

6条-別添1(外事)-1-添付17-2

1.2 事象の特性の整理

1.2.1 相関性のある自然現象の特定

自然現象は、特定の現象がほかの現象を誘発したり、同様の原因（低気温時に頻発等）を有したりする等の因果関係を有し、同時期に発生する事象群が存在する。これらの相関性を持つ自然現象を特定する。相関性のある自然現象を抽出した結果を表 3 に示す。

表 3 相関性のある自然現象

相関タイプ	自然現象（※可能性のある最大の組み合わせ）
①低温系	[積雪], [雪崩], [霜, 霜柱], [低温], [低温水] ----- ([氷風, 雨氷, みぞれ], [氷晶])*1
②高温系	[高温], [高温水]
③風水害系	[降水], [風(台風)又は[竜巻]*2], [落雷], [地下水による浸食] ----- ([高潮], [波浪], [風津波], [静振])*3, [極限的な圧力(気圧高/気圧低)] *4, [地下水(多量枯渇)]
④地震系(津波)	[地震], [津波] ----- ([地面隆起(相対的な水位低下)], [海水中の地滑り])*5
⑤地震系(火山)	[地震], [火山]*6

*1 [氷風, 雨氷, みぞれ], [氷晶]は、包絡されているとしている積雪と同じ相関タイプに分類されることから、最も影響が厳しい積雪で代表して考慮する。

*2 [風(台風)]と[竜巻]は、特定の箇所に同時に負荷がかからないため、どちらか一方のみを考慮する。

*3 [高潮], [波浪], [風津波], [静振]は、包絡されているとしている津波と異なり、台風等との相関性が存在する。ただし、規模の大きな事象を想定した場合も止水対策の設計余裕の範囲内であると考え、津波で代表して評価する。

*4 [極限的な圧力(気圧高/気圧低)]については、包絡されているとしている竜巻と同じ相関タイプに分類されることから、影響が厳しい竜巻で代表して考慮する。

*5 [地面隆起(相対的な水位低下)], [海水中の地滑り]については、それぞれ包絡されているとしている地震、津波と同じ相関タイプに分類されることから、地震と津波の影響評価の中で考慮する。

*6 火山性地震の場合の、火山と地震を想定する。

1.2.2 影響モードのタイプ分類

組み合わせを検討するに当たって、自然現象の影響モードを表 4 の 4 つのタイプに分類する(図 1 参照)。ただし、表 4 で分類されている自然現象は現象毎に大枠で分類したものであり、実際に詳細検討する際には各現象の影響モード毎に検討する(1.3.2 節)。

ここで生物学的事象については、海生生物(くらげ等)と齧歯類(ネズミ等)で影響タイプが異なるため、分けて考慮する。

表 4 影響モードのタイプ分類

影響タイプ	特性	現象
コンスタント型, 季節型	年間を通してプラントに影響を及ぼすような自然現象 (ただし, 常時負荷がかかっているわけではない)。若しくは特定の季節で恒常的な自然現象。	[降水], [風(台風)], [積雪], [霧, 霜柱], [霧, 霏], [高温], [低温(凍結)], [高温水(海水温高)], [低温水(海水温低)], [生物学的事象(くらげ等)], [地下水による浸食]
持続型	恒常的ではないが, 影響が長期的に持続するような自然現象。影響持続時間が長ければ数週間に及ぶ可能性があるもの。	[火山]
瞬間型	瞬間的にしか起こらないような自然現象。影響持続時間が数秒程度 (長くても数日程度) のもの。	[地震], [津波], [竜巻], [落雷], [地滑り], [海中の地滑り], [森林火災], [生物学的事象(ネズミ等)], [太陽フレア, 磁気嵐]
緩慢型	事象進展が緩徐であり, 発電所の運転に支障をきたすほどの短時間での事象進展がないと判断される自然現象。	[土地の浸食, カルスト], [土の伸縮], [海岸浸食], [塩害, 塩雲]

※ 複数の型が該当する自然現象は, 保守的な型を割り当てる。(上側が保守的)
 例えば風(台風)について, 風圧力は瞬間型だが, 作業性等の検討においては定常的な負荷が想定されるため, コンスタント型に分類

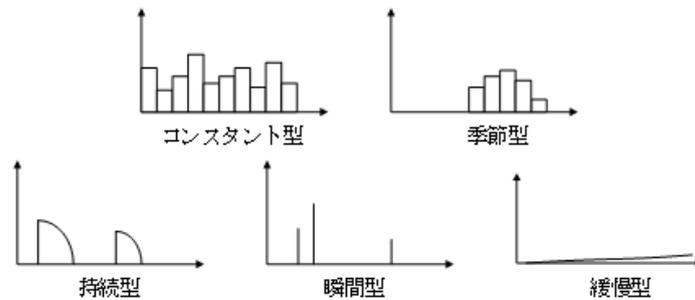


図 1 影響モード分類

1.3 重畳影響分類

1.3.1 重畳影響分類方針

自然現象の組み合わせについては、以下のような点で画一的な整理（検討除外基準の設定等）が難しいことから、1.1.3節で抽出された事象の全ての組み合わせに対して網羅的に検討を実施する。

・例えば瞬間型同士の重畳については、同時に発生する可能性が極めて小さいことから基本的には重畳を考慮する必要がないが、影響モードや評価対象設備によっては影響持続時間が長くなることもあるため、個別に検討が必要となる。（例：竜巻の直接的な影響は瞬間型だが、竜巻により避雷鉄塔が壊れた場合には避雷鉄塔が修復されるまで影響が持続する。そのため、竜巻と落雷は両方とも瞬間型に分類されるが、重畳を考慮する必要がある。）

また、組み合わせを考慮する事象数、規模、及び相関性をもつ自然現象への配慮について以下に示す。

1.3.1-1 事象数

影響が厳しい事象が重畳することは稀であることから、基本的には2つの事象が重畳した場合の影響を検討する。ただし、発生頻度が高い事象については、考慮する組み合わせに関係なく、ベースとして負荷がかかっている状況を想定する（図2参照）。例えば、地震と火山の組み合わせを考慮する場合も、ベース負荷として積雪や降水の影響についても考慮する。

ただし、1.2.1節で示した、相関性のある低温系、高温系、風水害系、地震系については、それぞれが同時に発生しているものとして考慮する。

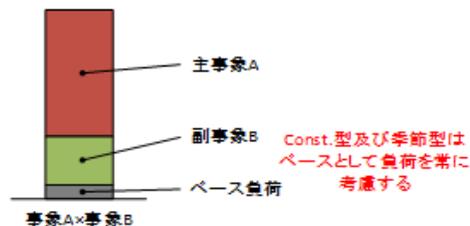


図2 ベース負荷の考え方

1.3.1-2 規模

組み合わせる事象の規模については、基本的には単純性・保守性のために、主事象として設計基準で想定している規模、副事象として年超過確率 10^{-2} （プラント寿命期間を考慮して設定）の規模の事象を想定する。ただし、随件事象等の相関性が高い事象の組み合わせについては、設計基準規模の事象同士が重畳することを考慮する。

上記の相関性が低い事象の組み合わせの規模の考え方については、Turkstra規則よりも保守的な設定[※]としている。Turkstra規則の考え方は、建築基準法や、土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」、国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」、ANSI(米国国家規格協会)等で採用されている。Turkstra規則は主たる作用（主事象）の最大値と従たる作用（副事象）の任意時点の値の和として作用の組み合わせを考慮する。

※Turkstra規則はもともと、従たる作用は平均的な値（例えば、地震×積雪を考慮する場合に、地震荷重を S_e とすると、積雪増積荷重は平均積雪深）を想定しているため、年超過確率 10^{-2} の規模は保守側である（添付資料15「4. 重畳評価の保守性について」参照）。

1.3.1-3 相関性をもつ自然現象への配慮

1.3.1-1 節のとおり、相関性をもつ自然現象は同時に発生することを想定し、相関性をもつ事象のセット+他事象の組み合わせを考慮する。

相関性をもつ事象のセット+他事象を検討するための前処理として、相関性をもつ事象のセット内で、単一事象時に想定している影響モード以外の新たな影響モードの有無、及び増長されるモードの有無を確認し、特別な配慮が必要か検討した結果を以下に示す。

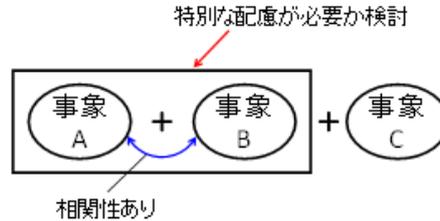


図 3 相関性をもつ自然現象への配慮

①低温系、②高温系

雪崩とひょう、あられは特定の箇所に同時に負荷がかからない。そのほかの事象については、それぞれが異なる影響モード（表 5 参照）であることから重畳した場合も影響が増長するような影響モードは存在せず、新たな影響モードについても起こり得ない。

表 5 低温系、高温系の影響モード

自然現象		影響モード
低温系	[積雪]	堆積荷重
	[雪崩]	衝突荷重*
	[ひょう, あられ]	衝突荷重*
	[霜, 霜柱]	-
	[低温(凍結)]	外気温度低(凍結)
	[低温水(海水温低)]	-
高温系	[高温]	外気温度高(冷却機能低下:空調)
	[高温水(海水温高)]	海水温度高(冷却機能低下:海水系)

* 衝突荷重は特定の箇所に同時に負荷がかからない。

③風水害系

風水害系の影響モードを表 6 に示す。竜巻に伴う止水対策（水密扉等）への影響については、設計基準竜巻に対して機能が損なわれない設計とする。竜巻に伴う落雷対策への影響については、避雷鉄塔が倒壊する可能性があるが、落雷以外の事象への影響は存在しない（他事象との重畳を評価する際には考慮不要）。

表 6 風水害系の影響モード

自然現象		影響モード
風水害系	[降水]	浸水, 堆積荷重
	[風(台風)]	風圧荷重*, 取水口閉塞
	[竜巻]	風圧荷重, 気圧差荷重, 飛来物衝突荷重, 取水口閉塞
	[落雷]	雷サージ&誘導電流
	[地下水による浸食]	地盤不安定, 浸水

* 風(台風)と竜巻は同じ風圧荷重の影響モードが存在するが、竜巻評価における基準風速策定の際に用いている風速データについては風(台風)の影響を含んだ値となっていることから、風(台風)の組み合わせ荷重については竜巻評価に包絡されている。

④地震系(津波)

地震に伴う津波については、止水対策等により安全機能が損なわれない設計とする(第5条耐津波設計方針で説明)。

⑤地震系(火山)

地震系(火山)の影響モードを表7に示す。火山性地震における、火山のプラントへの影響については、地震の本震と同時にプラントに襲来する可能性は低く、ある程度の時差をもって襲来するものと思われる。また、火山性地震についてはそのほかの地震源による地震よりも大幅に危険性が低いことが評価されており(火山影響評価で実施)、プラントへの地震動による影響は無視できる。

表 7 地震系(火山)の影響モード

自然現象		影響モード
地震系(火山)	[地震]	地震荷重, 地盤沈下, 地面隆起(相対的な水位低下)
	[火山]	堆積荷重, 取水口閉塞, 空調閉塞, 腐食, 相間短絡

以上より、相関性をもつ事象のセットについて、単一事象時に想定している影響モード以外の新たな影響モードがないこと、及び増長されるモードが存在しないことが確認されたため、相関性をもつ事象のセット+他事象での増長する影響を確認する際に、相関性をもつ事象について特別に配慮する必要はない。

1.3.1-4 影響パターン

組み合わせを考慮した場合に発電用原子炉施設に与える影響パターンを以下の 3 つの観点で分類した。

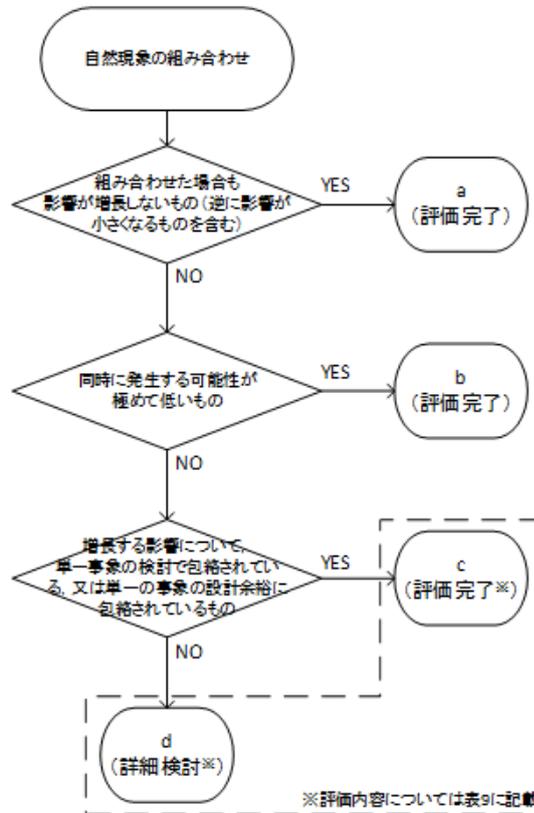
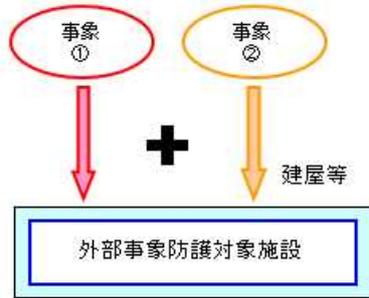


図 4 影響パターン選定フロー

上記 a, b に該当する自然現象の組み合わせについては、安全施設の安全機能が損なわれない。

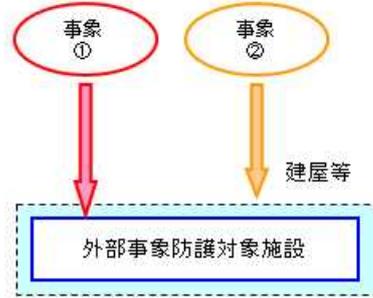
上記 c, d に該当する自然現象の組み合わせについては、事象が単独で発生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組み合わせとなるが、その増長する影響パターンについては図 5 のとおり 4 つに分類した。

I. 各事象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース



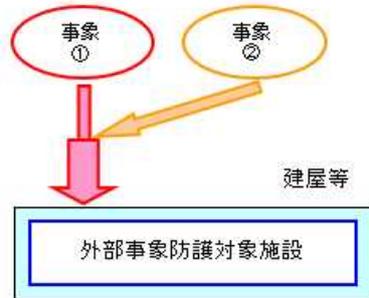
例：積雪+降下火砕物=堆積荷重増

II. 事象②によって外部事象防護対象施設を外部事象から防護する建屋等が機能喪失することにより、事象①の影響が増長するケース



例：地震+津波
=地震により止水機能が喪失して浸水量増

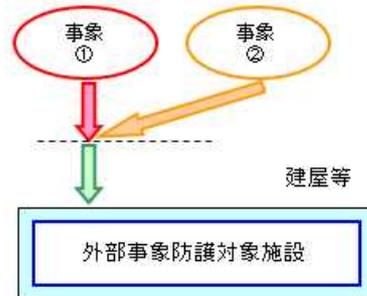
III-1. 他事象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース



例：降下火砕物+降水
=密度増による堆積荷重増

例：森林火災+強風
=風速増による火線強度増

III-2. 他事象の作用により影響が及ぶようになるケース



例：降下火砕物+降水
=斜面に堆積した降下火砕物が大量の降水で滑り、衝撃荷重発生

図 5 重畳による増長パターン分類

1.3.2 重畳影響分類結果

事象の重畳影響について1.3.1に基づき、a, b, c, dに分類（c, dについては更にI, II, III-1, III-2に分類）した結果について表 8に示す。

表 8 自然現象 / 人為事象の重畳 マトリックス (3/3)

No.	事象	事象	No.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32		
			事象	海岸浸食	森林火災	生物学的事象	塩害、塩害	太陽フレア、磁気嵐	火災・爆発	有毒ガス	船舶の衝突	電磁的障害	サイト内外での掘削		内部溢水	重量物輸送	化学物質の放出による水質悪化	
			損傷・機能喪失モード	冷却機能低下:海水系	熱影響 外気取入機器及び人への影響	閉塞(取水) 個別機器の損傷	腐食	誘導電流	熱影響 外気取入機器及び人への影響	人への影響	閉塞(取水)	電磁的影響	ケーブル・配管損傷	斜面倒壊	被水・没水	燃料集合体落下、重機転倒	冷却効率低下	腐食
		損傷・機能喪失モード																
1	地震	荷重(地震荷重)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		地盤沈下(変位)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		地面隆起(相対的な水位低下)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
2	津波	泥湧出	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		荷重(衝突) 懸架物・波力	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
3	降水	浮力	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		閉塞(取水) 懸架物・海底砂移動	a	a	a	d()	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a		
		冷却機能低下:海水系	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
4	風(台風)	浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		荷重(風圧)	a	d(-1)	d(-1)	a	a	a	c(-1)	c(-1)	a	a	a	a	a	a		
5	竜巻	閉塞(取水)	a	a	a	d()	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a		
		荷重(風圧)	a	b	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a		
		荷重(気圧差)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
6	落雷	荷重(衝突)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		閉塞(取水)	a	a	a	d()	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a		
		雷サージ&誘導電流	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a		
7	地下水による浸食	地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
8	積雪	相間短絡	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		閉塞(空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
9	霧、霜柱	-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		低温(凍結)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		外気温度低(凍結)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
10	低温系	低温(海水低温)	-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		高温	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
		外気温度高(冷却機能低下:空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
11	高温系	高温	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		海水温度高(冷却機能低下:海水系)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
12	霧、露	荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		閉塞(取水)	a	a	a	d()	a	a	a	a	b	a	a	a	a			
		閉塞(空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
13	火山	腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
		相間短絡	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
		水質汚染	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
14	地滑り	大気汚染	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
		荷重(衝突)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
		閉塞(取水)	a	a	a	d()	a	a	a	a	b	a	a	a				
15	海中の地滑り	地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a			
		土の伸縮	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
16	土の伸縮	海岸浸食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		冷却機能低下:海水系	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		熱影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
17	森林火災	外気取入機器及び人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		閉塞(取水)	a	a	a	a	a	a	a	a	d()	a	a	a				
		個別機器の損傷	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
18	生物学的事象	腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		誘導電流	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		太陽フレア、磁気嵐	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
19	火災・爆発	熱影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		外気取入機器及び人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
20	有毒ガス	閉塞(取水)	a	a	a	d()	a	a	a	a	a	a	a	a				
		電磁的影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		ケーブル・配管損傷	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
21	船舶の衝突	斜面倒壊	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		被水・没水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		燃料集合体落下、重機転倒	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
22	電磁的障害	冷却効率低下	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				
		化学物質の放出による水質悪化	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a				

資料 1 - 1 - 13

1.4 個別評価

プラントへの影響が想定される重畳（1.3.2でc,dに分類されたもの）について、個別に検討を実施する。ここで、「重畳の結果を個別に評価するもの」、「他の重畳事象で代表させるもの」、「単一の事象の検討で包絡されている、若しくは単一の事象の設計余裕に包絡されているもの（1.3.2のe）」に整理し検討する。（例：積雪+降水の堆積荷重は、積雪+火山の堆積荷重以下であることからそちらで代表させる。）

検討結果を表 9に示す。荷重評価については、荷重の大きさ等の観点で代表性のある、地震、積雪、火山の組み合わせに対して影響評価を実施し、問題ないことを確認した。

6条-別添1(外事)-1-添付 17-13

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (1/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
1	地震(地震荷重)×積雪(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地震又は積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で地震が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →評価対象施設に対する影響評価を実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 15)
2	地震(地震荷重)×火山(堆積) ※ベース負荷として積雪(堆積)及び降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地震又は火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に降下火砕物が堆積している状態で地震が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →評価対象施設に対する影響評価を実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 15)
3	風(風荷重)×積雪(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、風又は積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で風が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.1,2で代表(添付資料 15)
4	風(風荷重)×火山(堆積) ※ベース負荷として積雪(堆積)及び降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、風又は火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に降下火砕物が堆積している状態で風が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.1,2で代表(添付資料 15)
5	積雪(堆積)×火山(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(I)	安全施設は、積雪又は火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に降下火砕物と積雪が同時期に堆積した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →火山において評価
6	積雪(堆積)×降水(堆積)	d(I, Ⅲ-1)	安全施設は、積雪又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で雨水が染み込むことにより荷重増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.5(水分を含む)で代表

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (2/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
7	火山(堆積)×降水(堆積)	d(I, III-1)	安全施設は、火山又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に降水火砕物が堆積している状態で雨水が染み込むことにより荷重増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.5(水分を含む)で代表
8	竜巻(衝突)×地震(地震荷重)	d(II)	安全施設は、竜巻又は地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震により竜巻対策である固縛器具が破損した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →固縛器具が破損した場合は、安全上支障のない期間で復旧するものとする。
9	低温(凍結)×地震(地震荷重)	d(II)	安全施設は、低温又は地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震により常用換気空調系が破損した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →常用換気空調系が破損する規模の地震が発生した場合には、プラントは自動停止している可能性が極めて高く、また自動停止しない場合も低温影響については進展が緩やかであることからスクリーニングアウト。
10	落雷(雷サージ&誘導電流)×地震(地震荷重)	d(II)	安全施設は、落雷又は地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →避雷鉄塔が破損する規模の地震が発生した場合には、プラントは自動停止している可能性が極めて高いことからスクリーニングアウト。また、避雷鉄塔に期待しない場合の落雷による影響評価についても実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 16)
11	落雷(雷サージ&誘導電流)×風(風圧)	d(II)	安全施設は、落雷又は風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、風の影響等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.10で代表

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (3/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
12	落雷(雷サージ&誘導電流)×竜巻(衝突)	d(Ⅱ)	安全施設は、落雷又は竜巻が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、竜巻の飛来物等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.10 で代表
13	落雷(雷サージ&誘導電流)×津波(波力等)	d(Ⅱ)	安全施設は、落雷又は津波が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、津波の波力等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.10 で代表
14	地下水による浸食(浸水)×地震(地震荷重)	d(Ⅱ)	安全施設は、地下水又は地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震荷重により排水設備が損壊した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
15	地下水(浸水)×降水(浸水)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地下水又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、雨水により地下水量が増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
16	積雪(相関短絡)×降水(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、積雪又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降水により雪が湿った場合、相関短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相関短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから積雪・降水の影響は受けないため、対応可能。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (4/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
17	積雪(相間短絡)×火山(相間短絡)	d(I)	安全施設は、積雪又は火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降下火砕物火山と積雪が同時期に堆積した等で相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから積雪・降下火砕物の影響は受けないため、対応可能。
18	火山(相間短絡)×降水(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、火山又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降水により降下火砕物が湿った場合、相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから降下火砕物・降水の影響は受けないため、対応可能。
19	積雪(空調)×火山(空調)	d(I)	安全施設は、積雪又は火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、積雪と降下火砕物が同時期に堆積した場合、非常用換気空調系への影響が増長し、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →堆積高さで厳しいのは、主事象が積雪(設計基準 167cm)、副事象が火山(VEI4 3.5cm)の組み合わせ(合計 170.5cm)となるが、その場合も非常用換気空調系給・排気口(一番低い箇所の地上高 2.8m)まで達しない。
20	地滑り(衝突)×積雪(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地滑り又は積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、雪が堆積した状態で地滑りが発生した場合、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑りの規模が増大することが考えられるが、周辺斜面と建屋については、十分の裕度を持った距離が保たれている。
21	地滑り(衝突)×降水(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地滑り又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地滑りが発生した際に雨水で地面が湿っている場合、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.20 と同様

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (5/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パター ン)	検討結果
22	火山(増積)×降水(増積)	d(Ⅲ-2)	安全施設は、火山又は降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。降下火砕物が雨水により湿ることで地滑りのような状況が発生する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑り評価で代表する。
23	低温(凍結)×風(風圧)	c(Ⅲ-1)	安全施設は、低温又は風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、低温状態で風が発生した場合に熱伝達の変化が想定され、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →低温(単独)の評価条件において風速は15m/s(淡水貯水池は3.1m/s)を仮定し、24時間の影響評価を実施している。対して年超過確率 10^{-2} の規模は、最大風速(10分間平均)で新潟市27.9m/s、上越市19.5m/sとなるが、以下の理由で低温(単独)の評価条件で十分包絡されるものとする。 ・台風を除いて、低温(単独)の評価条件を超えるような風が長期間継続することは考えにくい。 ・台風については、発生時期が6~10月に集中することから低温が重畳する可能性は小さい。 ・低温(単独)の風速以外の評価条件において土からの放熱に期待しない等の保守性を有している。 ・淡水貯水池については、低温(単独)の評価条件と年超過確率 10^{-2} の規模との差が大きいものの、凍った場合も代替設備により対応可能。
24	火災・爆発(熱影響等)×風(風圧)	c(Ⅲ-1)	安全施設は、火災・爆発又は風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、火災発生時に風が発生した場合に風速・風向による火災熱影響の評価条件の変化が想定され、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →森林火災等ではガイドに基づき10m/sの風速により評価を実施している。年超過確率 10^{-2} の規模は、最大風速(10分間平均)で新潟市27.9m/s、上越市19.5m/sとなるが、単一の評価条件における保守性(風向設定、温度設定、湿度設定等)や影響継続時間(長くても数時間程度の火災影響時に最大風速が発生する可能性は小さい)を考慮すると、影響が及ぶ可能性は極めて小さいと考えられる。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (6/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
25	風 (風圧) × 竜巻 (風圧等)	c (I)	安全施設は、風又は竜巻が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、台風等により気圧分布が形成されている状況で竜巻が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →設計竜巻設定の際に使用している観測データは、風の影響についても含んだデータとなっていることから竜巻評価に包絡されている、又は設計竜巻設定の際の余裕に包絡されているものと考えられる。
26	内部溢水 (被水・没水) × 地震 (地震荷重)	c (III-1)	安全施設は、溢水又は地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、溢水対策等が地震により損傷した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
27	取水口閉塞関係 例：風×生物学的事象 (くらげ等)	d (I)	安全施設は、生物学的事象等が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、台風等で飛来物が発生した際に同時期にくらげが発生した場合等に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →事象単独の場合と比較して、作業量が増加するおそれがあるが、除塵装置や既に整備された手順等と同様の対応により対処可能である。

2. 自然現象の組合せによる荷重の考え方について

2. 自然現象の組合せによる荷重の考え方について

「1. 外部事象の重畳の考え方について」において抽出された組合せによる荷重の考え方について以下に示す。

2.1 積雪と降下火砕物との重畳の考え方について

設備影響評価における降下火砕物の条件としては、想定される降下火砕物の層厚を 35cm と設定している。また、設計基準における積雪の条件は、規格・基準類として、建築基準法及び同施行令第 86 条第 3 項に基づく新潟県建築基準法施行細則で定められている積雪量、観測記録として、柏崎市に設置されている気象庁地域気象観測システム（アメダス）に記録されている日降雪量の最大値、及び観測記録をもとに算出した年超過確率結果を参照し、設計基準積雪量を 167cm（ベース負荷を含む。）と設定している。（年超過確率に基づき想定する積雪量は、「3. 積雪について」に基づき算出）

一方、火山（降下火砕物）と積雪は相関性が低い事象の組合せであるため、重畳を考慮する際は、Turkstra 規則を適用する。Turkstra 規則の考え方は、建築基準法や、土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」、国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」、ANSI（米国国家規格協会）等で採用されている。Turkstra 規則は、主たる作用（主事象）の最大値と、従たる作用（副事象）の任意時点の値（平均値）の和として作用の組合せを考慮する。単純性・保守性のために、主事象は設計基準で想定している規模、副事象はプラント寿命期間中に発生し得る程度の規模（年超過確率 10^{-2} ）を想定する。この想定は、副事象として想定すべき任意時点の値（平均値）より厳しい値を想定することとなるため、保守性があると考えられる。

以上の考えをもとに、設計基準で想定している規模の降下火砕物（35cm）に重畳させる積雪量は、1日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-2} の値（84.3cm）に日最深積雪量の平均値（31.1cm）を合算した 115.4cm とした。

なお、主事象を積雪、副事象を降下火砕物とした場合は、設計基準として想定している積雪量 167cm（ベース負荷を含む。）に降下火砕物 3.5cm* の荷重を重畳させることを想定するが、前者の荷重に包含される。

また、降下火砕物又は積雪堆積状態における地震発生時の評価については、2.2 節に記載する。

注記*：降下火砕物については、確率論的評価を実施していないことから、副事象として想定する噴火規模は、設計基準規模として設定している噴火規模（VEI5）から 1 段階噴火規模を下げた VEI4 相当として設定した。

2.2 積雪・降下火砕物堆積状態での地震発生時の評価について

自然現象の重畳評価において抽出された組合せ「雪・降下火砕物が堆積している状態での地震発生」に風荷重の重畳を仮定した場合の評価について、自然現象の重畳評価においては主荷重（設計基準規模）×従荷重（年超過確率 10^{-2} 規模）を想定することを基本としていることから、表 2 - 1 に評価ケースを 8 パターンに整理した結果を示す。

これらの組合せのうち、No.1（主荷重：地震，従荷重：積雪），及び No.5（主荷重：降下火砕物，従荷重：地震（ベース負荷：積雪））の 2 通りの評価が荷重の大きさ等の観点で代表性のあるケースとなる。代表性の判断の際の基準を表 2 - 2 に示す。

表 2 - 1 重畳評価ケース

No.	主荷重 (設計基準規模)	従荷重 (10^{-2} 規模)	ベース負荷 (平均規模)	備考
1	地震 (S s 等)	積雪 (84.3cm)	積雪 (31.1cm)	
2	地震 (S s 等)	降下火砕物 (3.5cm)	積雪 (31.1cm)	No.1 に包絡
3	風 (40.1m/s)	降下火砕物 (3.5cm)	積雪 (31.1cm)	No.1 に包絡
4	風 (40.1m/s)	積雪 (84.3cm)	積雪 (31.1cm)	No.1 に包絡
5	降下火砕物 (35.0cm)	地震 (10^{-2} 相当地震動)	積雪 (31.1cm)	
6	積雪 (135.9cm)	地震 (10^{-2} 相当地震動)	積雪 (31.1cm)	No.5 に包絡
7	降下火砕物 (35.0cm)	風 (27.9m/s)	積雪 (31.1cm)	No.5 に包絡
8	積雪 (135.9cm)	風 (27.9m/s)	積雪 (31.1cm)	No.5 に包絡

注 1 : 除雪等に期待できる施設は堆積荷重について除雪等の能力を考慮した値とする。

注 2 : 降下火砕物については、確率論的評価を実施していないことから、従荷重として考慮する場合は、設計基準規模として設定している噴火規模 (VEI5) から 1 段階噴火規模を下げた VEI4 相当を考慮する。

表 2 - 2 水平荷重・堆積荷重の比較

a. 水平荷重

		せん断力(kN) (6号機原子炉建屋躯体 38.2(m)-49.7(m))	判定
主荷重比較 (上: No.1, 2, 下: No.3, 4)	設計用地震力	43.35×10^3	地震 > 風
	風 (40.1m/s)	2.65×10^3	
従荷重比較 (上: No.5, 6, 下: No.7, 8)	地震 (10^{-2} 相当地震動)	9.7×10^3	地震 > 風
	風 (27.9m/s)	1.29×10^3	

b. 堆積荷重

		堆積荷重(N/m ²)	判定
従荷重比較 (上: No.1, 4, 下: No.2, 3)	積雪(115.4cm)	3393	積雪(115.4cm) > 降下火砕物(3.5cm) + 積雪(31.1cm)
	降下火砕物(3.5cm) + 積雪(31.1cm)	1429	
主荷重比較 (上: No.6, 8, 下: No.5, 7)	積雪(167.0cm)	4910	積雪(167.0cm) < 降下火砕物(35.0cm) + 積雪(31.1cm)
	降下火砕物(35.0cm) + 積雪(31.1cm)	6063	