

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-70-1 改5
提出年月日	平成30年8月17日

工事計画に係る補足説明資料

補足-70-1 【竜巻への配慮に関する説明書】

平成30年8月

日本原子力発電株式会社

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 竜巻の影響を考慮する施設について
 - 1.1 防護対象施設の抽出について
 - 1.2 防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について
 - 1.3 建屋開口部の調査結果について
 - 1.4 飛来物の選定について
 - 1.5 砂利等の極小飛来物による防護対象施設への影響について
 - 1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について
 - 1.7 隣接事業所からの飛来物が想定される施設の設計方針について
 - 1.8 東海第二発電所の竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

: 今回ご説明分

I. はじめに

1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を捕捉するものである。

本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち、
V-1-1-2-3「竜巻への配慮に関する説明書」

表-1 補足説明資料と添付資料との関連

工事計画添付書類に係わる補足説明資料（竜巻）		該当添付資料
1.	竜巻の影響を考慮する施設について	
1.1	防護対象施設の抽出について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.2	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	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.3	建屋開口部の調査結果について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.4	飛来物の選定について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.5	砂利等の極小飛来物による防護対象施設への影響について	V-1-1-2-3-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定
1.6	屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について	V-1-1-2-3-3 竜巻防護に関する施設的设计方針
1.7	隣接事業者からの飛来物が想定される施設的设计方針について	V-1-1-2-3-3 竜巻防護に関する施設的设计方針
1.8	東海第二発電所の竜巻影響評価の風速場モデルの適用について	V-1-1-2-3-3 竜巻防護に関する施設的设计方針

1.4 飛来物の選定について

1. 飛来物の選定について

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については、外部事象防護対策施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋（以下「外部事象防護対象施設等」という。）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、固縛又は外部事象防護対象施設等から離隔するなどの飛来物発生防止対策を講じる必要がある。

飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否を判定する手順について説明する。

1.1 飛散評価

飛来物源である資機材及び車両が、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される。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-1に示す。

(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。a. 項に算出式、b. 項に計算例を示す。

a. 算出式

空力パラメータの算出は (1.1) 式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m} \dots (1.1)$$

m : 質量 (kg)

c : 0.33

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 1-1 飛来物の抗力係数

飛来物形状	C	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
①塊状物体	0.33	2.0	2.0	2.0
②板状物体	0.33	1.2	1.2	2.0
③棒状物体	0.33	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)

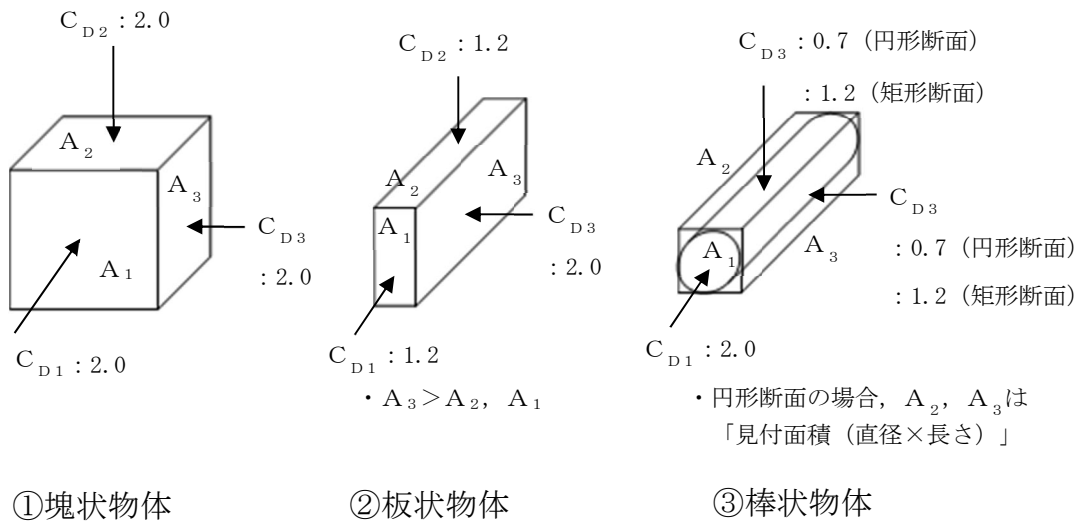


図 1-1 飛来物の形状と抗力係数の関係

b. 計算例

(a) 鋼製パイプ (棒状物体) (図-2)

長さ : 4.00 m 幅 : 0.15 m 厚さ : 0.15 m 質量 : 86 kg

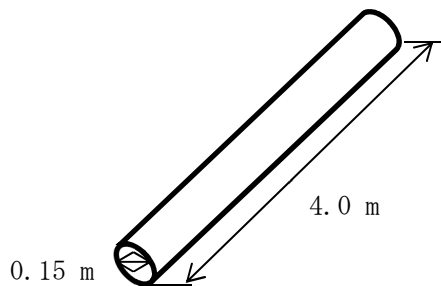


図 1-2 鋼製パイプ

円形断面であるので、

抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$ 、 $C_{D2}=0.7$ 、 $C_{D3}=0.7$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c \left(C_{D1} A_1^{※1} + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3 \right)}{m} \quad \text{より,}$$

※1 : 0.15 m の正方形断面として算出

空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 \times (2.0 \times 0.15 \times 0.15 + 0.7 \times 0.15 \times 4.0 + 0.7 \times 4.0 \times 0.15)}{86} = 0.0034 \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

(b) 鋼製材 (棒状物体) (図-3)

長さ : 4.20 m 幅 : 0.30 m 厚さ : 0.20 m 質量 : 135 kg

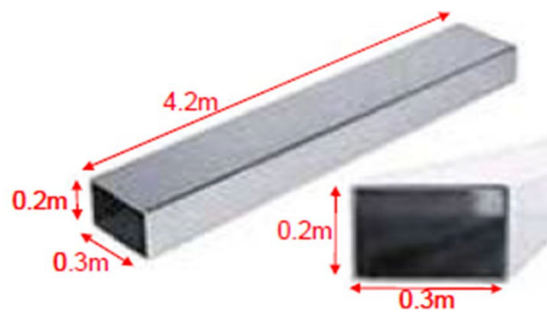


図 1-3 鋼製材

矩形断面であるので、

抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$ 、 $C_{D2}=1.2$ 、 $C_{D3}=1.2$ 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、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 \times (2.0 \times 0.2 \times 0.3 + 1.2 \times 0.3 \times 4.2 + 1.2 \times 0.2 \times 4.2)}{135} = 0.0065 \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

(c) 車両 (塊状物体) (図-4)

長さ：4.5 m 幅：2.0 m 高さ：1.6 m 質量：2500 kg

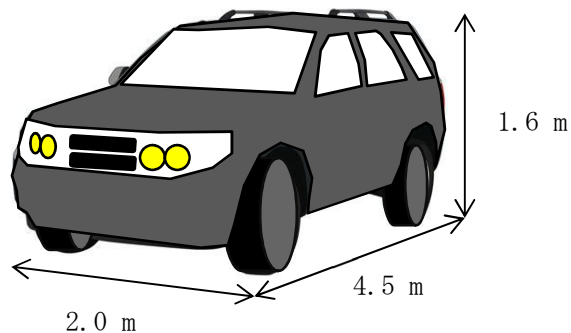


図 1-4 車両

塊状物体であるので、

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、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{0.33 \times (2.0 \times 4.5 \times 2.0 + 2.0 \times 2.0 \times 1.6 + 2.0 \times 1.6 \times 4.5)}{2500} = 0.0052 \text{ [m}^2/\text{kg]}$$

(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り、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。

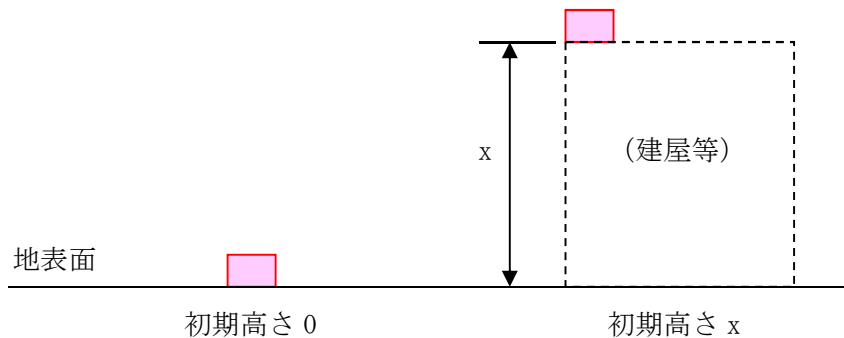


図 1-5 初期高さのイメージ図

(3) 飛来物の最大水平速度、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、添付書類「V-5-9 計算機プログラム(解析コード)の概要・TONBOS」に示す。

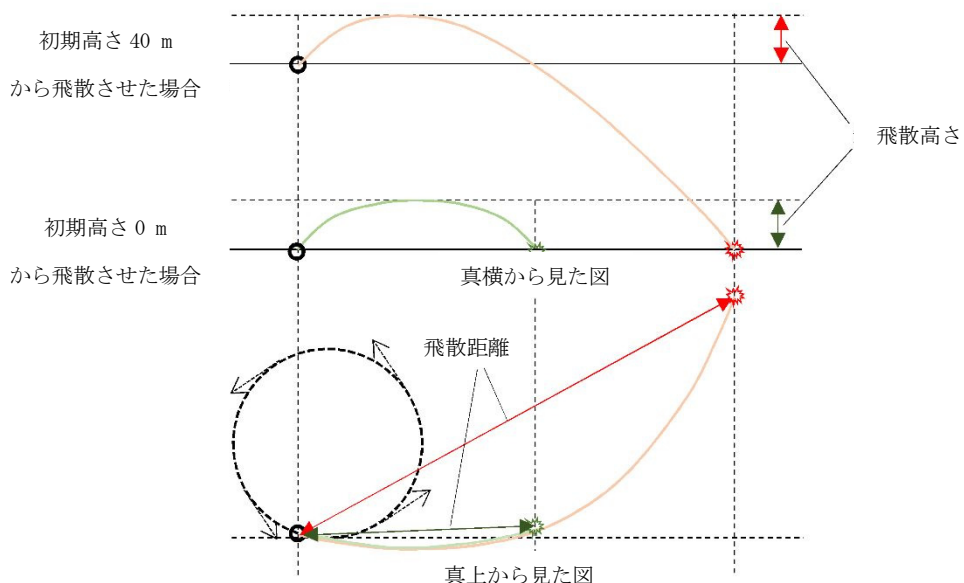


図 1-6 飛散評価における飛跡イメージ

表-2 に、(1) b. 項の計算例に示した、鋼製パイプ、鋼製材及び車両の飛散評価による各数値の算出結果を示す。

表 1-2 飛来物の最大速度等

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	棒状物体 (矩形断面)	塊状物体
	鋼製パイプ	鋼製材	乗用車
寸法 (m)	長さ×直径 4.0×0.15	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×高さ 4.5×2.0×1.6
質量 (kg)	86	135	2500
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0034	0.0065	0.0052
初期高さ (m)	40	—*	0
飛来物の最大水平速度 (m/s)	38	51*	33
飛散高さ (m)	0	—*	2.3
飛散距離 (m)	115	—*	45

(備考) 鋼製材は東海第二発電所の設計飛来物であり、最大水平速度は竜巻影響評価ガイドの値を用いることとし、TONBOSでの飛散評価では決定しない。

(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水平速度により、運動エネルギーを算出する。

a. 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：飛来物の重量(kg)

V：飛来物の最大水平速度(m/s)

b. 計算例

(a) 鋼製パイプ (棒状物体)

質量：86 kg 最大速度：38 m/s

$$\begin{aligned} \bullet \text{ 運動エネルギー (水平)} &= m V_{\text{max}}^2 / 2 [\text{kJ}] \\ &= (86 \times 38^2) / 2 = 63 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

(b) 鋼製材（棒状物体）

質量：135 kg 最大速度：51 m/s

$$\begin{aligned} \bullet \text{運動エネルギー（水平）} &= m V_{\max}^2 / 2 [\text{kJ}] \\ &= (135 \times 51^2) / 2 = 176 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

(c) 車両（塊状物体）

質量：2500 kg 最大速度：33 m/s

$$\begin{aligned} \bullet \text{運動エネルギー（水平）} &= m V_{\max}^2 / 2 [\text{kJ}] \\ &= (2500 \times 33^2) / 2 = 1362 [\text{kJ}] \end{aligned}$$

(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厚さの算出式に使用されている修正 NDRC 式 (①) 及び Degen 式 (②) 及び鋼板に対する貫通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>

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

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

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 (kgf/cm²)※

※: コンクリート強度は、被衝突物毎に設定する。

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)

α_c : 飛来物の低減係数 (=1.0)

α_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)

1.2 対策要否の判定

1.1 項にて算出した運動エネルギーが、以下に示す観点より設計飛来物に包含されていない物品については飛来物発生防止対策（固縛，固定又は外部事象防護対象施設等から離隔）を行う。飛来物源である資機材及び車両に対して，飛来物として選定し，飛来物発生防止対策の要否の判定をするフローを，図-7 に示す。

[飛来物発生防止対策要否の観点]

- ・ 鋼製材の運動エネルギー 176 kJ より大きいもの。
- ・ 鋼板の貫通力として貫通限界厚さが 32 mm よりも大きいもの。
- ・ コンクリートの貫通力として貫通限界厚さが 25.9 cm^{*} よりも大きいもの。

^{*} : コンクリート基準強度 250 kgf/cm² の場合の例

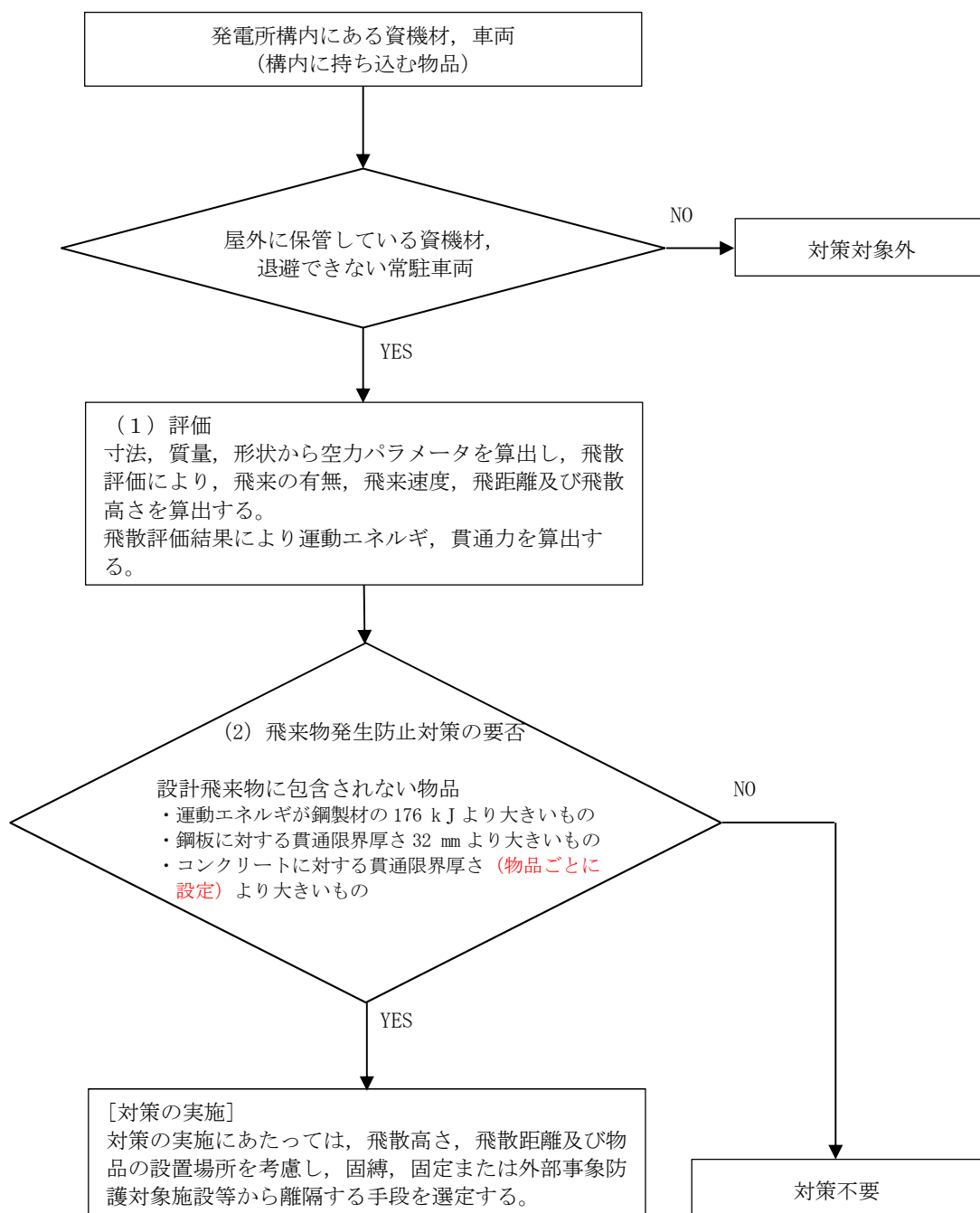


図 1-7 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

1.8 東海第二発電所の竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

1. 東海第二発電所の竜巻影響評価における風速場モデル

東海第二発電所は、敷地近傍に一般道や隣接事業所の施設等があり、これらの場所からの物品の飛来を完全に管理することは難しい。したがって、竜巻影響評価における物品の飛来による影響を現実的に評価することとし、東海第二発電所の竜巻影響評価の風速場モデルとして、多数の飛来物源が想定される地上付近で竜巻の中心に向かう流れを考慮した 3 次元の風速場を持つ、フジタモデル DBT-77 (DBT:Design Basis Tornado) (以下「フジタモデル」という。)を採用した。

なお、東海第二発電所の竜巻影響評価においては、評価及び運用の簡便性を念頭に、保守性を確保した上で、一部についてフジタモデル以外の竜巻モデルから得られる設定を採用している。

風速場モデルの適用状況について表 1-1 に整理し、フジタモデル以外のモデルに基づく設定についての説明は、「2. フジタモデル以外の竜巻モデルから得られる設定について」に補足する。

表 1-1 東海第二発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (1/2)

竜巻評価に影響する要素		東海第二発電所の設定値	風速場モデルによる違いの有無	備考
基本の風速場モデル		フジタモデル	—	
設計 竜巻の 特性値	最大風速 V_D	100 m/s	×	
	最大接線方向風速 V_{Rm}	85 m/s	×	
	竜巻の移動速度 V_T	15 m/s	×	
	最大接線風速半径 R_m	30 m	×	
	流入層高さ H_i	15 m	○	ランキン渦モデルには無し
	最大気圧低下量 ΔP_{max}	89 hPa 【ガイドの評価式による】 フジタモデル (解析が必要) に対する算出の簡便性を踏まえ採用	○	保守性は確認済
最大気圧低下率 $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$	45 hPa/s 【ガイドの評価式による】 同上。	○	評価には用いない。	
設計飛来物の速度	鋼製材	51 m/s 任意の初期高さにおけるフジタモデルの解析結果を包含する, ガイドの値	○	
	砂利	62 m/s 任意の初期高さにおけるフジタモデルの解析結果を包含する, ランキン渦モデルによる算出値		

□ : フジタモデル以外のモデルに基づく設定

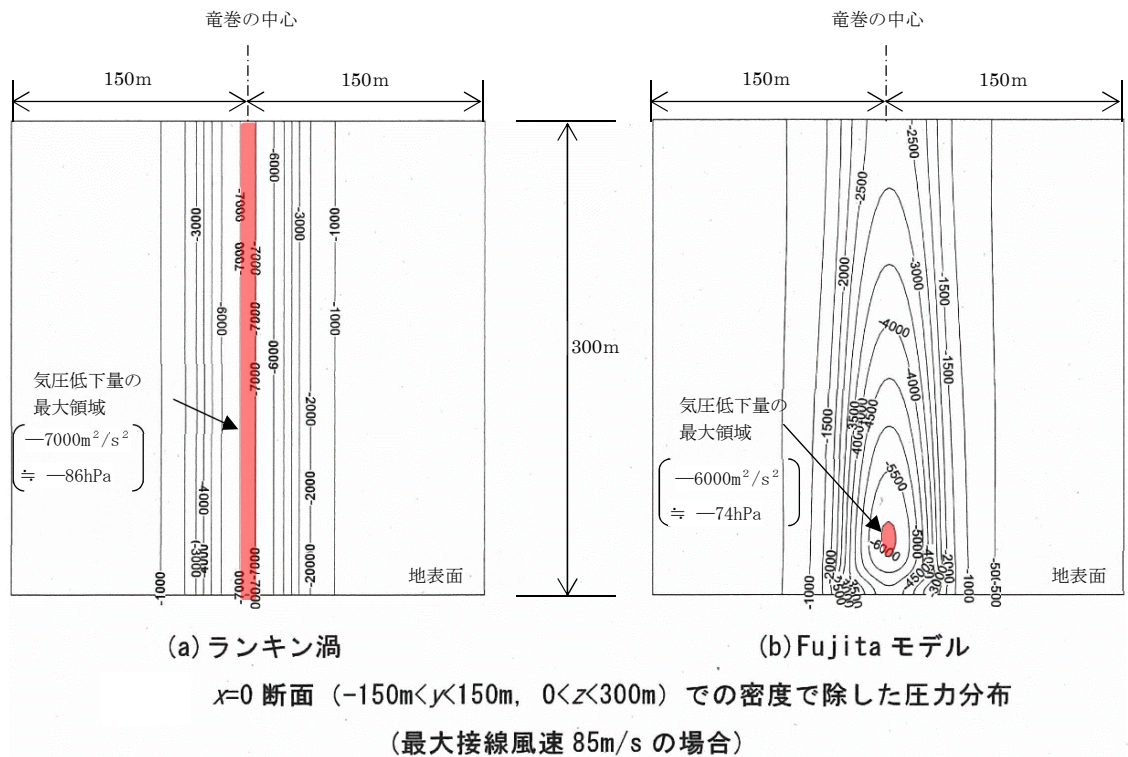
表 1-1 東海第二発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (2/2)

竜巻評価に影響する要素		東海第二発電所の設定値		風速場モデルによる違いの有無	備考
飛散解析	飛来物源の初期高さ	h	物品の実際の設置面と地面との高さ	○	
	最大水平速度	MV_{Hmax}	フジタモデル風速場に基づく飛散解析の値	○	解析コード： TONBOS
	最大鉛直速度	MV_{Vmax}	最大水平速度の 2/3 (ガイドを参考)	○	
	最大飛散距離	MD	フジタモデル風速場に基づく飛散解析の値	○	解析コード： TONBOS
飛来物発生対策の要否	運動エネルギー	E		○	
	貫通力	t_p^*	上記の飛散解析結果を基に評価	○	* 鋼板：BR L式, コンクリ ート：修正ND RC式, Dege n式
	離隔距離	D_{req}		○	
固縛設計	風速分布		フジタモデルの風速場での 固縛対象設備の中心位置の風速	○	
	初期高さ	h	固縛対象設備の設置面と地面との高さ	○	

2. フジタモデル以外の竜巻モデルから得られる設定について

(1) 設計竜巻の最大気圧低下量

設計竜巻の特性値のうち、風速場モデルが影響する項目として気圧低下に関する要素があり、フジタモデルの風速分布が高さ方向で変化し、ランキン渦モデルのように一定ではないため、最大気圧低下量 ΔP_{max} は、図 2-1 に示すように、高さ方向で変化し、算出するために解析を要する。



参考文献：江口謙，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

に一部加筆

図 2-1 設計竜巻（最大接線風速 $V_{Rm} : 85\text{m/s}$ ）における圧力分布

解析によりフジタモデルでの最大気圧低下量 ΔP_{max} は、76 hPa と算出される。

なお、「竜巻影響評価ガイド（以下「ガイド」という。）」には、ランキン渦モデルの風速分布に基づいて設定した簡便な評価式が示されており、当該評価式によると、最大気圧低下量 ΔP_{max} は 89 hPa と算出され、フジタモデルの値より保守的でもあることからこちらの値を採用した。

また、最大気圧低下率は、解析では 53 hPa/s となり、「ガイド」の評価式での 45 hPa/s を上回ることとなるが、竜巻影響評価においては用いないため、 ΔP_{max} の設定方針との整合を考慮し「ガイド」の評価式の値とした。

以上により、東海第二発電所の設計竜巻の最大気圧低下量及び最大気圧低下率は、「ガイド」に示される評価式により算出した値で設定した。

(2) 設計飛来物の飛散速度

設計飛来物は、発電所構内から周辺における飛来物源の調査等を踏まえ、竜巻防護対策と飛来物発生防止対策のバランスから、設計上の基準として設定するものであり、東海第二発電所の設計飛来物は、表 2-1 に示す鋼製材と砂利を設定した。

表 2-1 東海第二発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.18	135
最大水平速度 (m/s)	62	51
最大鉛直速度 (m/s)	42	34

ここで、フジタモデルの風速分布は高さ方向で変化し、飛来物源の飛散速度は初期高さの影響を受けるが、防護設計の基準となる設計飛来物のうち鋼製材の飛散速度の設定においては、任意の初期高さの飛散速度を包含した値の方が、現場での物品配置等の制約を受けず簡単であると考え、任意の初期高さにおけるフジタモデルによる鋼製材の水平速度を包絡する、「ガイド」の値（非定常乱流渦モデルによるシミュレーション（LES）にて導出）を採用した。

鋼製材の初期高さと水平方向の飛散速度の解析結果、及び竜巻風速場をランキン渦モデルとした場合の鋼製材の速度及び「ガイド」の値を図 2-2 に示す。

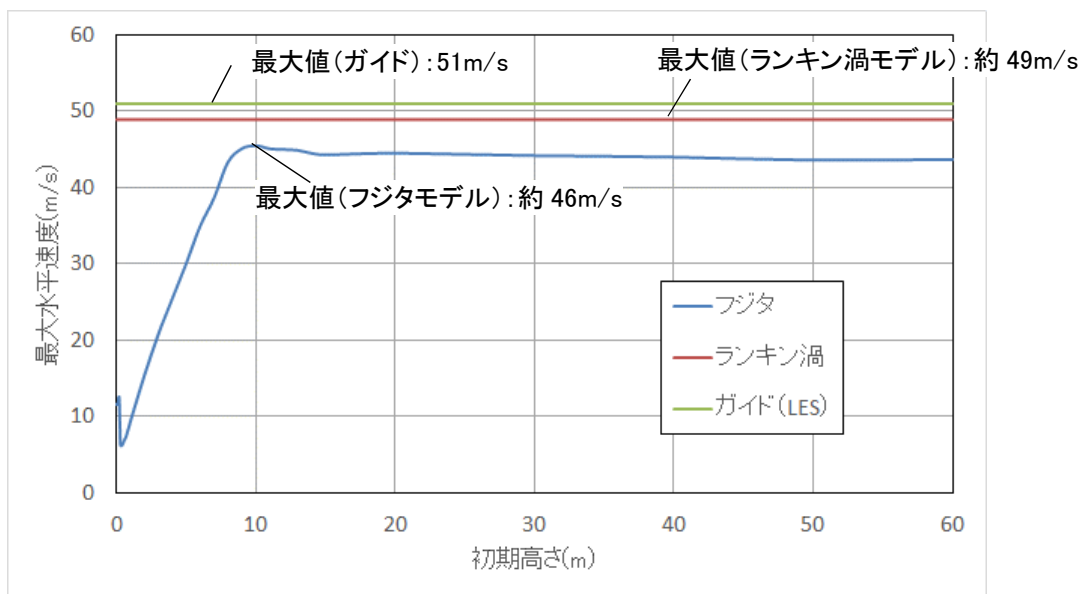


図 2-2 任意の初期高さの鋼製材の最大水平速度分布図

また、もう一つの設計飛来物である砂利の速度は、「ガイド」には記載されておらず、LESの解析は膨大な計算資源が必要なこと、及び鋼製材の設定と同様に、配置条件の影響を受けるような値としないことを考慮して、図2-2の鋼製材の結果を参考とし、初期高さの影響を受けずフジタモデルより保守的な設定となるものとして、ランキン渦モデルにて飛散解析を行った値を採用した。

3. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置設計の風速

屋外の重大事故等対処設備に設置する固縛装置は、固縛対象となる重大事故等対処設備（以下「固縛対象設備」という。）が受ける設計竜巻の水平風速を基に設計するが、この際の竜巻の風速分布はフジタモデルを採用し、図3-1の検討モデルにて算出する。

固縛対象設備が受ける最大水平風速について、可搬型代替注水中型ポンプの例を図3-2に示す。

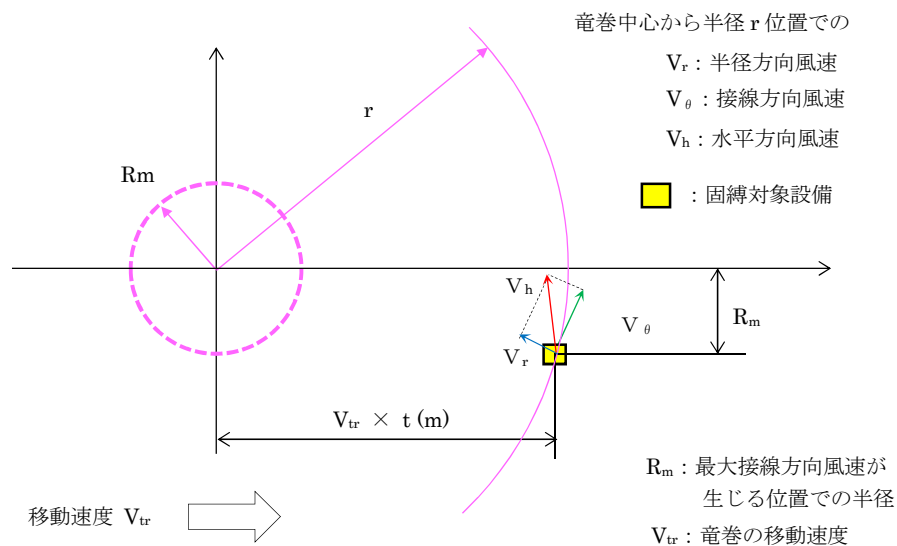


図3-1 固縛対象設備に作用する風速分布の検討モデル

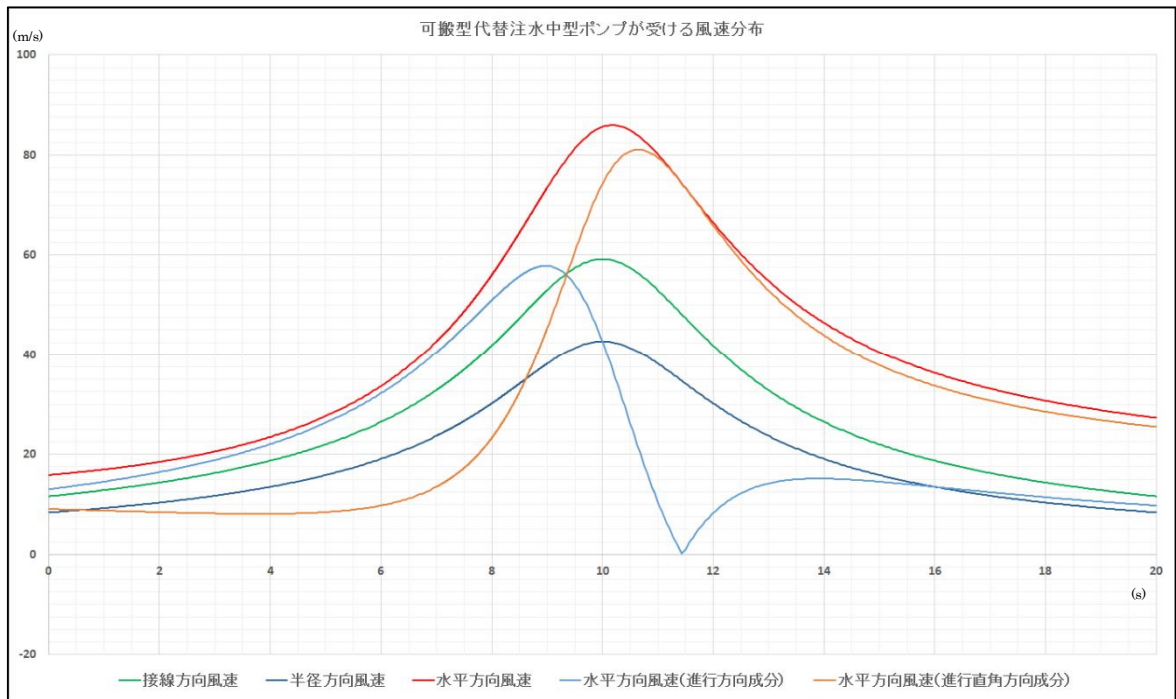


図 3-2 可搬型代替注水中型ポンプに作用する設計竜巻の風速の時刻歴分布