

新規制基準適合性審査申請  
＜(3)その他の自然現象等＞

竜巻

(No.60,63,64関連)

2019年4月23日

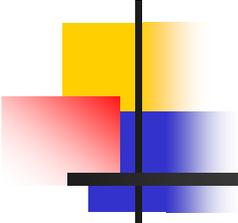
東北電力株式会社

本資料のうち、枠囲いの内容は防護上の観点から公開できません。

# 目次

---

1. 原子力発電所の竜巻影響評価の背景
  2. 規制要求事項
  3. 竜巻について
  4. 女川原子力発電所の竜巻に対する特徴
  5. 竜巻影響評価
  6. 竜巻防護の運用対策
  7. 適合性審査の状況
- (参考資料)



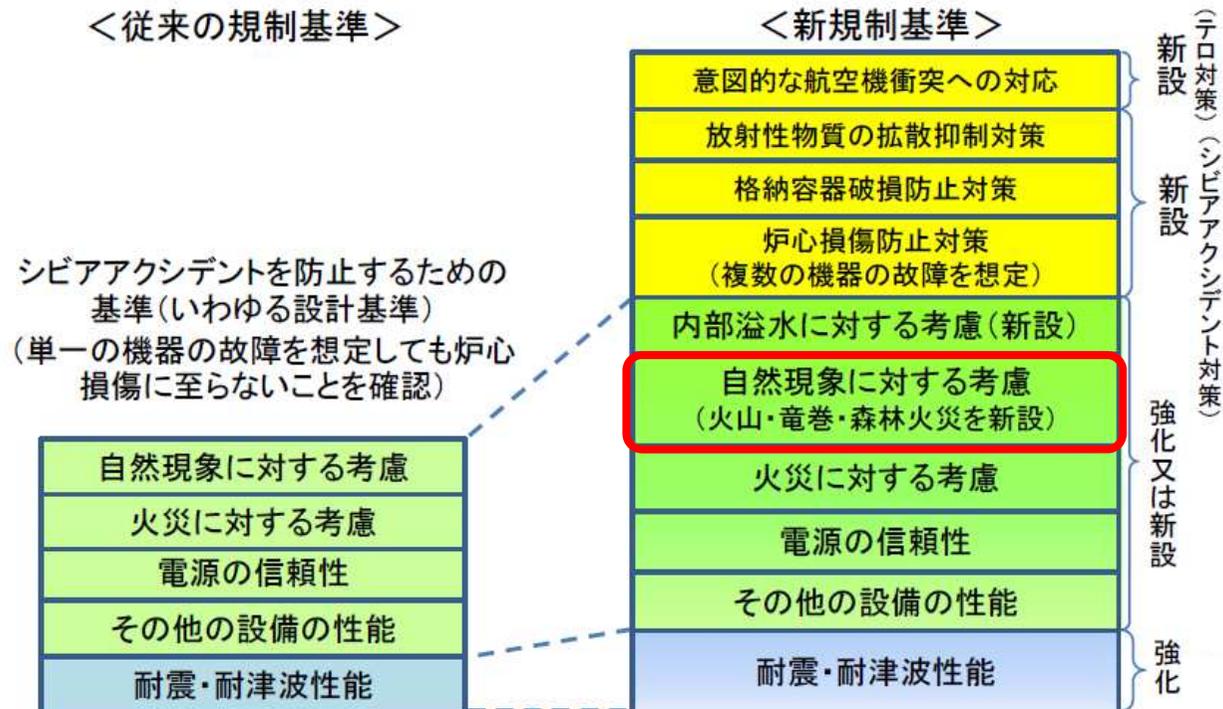
# 1. 原子力発電所の竜巻影響評価の背景

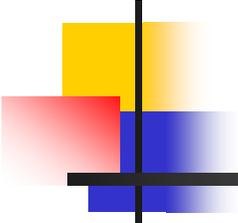
---

# 1. 原子力発電所の竜巻影響評価の背景

## ➤ 背景

- 平成23年3月11日の巨大地震による津波によって、福島第一原子力発電所でシビアアクシデントが発生
- 原子力発電所の安全に関わる新たな規制機関として原子力規制委員会(NRA)が発足
- 新規制基準において、大規模な自然災害に対する対応の強化が図られた





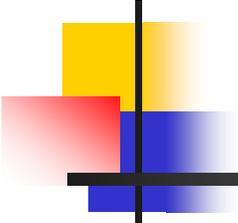
## 2. 規制要求事項

---

## 2. 規制要求事項

### ➤ 規制要求事項

- 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第6条において、自然現象に対して、安全施設の安全機能を維持することが求められている
- これに関連して、発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随件事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価・確認するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下「竜巻ガイド」という。)を参照し、以下の竜巻影響評価が要求されている
  - ✓ 設計竜巻及び設計荷重の設定
  - ✓ 女川原子力発電所における飛来物の調査
  - ✓ 飛来物防止対策
  - ✓ 防護対象施設の構造健全性評価及び対策



### 3. 竜巻について

---

### 3. 竜巻について(1/2)

竜巻は、発達した積乱雲に伴う強い上昇気流によって発生する激しい渦巻き

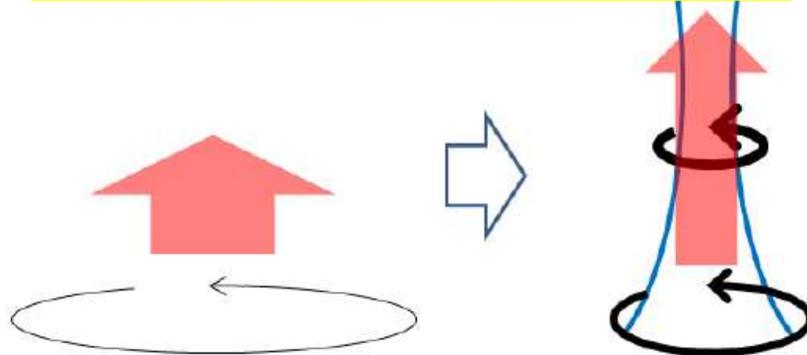
#### 竜巻の発生メカニズム

- 台風や寒冷前線、低気圧など積乱雲が発生しやすい気象条件に伴って発生しやすくなる傾向
- 地面付近にあった弱い渦巻きが、積乱雲の強い上昇気流によって上下に引き伸ばされると、下図のように細く締められて回転のスピードが速まる。このような仕組みで、とても強くなった渦巻きが竜巻である



竜巻の気象状況※1

渦巻きが上昇気流で引き伸ばされると、細くなるとともに回転のスピードが速くなる



竜巻の発生の仕組み※2



※1:首相官邸HP「竜巻では、どのような災害が起こるのか」より引用

※2:仙台管区気象台HP「竜巻の正体と身のまもりかた 補足教材」より引用

## 3. 竜巻について(2/2)

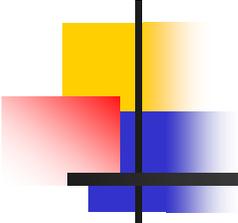
### 竜巻による被害の特徴

- 短時間で狭い範囲に集中して被害をもたらす  
被害は数分～数十分で長さ:数km～数十km、幅:数十～数百mの狭い範囲に集中
- 移動スピードが非常に速い  
過去に発生した竜巻の中には、時速約90km(秒速約25m)で移動した事例もある
- 竜巻の風の影響で建物が倒れたり、車がひっくり返ることがある
- 様々なものが竜巻に巻き上げられたり、飛散して衝突する



竜巻によるトラックの被害※1

これらの被害の特徴を踏まえて、原子力発電所の設備に対する影響を評価し、対策を検討する



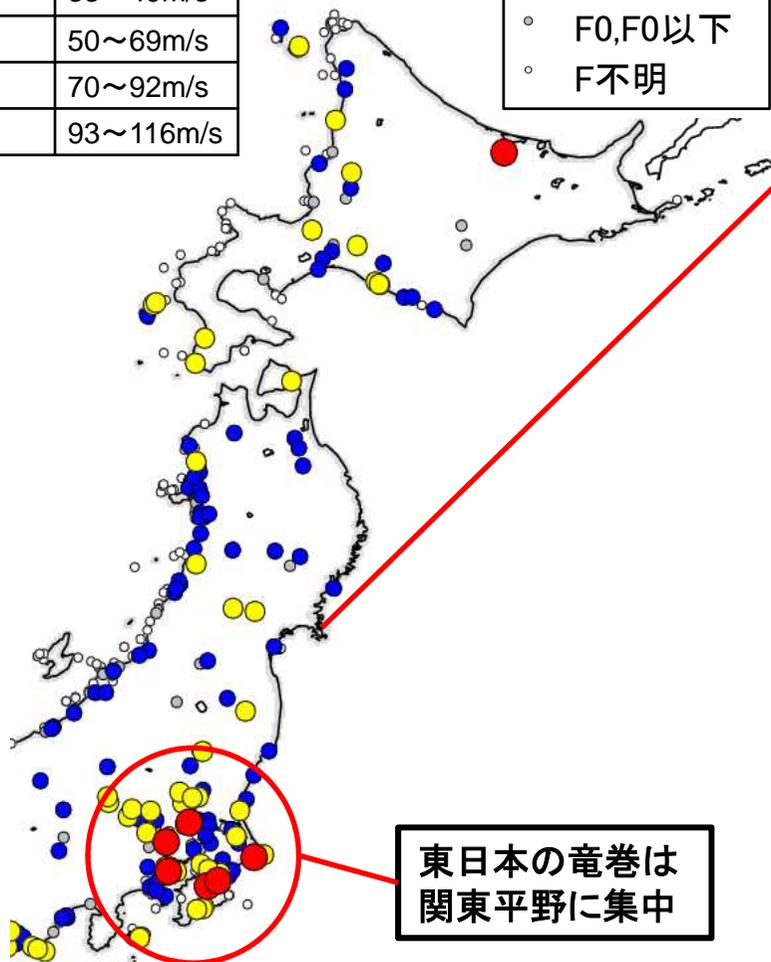
## 4. 女川原子力発電所の竜巻に対する特徴

---

## 4. 女川原子力発電所の竜巻に対する特徴

Fスケール	風速(平均)
F0	17~32m/s
F1	33~49m/s
F2	50~69m/s
F3	70~92m/s
F4	93~116m/s

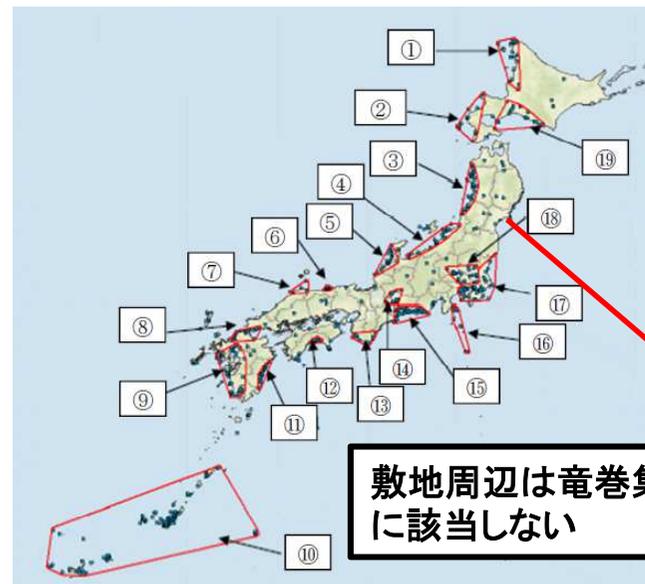
- F3, F2-F3
- F2, F1-F2
- F1, F0-F1
- F0, F0以下
- F不明



東日本の竜巻は  
関東平野に集中



敷地は三方を山に囲まれ、海岸線には防潮堤を設置しており、竜巻が接近・移動する間に減衰する地形

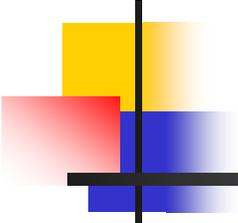


敷地周辺は竜巻集中地域  
に該当しない

竜巻集中地域※1

気象庁「竜巻等の突風データベース」より、1961年～2012年6月に発生した竜巻をプロット

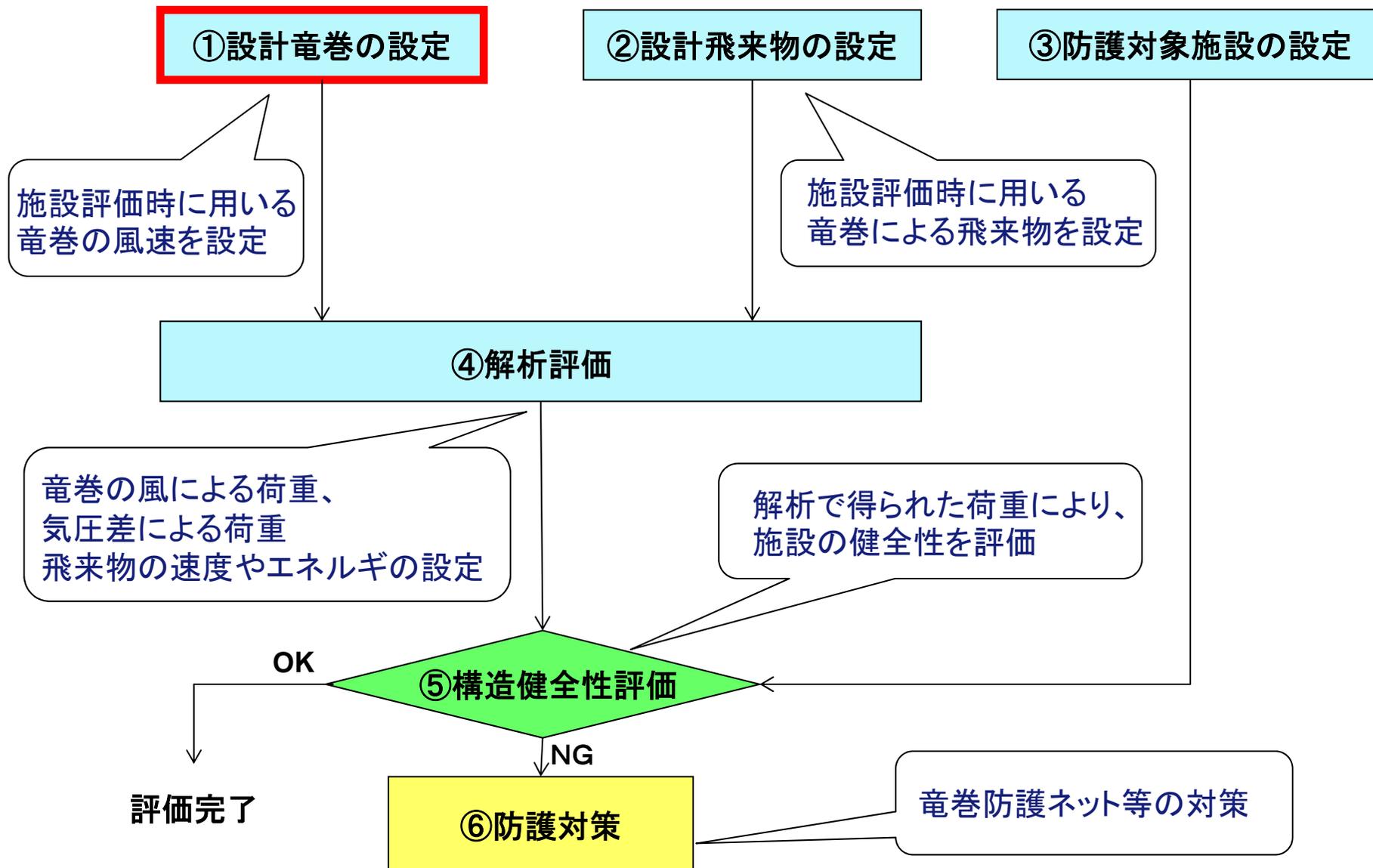
※1: 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説(JNES-RE-2013-9009)より引用



## 5. 竜巻影響評価

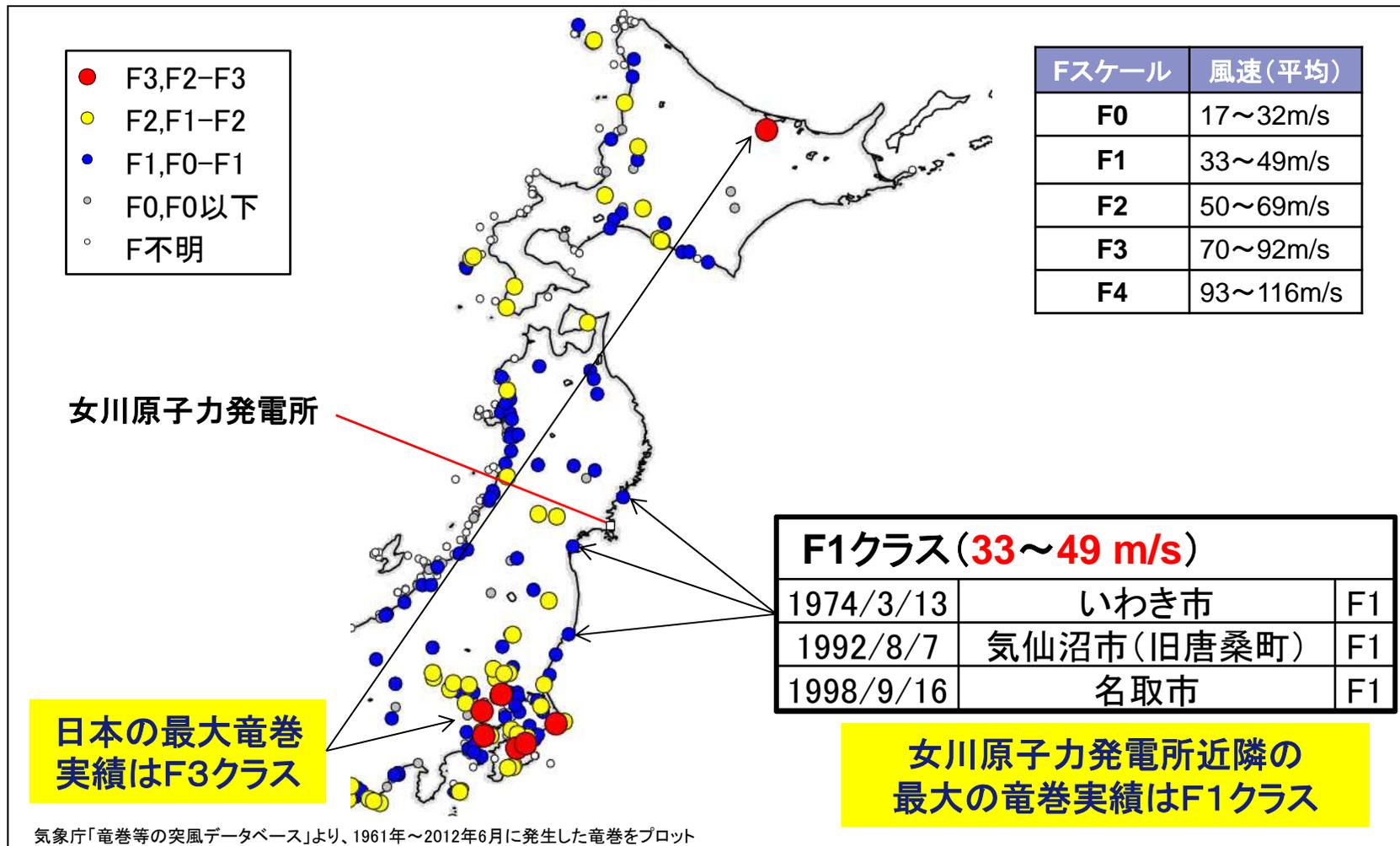
---

## 5.1 竜巻影響評価(全体フロー)



## 5.2 竜巻影響評価(①設計竜巻の設定(1/3))

### 過去に発生した竜巻による最大風速



女川原子力発電所が立地する東北地方太平洋沖は大規模な竜巻は発生しにくい

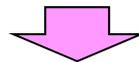
## 5.2 竜巻影響評価(①設計竜巻の設定(2/3))

- 申請時は発電所周辺地域の竜巻の発生実績を踏まえ、設計竜巻の最大風速( $V_D$ )をF2クラスの上限值(69m/s)と設定したが、以下のとおり見直しを実施

### 基準竜巻( $V_B$ )の設定

基準竜巻:極めてまれに発生し、発電所の安全性に影響を与える恐れがある竜巻

- ✓ 過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )
    - ・国内最大の竜巻はF3クラス(最大92m/s)
    - ・女川原子力発電所近隣の最大の竜巻はF1クラス(最大49m/s)
  - 竜巻は観測の歴史が浅く、他の気象観測データに比べ不確かさがあるため、**日本で過去に発生した竜巻の最大風速(92m/s)を $V_{B1}$ として設定**
- 
- ✓ 確率論的に求めた竜巻の最大風速( $V_{B2}$ )
    - ・発電所を含む太平洋側の海岸線における竜巻の発生頻度等から算出(**83.6m/s**)  
⇒参考資料(P37~)参照



基準竜巻の最大風速( $V_B$ )は、 $V_{B1}$ および $V_{B2}$ のうち  
大きな風速を設定  $V_B = \underline{92m/s}$

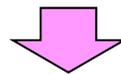
## 5.2 竜巻影響評価(①設計竜巻の設定(3/3))

### 設計竜巻( $V_D$ )の設定

設計竜巻: 発電所の立地による特性(地形効果により竜巻が増幅する)を考慮して、基準竜巻に対して最大風速の割り増しを行った竜巻であり、施設の評価時に適用

- ✓ 地形効果による竜巻風速への影響
    - ・海側から竜巻が侵入する場合、防潮堤があり、竜巻の風速は減衰する
    - ・山側から竜巻が侵入する場合、発電所周辺は丘陵地の森林により減衰する
- ⇒地形効果による竜巻の増幅の影響は受けない

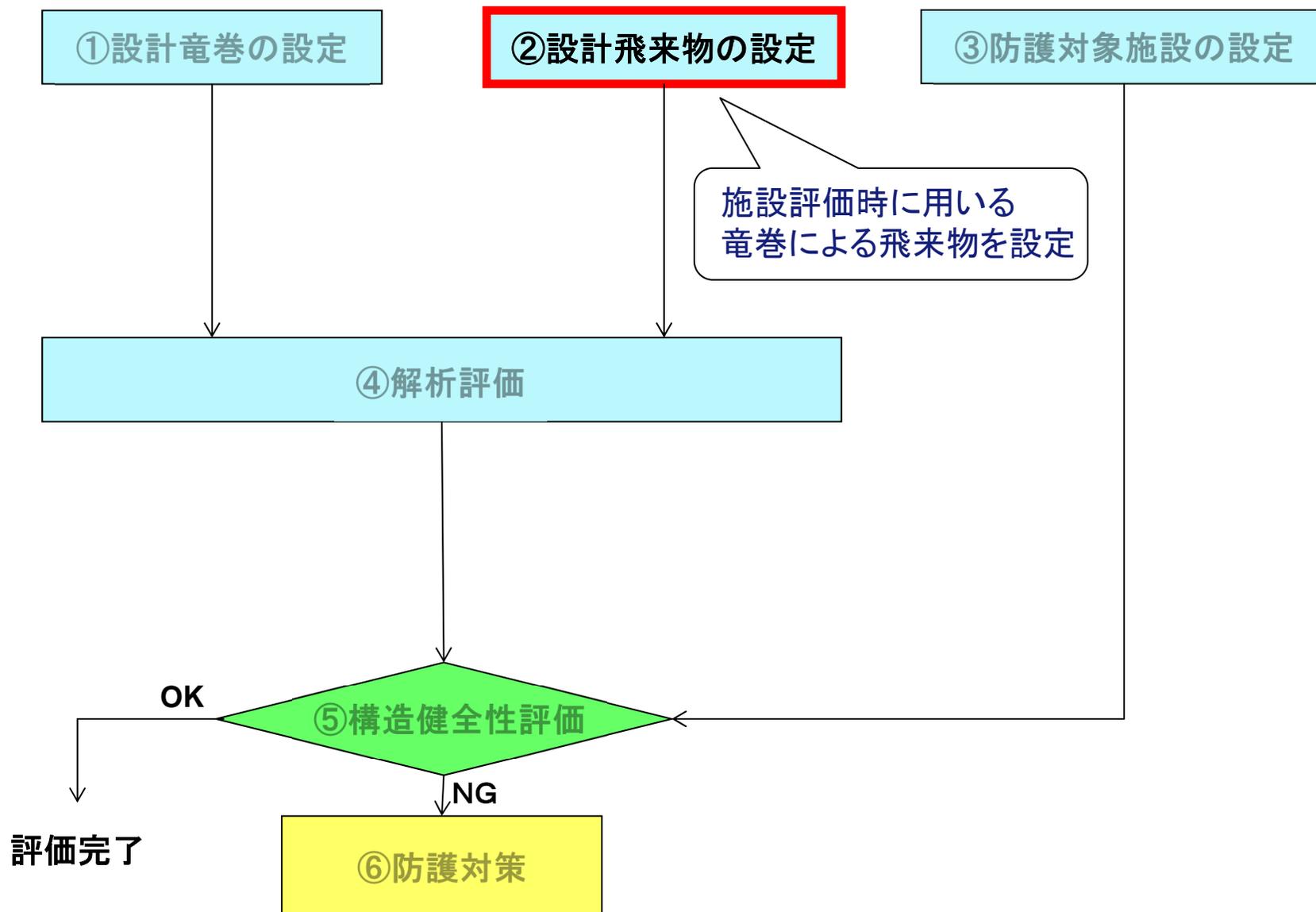
- ✓ 将来的な気候変動の考慮
  - ・竜巻発生の不確実性を考慮し、**基準竜巻の92m/sを安全側に切り上げ**



設計竜巻の最大風速( $V_D$ ) **100m/s**

- 今後も最新のデータ・知見をもって、気候変動の影響に注視し、状況に応じて設計基準の見直しを行う

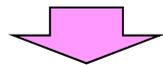
## 5.3 竜巻影響評価(②設計飛来物の設定(1/3))



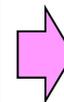
## 5.3 竜巻影響評価(②設計飛来物の設定(2/3))

### (1) 竜巻飛来物現場調査

米国の規格等を踏まえて、防護対象施設から半径800m以内に存在する飛来物になる可能性がある物体について調査し、約2000個を抽出



- ✓ 現場調査の結果を代表化
  - ①形状で分類(棒状、板状、塊状、その他)
  - ②面積、重量・材質が同程度のものを代表化
- ✓ NRA竜巻ガイドで例示する飛来物 ⇒ 鋼製材等



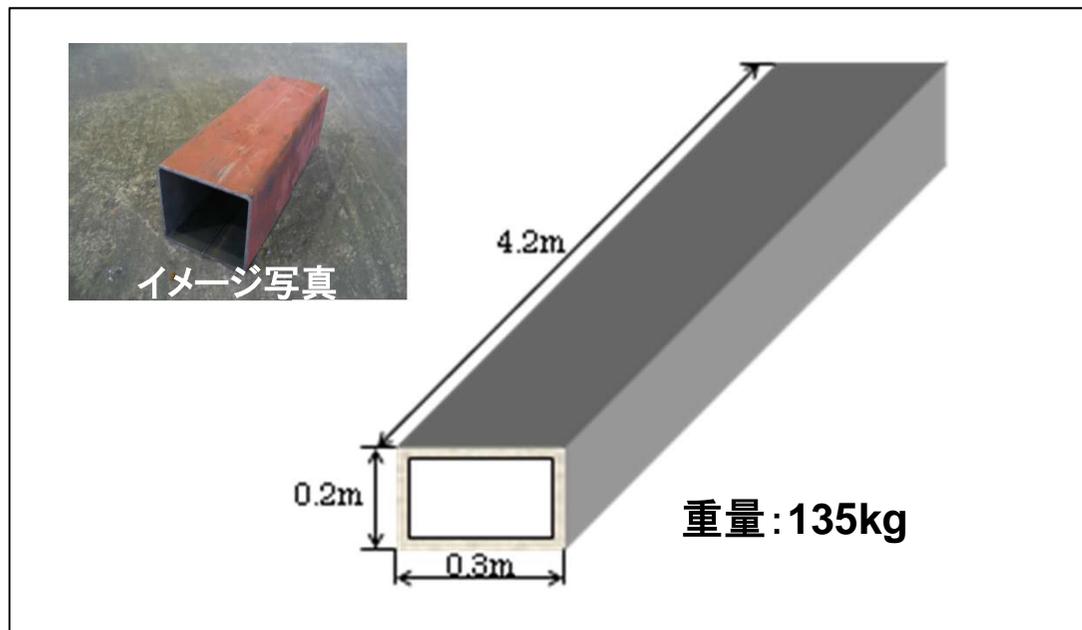
#### 32種類の代表飛来物を選定

鉄パイプ、電柱、マンホール蓋  
コンテナ、乗用車、トラック  
分解時のポンプ部品、鋼製材...

## 5.3 竜巻影響評価(②設計飛来物の設定(3/3))

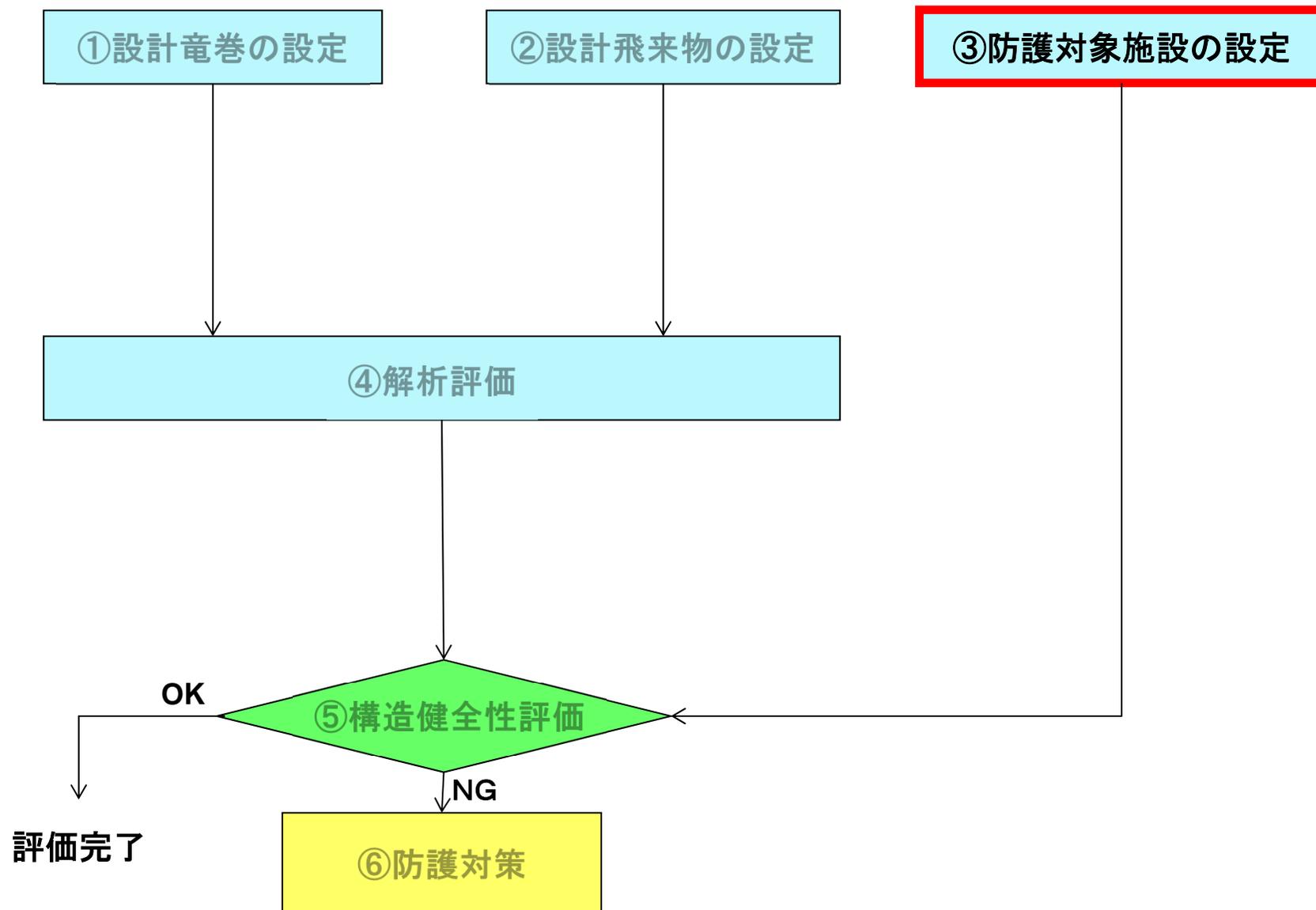
### (2)設計飛来物の設定

- 代表飛来物(32種類)の竜巻の解析評価を行い、運動エネルギーおよび貫通力が大きい飛来物である「**鋼製材**」を設計飛来物と設定



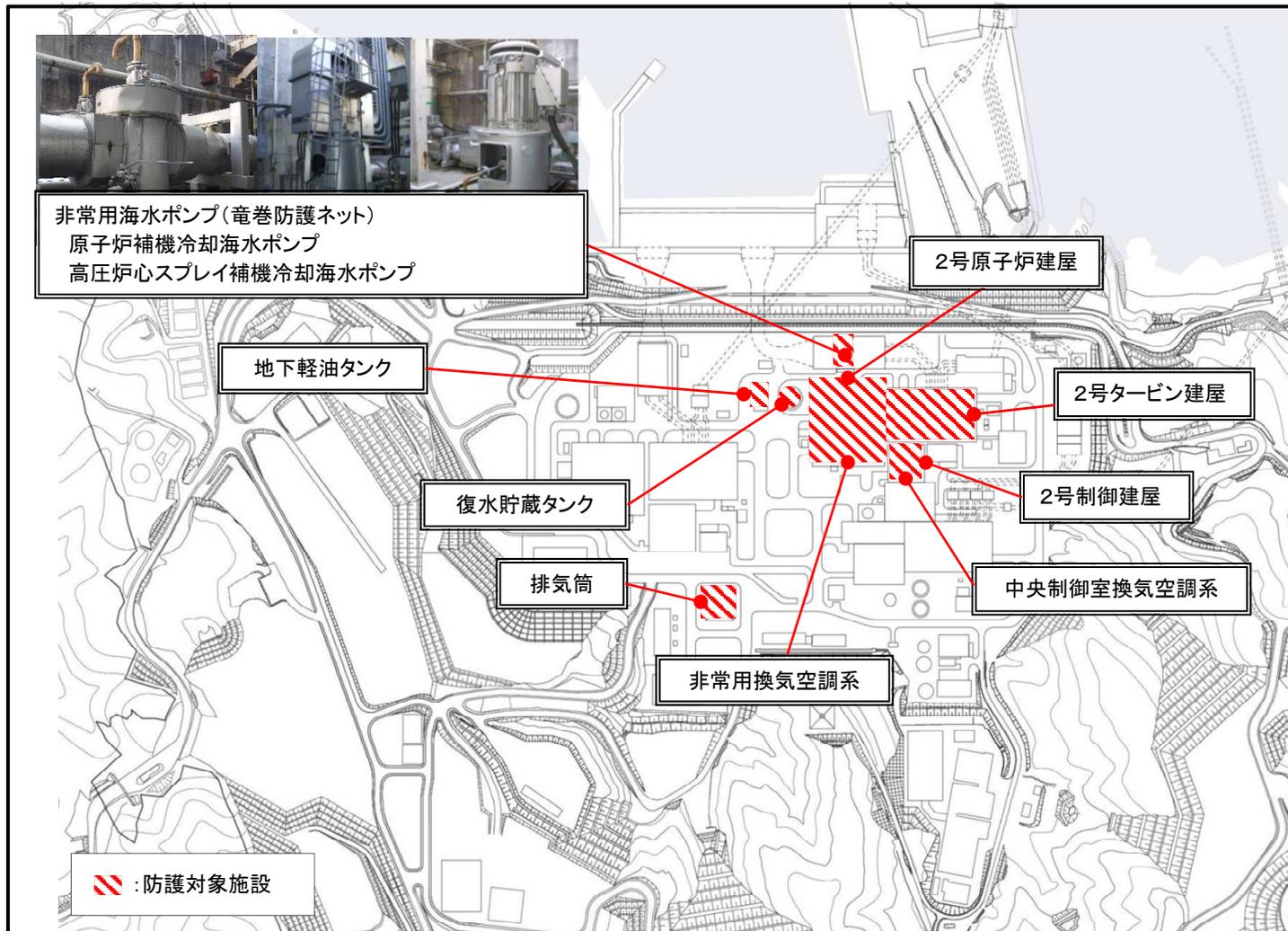
鋼製材(仕様)

## 5.4 竜巻影響評価(③防護対象施設の設定(1/3))



## 5.4 竜巻影響評価(③防護対象施設の設定(2/3))

- 防護対象施設は機器の重要度を踏まえて、竜巻の影響(屋外設備、外気と繋がる設備等)に基づき設定

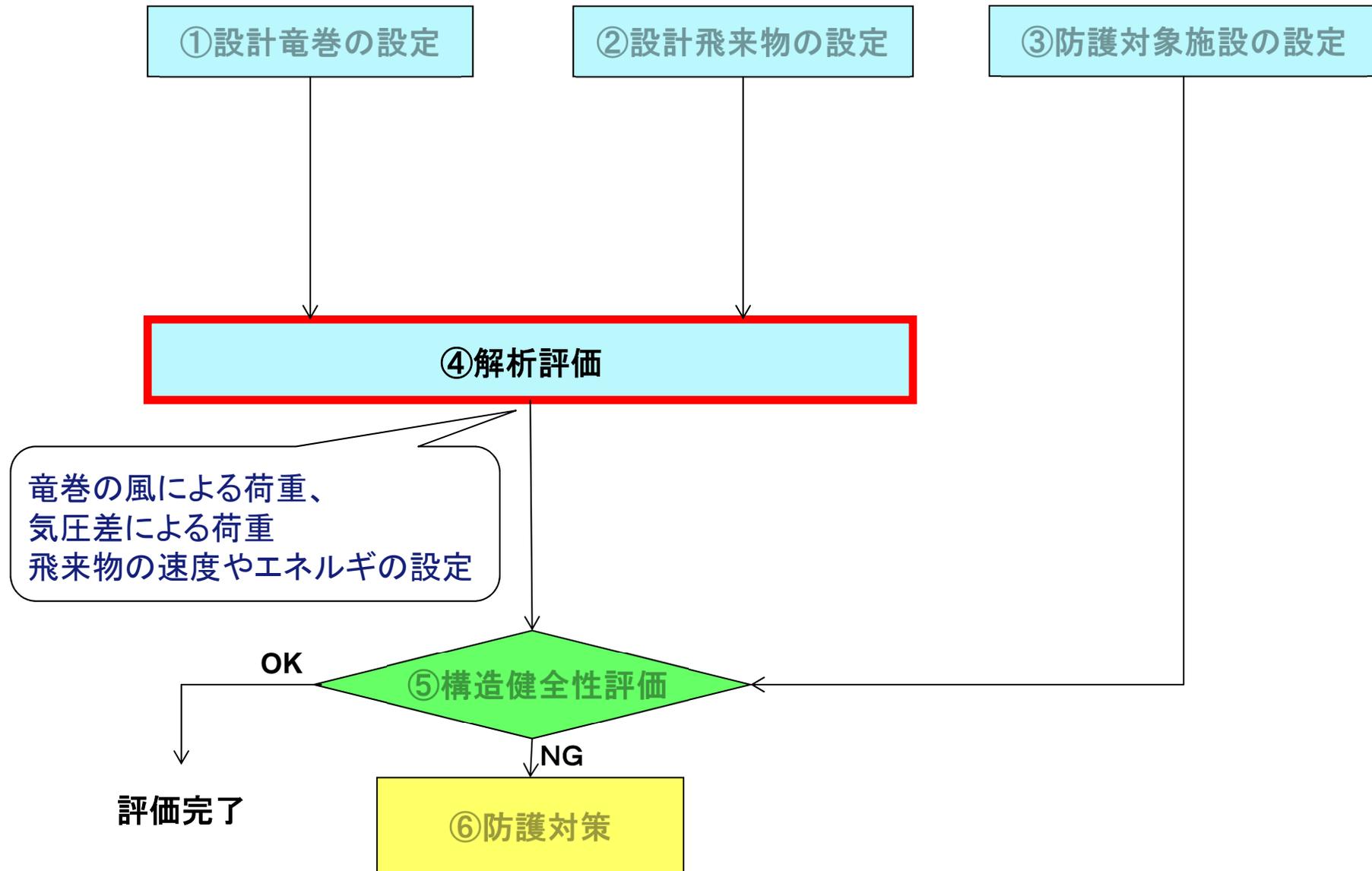


## 5.4 竜巻影響評価(③防護対象施設の設定(3/3))

➤ 竜巻による損傷モードを検討し、機器の構造を踏まえて評価を実施

防護対象施設		考慮する損傷モード
建屋内の重要機器の防護(外殻)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉建屋</li> <li>・タービン建屋</li> <li>・制御建屋</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風荷重、気圧差荷重、飛来物が衝突することによる建屋、屋内設備の損傷</li> </ul>
外気と繋がる重要機器の防護	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中央制御室換気空調設備</li> <li>・非常用換気空調設備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風荷重、気圧差荷重、飛来物が衝突することによる設備の損傷</li> </ul>
屋外設置の重要設備の防護	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下軽油タンク、ピット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風荷重、気圧差荷重、飛来物が衝突することによる設備の損傷</li> <li>・タンクは地下化されているため風荷重、飛来物の衝突荷重は受けない</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・復水貯蔵タンク</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風荷重、気圧差荷重、飛来物が衝突することによる機器の損傷</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・排気筒</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風荷重、飛来物の衝突荷重による機器の損傷</li> <li>・開放されている構造のため、気圧差荷重を受けない</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用海水ポンプ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・竜巻の飛来物による損傷を考慮し、竜巻防護ネットを設置</li> <li>・風荷重、気圧差荷重による設備の損傷</li> </ul>

## 5.5 竜巻影響評価(④解析評価(1/2))

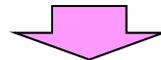


## 5.5 竜巻影響評価(④解析評価(2/2))

### ➤ 解析評価

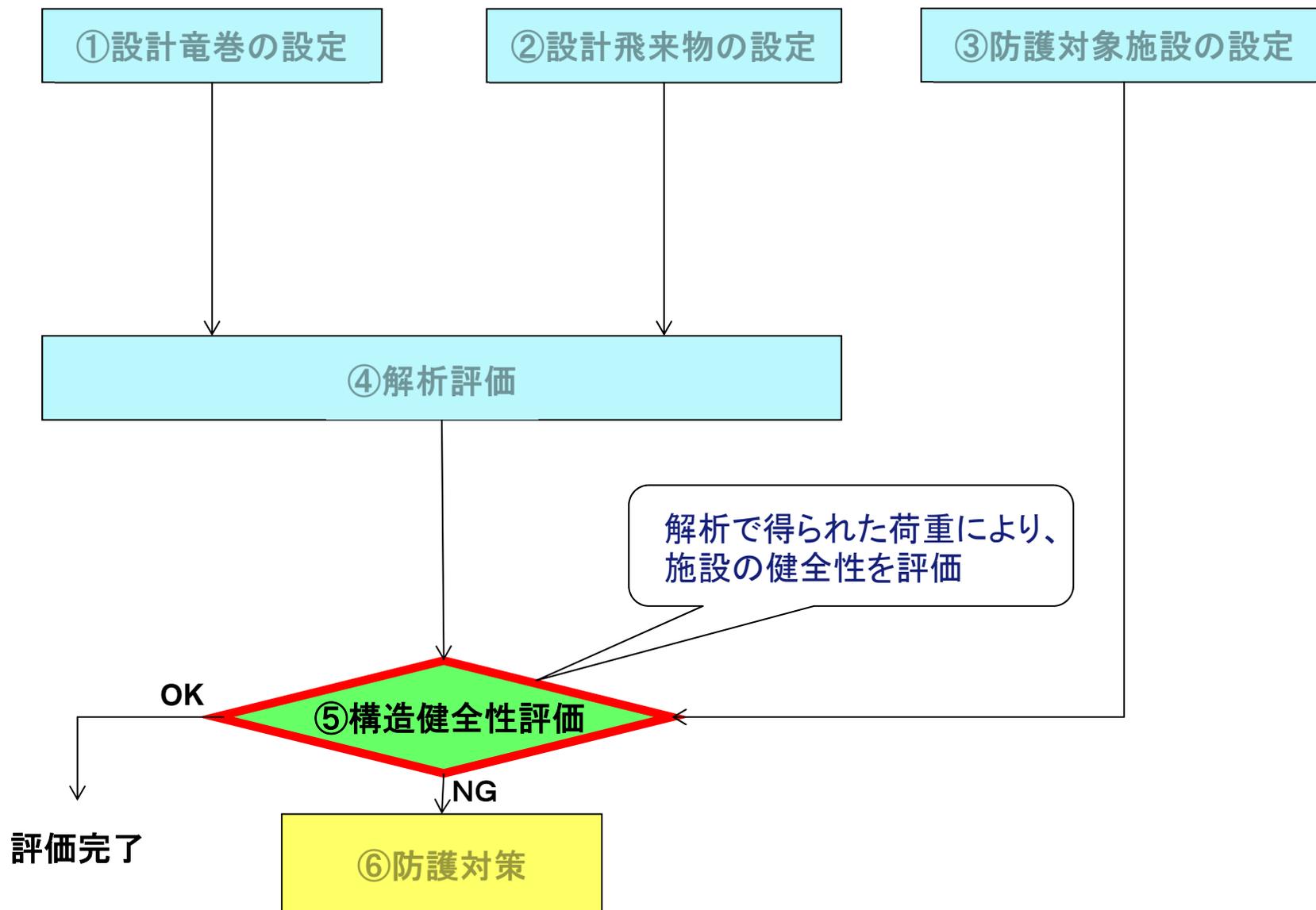
- 設計竜巻風速(100m/s)により、評価対象施設に加わる風荷重を算出
- 竜巻の内部は気圧が低いため、外気との気圧差による荷重を算出
- 竜巻により吹き飛ばされた設計飛来物(鋼製材)が物体に衝突するときの衝撃荷重を算出

荷重条件		備考
風荷重	100m/sの風圧	建築基準法要求(30m/s)を大きく上回る条件
気圧差荷重	76hPaの気圧差	強い台風の中心気圧(約940hPa)並み
衝撃荷重 (飛来物の水平速度)	約46m/s(170km/h)の飛散速度	厚さ20cmのコンクリート板を貫通するほどの衝撃力を設定

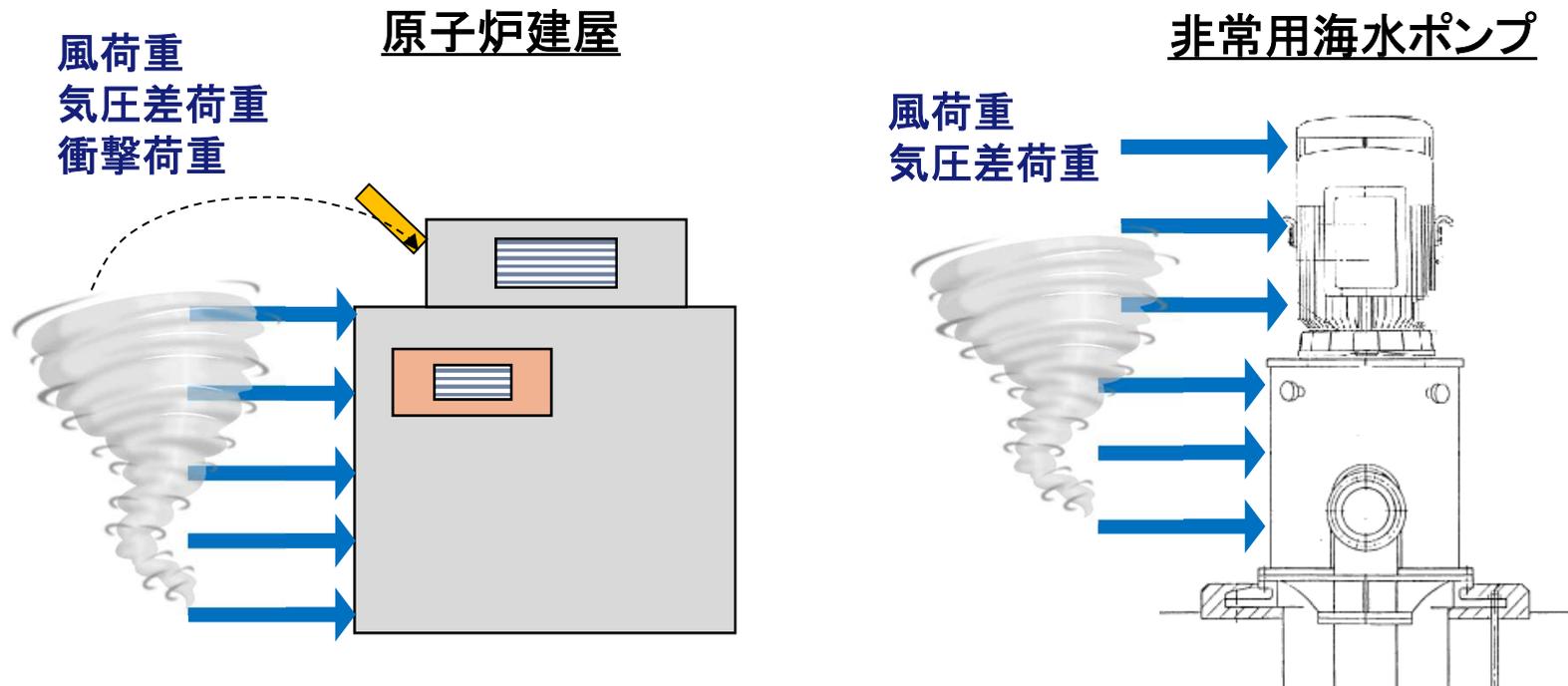


評価対象施設への影響評価においては  
上記の荷重を組み合わせ実施

## 5.6 竜巻影響評価(⑤構造健全性評価(1/2))



## 5.6 竜巻影響評価(⑤)構造健全性評価(2/2)

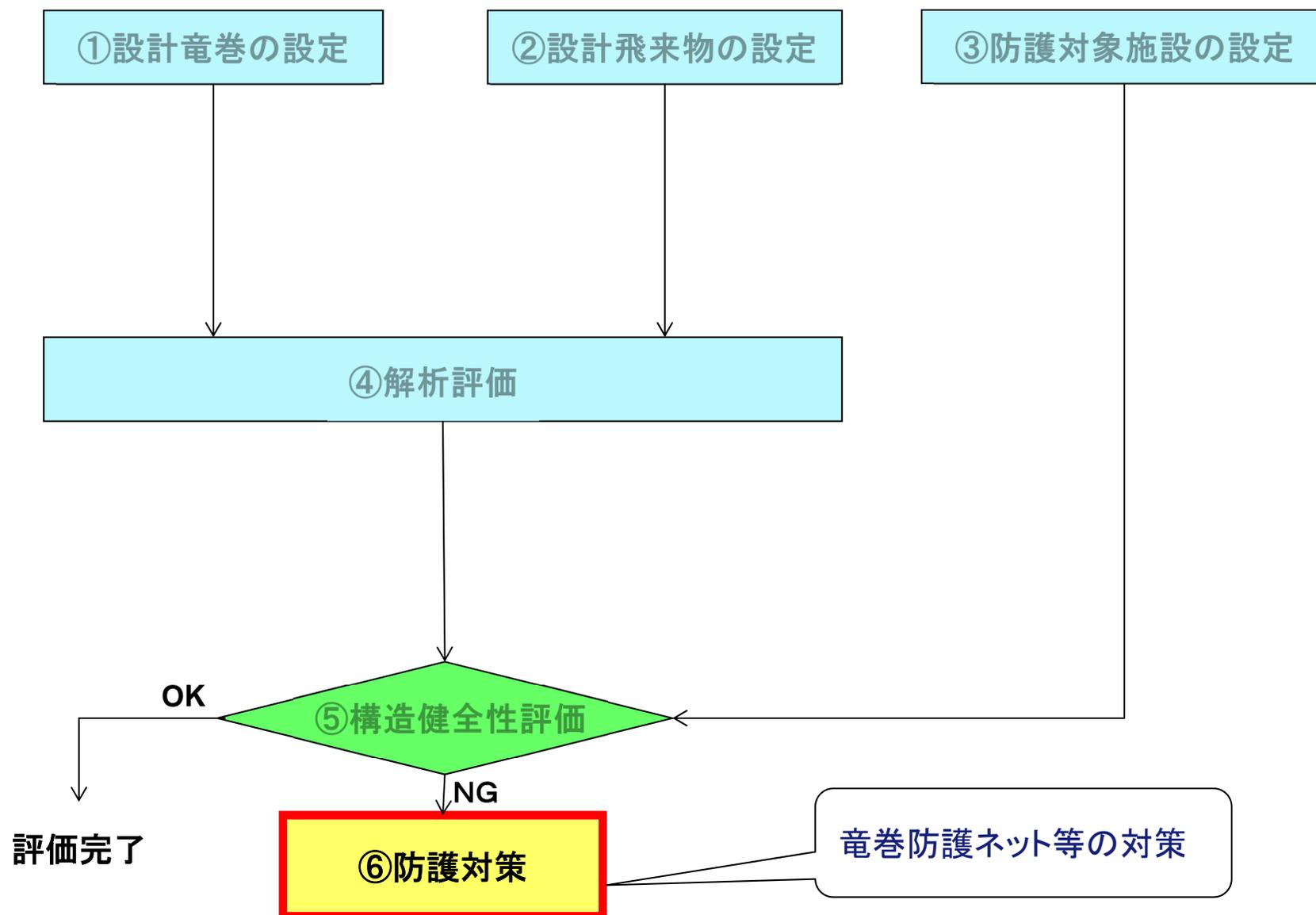


### 【竜巻に対する防護の設計方針】

- 設計荷重に対して構造健全性を維持すること
- 損傷した場合には、取替、補修が可能なこと
- 竜巻の波及的影響に対しても安全機能を損なわない設計とすること

設備の耐力などの詳細評価については、工事認可申請段階にて示していく

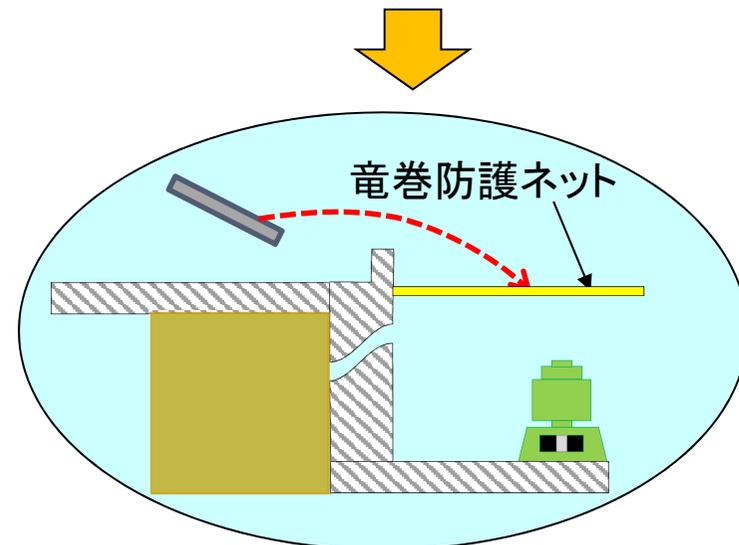
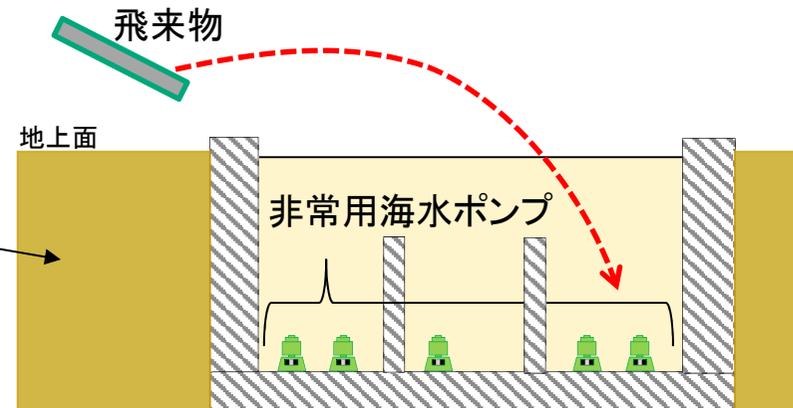
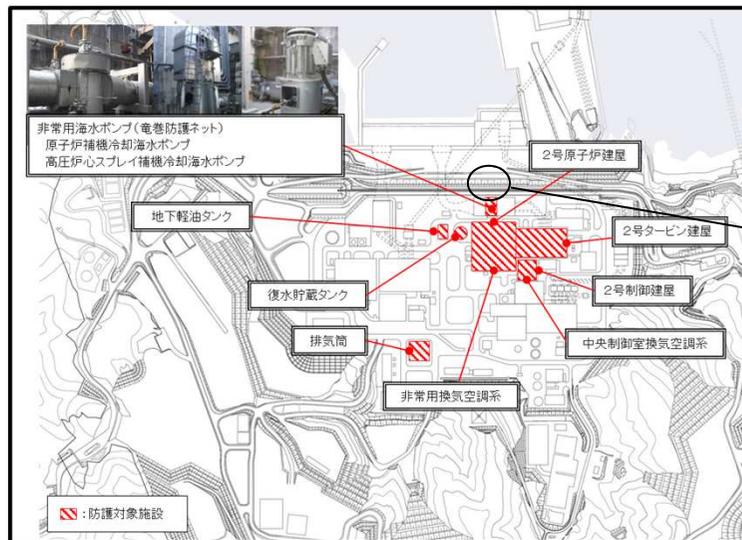
## 5.7 竜巻影響評価(⑥防護対策(1/5))



## 5.7 竜巻影響評価(⑥防護対策(2/5))

### 非常用海水ポンプの防護

- 屋外に設置している非常用海水ポンプが飛来物により損傷することを防止するために、竜巻防護ネットを設置する(現在審議中)

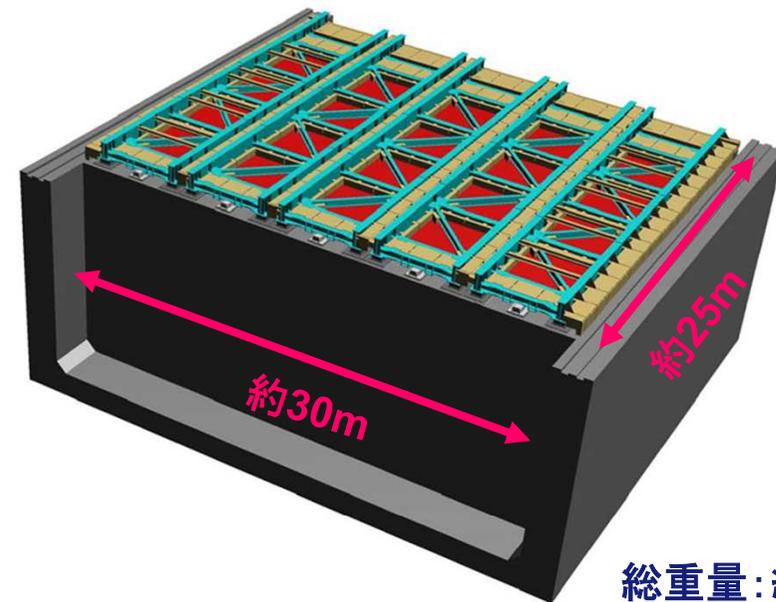


非常用海水ポンプが設置しているピット  
の上面に竜巻防護ネットを設置して、飛  
来物の侵入を阻止する

## 5.7 竜巻影響評価(⑥防護対策(3/5))

- 飛来物の大きな衝撃力を受けることを想定し、鋼製のフレームと鋼製のネット(3枚重ね)で構成
- 非常用海水ポンプの点検のために取外しができる分割構造

海水ポンプ室補機ポンプエリア



総重量:約500t

竜巻防護ネット(新設) 設置イメージ  
(現在設計中)

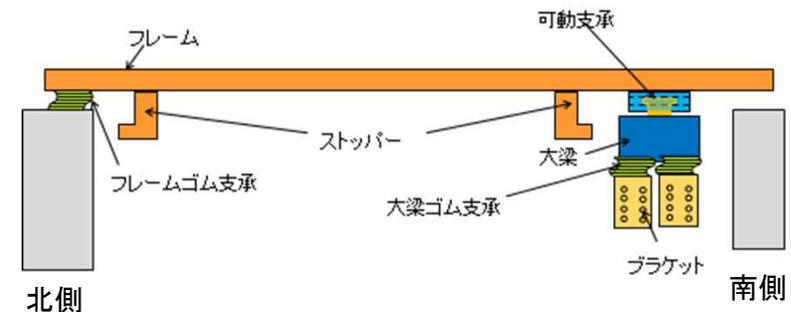
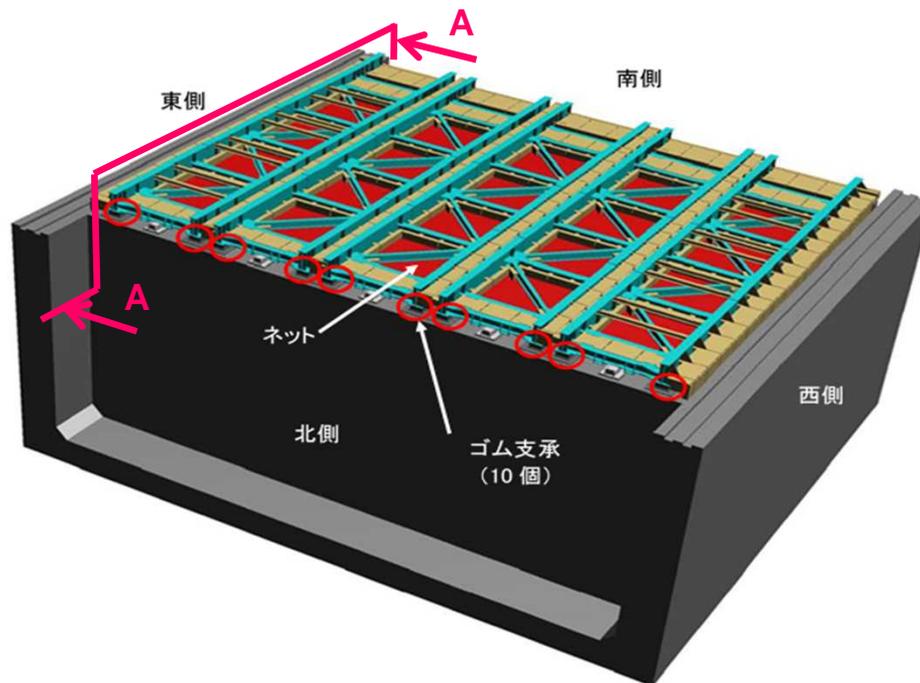
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

## 5.7 竜巻影響評価(⑥防護対策(4/5))

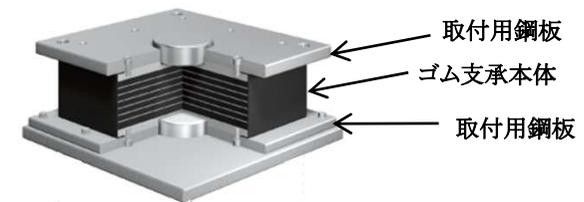
### 竜巻防護ネットの特徴

- 地震の影響を低減させる観点で、支持部にゴム支承※の採用を計画
- 竜巻防護ネットの要素にゴム支承を採用することは、女川2号炉が初めてであり、適合性審査の実績がないことから、特有の課題として、設計・構造成立性について説明中

※：橋梁等で多く採用されており、地震時にゴムが変形することで、地震力を低減させる効果がある



A-A 断面

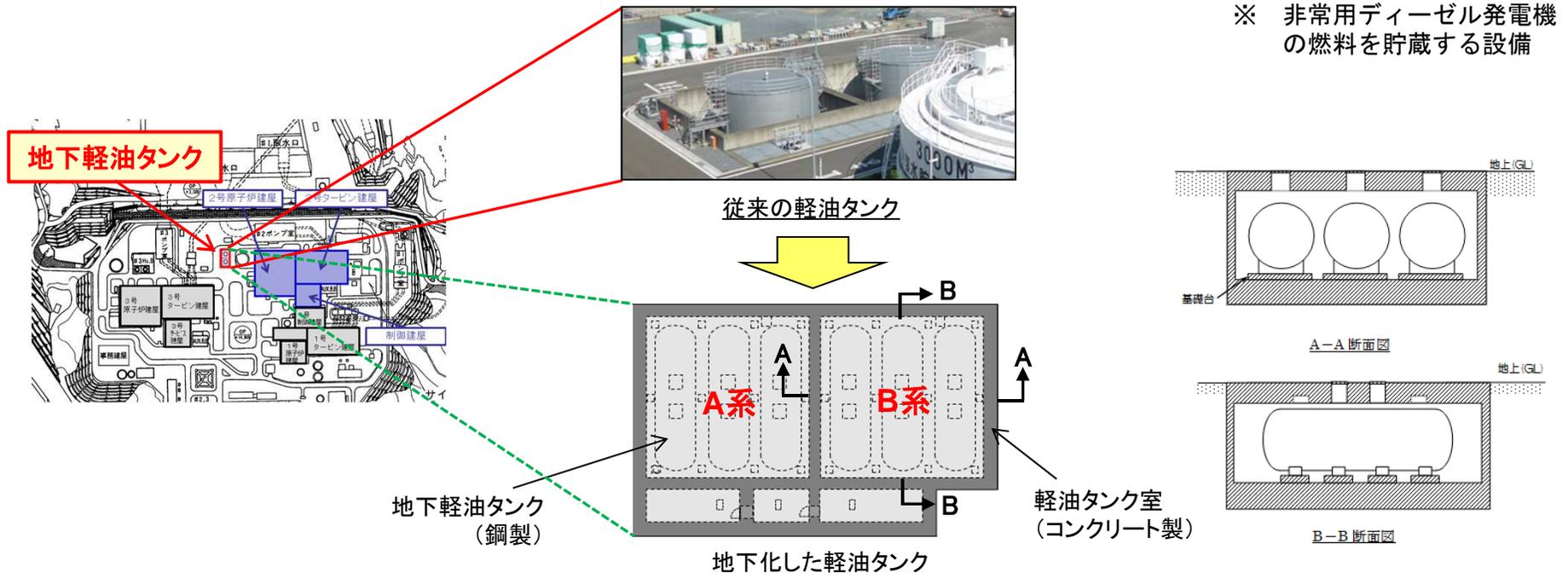


ゴム支承(イメージ)

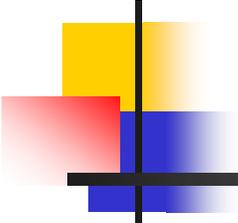
## 5.7 竜巻影響評価(⑥防護対策(5/5))

### 軽油タンクの地下化

- 軽油タンク※に対する竜巻対策としては、申請当初、タンク周辺に防護ネットを設置する計画としていたが、先行プラントの審査状況を踏まえ、軽油タンクに対する外部火災による熱影響や地表面での火災発生を防止する観点から、軽油タンクを地下化することとした
- 竜巻や火山などの自然現象に対しても非常用ディーゼル発電機の信頼性が向上



- ・ 地下軽油タンクは、消防法に基づき設計しており、円筒型横置の鋼製タンクをコンクリート製の軽油タンク室内に設置している
- ・ 地下軽油タンク、軽油タンク室は竜巻等の荷重や基準地震動に対して耐震性を確保する設計としている。また系統分離(3基/系統×2系統)により信頼性を確保した設計としている



## 6. 竜巻防護の運用対策

---

## 6. 竜巻防護の運用対策(1/3)

- 気象庁が発表する竜巻関連の気象情報を踏まえ、竜巻運用対策の実施基準(竜巻警戒レベル)を定める

気象情報	頻度	情報の特徴
雷注意報(竜巻)	数時間前	竜巻が発生しやすい気象状況の周知
竜巻注意情報	直前・発生時	今まさに竜巻が発生しやすい気象状況を周知

上表に加え、気象庁の「竜巻発生確度ナウキャスト」、「雷ナウキャスト」などの詳細情報(10分更新)も活用



竜巻発生確度ナウキャストにおける気象ドップラーレーダーを用いた観測※1

- 竜巻運用対策の実施基準(竜巻警戒レベル)は竜巻関連の気象情報を考慮して段階的に策定する

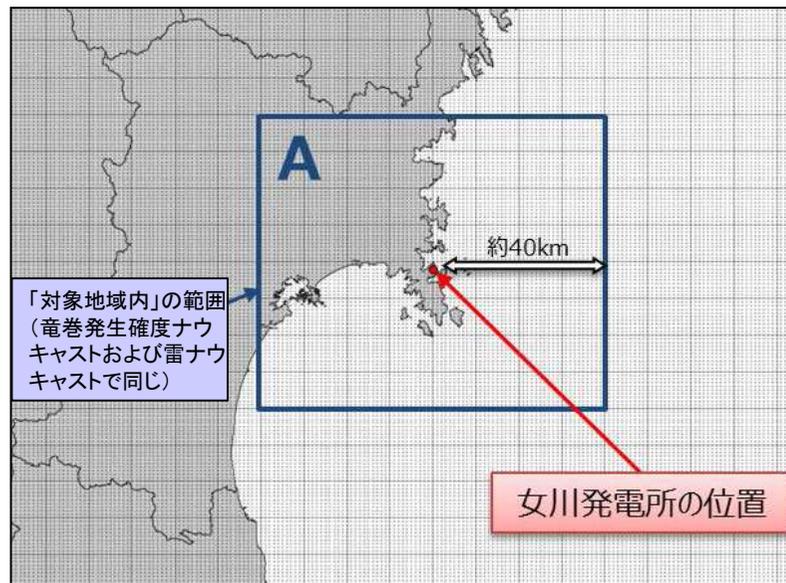
竜巻警戒レベル	運用対策(案)
低 (注意喚起レベル)	竜巻の発生の恐れがあることを周知し、予め屋外作業の中止検討や連絡体制の確認を行う
中 (対応準備レベル)	竜巻の発生の可能性が高いことを周知し、資機材の固縛や車両の避難準備を行う
高 (退避レベル)	竜巻の発生の可能性が非常に高いため、車両や人の避難を行う

※1: 気象庁HP「気象ドップラーレーダーによる観測」より引用

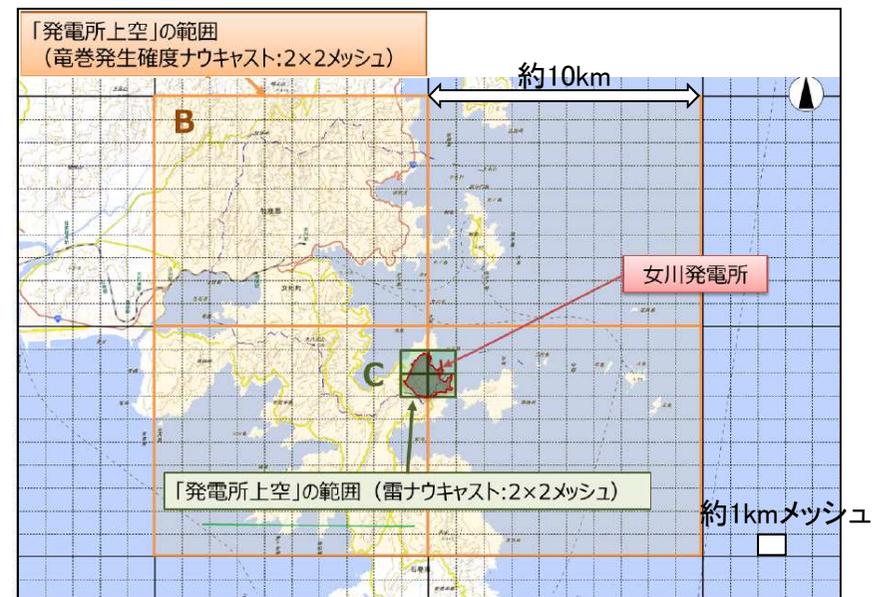
## 6. 竜巻防護の運用対策(2/3)

- 女川原子力発電所の周辺の竜巻関連の気象情報を収集し、竜巻警戒レベルを発令する

竜巻警戒レベル	発令条件(案)
低 (注意喚起レベル)	女川原子力発電所周辺の石巻市および女川町で雷注意報(竜巻)が発令
中 (対応準備レベル)	対象地域内(広域)(下図A)で竜巻発生確度ナウキャスト等による確度情報が発令
高 (退避レベル)	発電所上空(詳細)(下図B、C)で竜巻発生確度ナウキャスト等による確度情報が発令



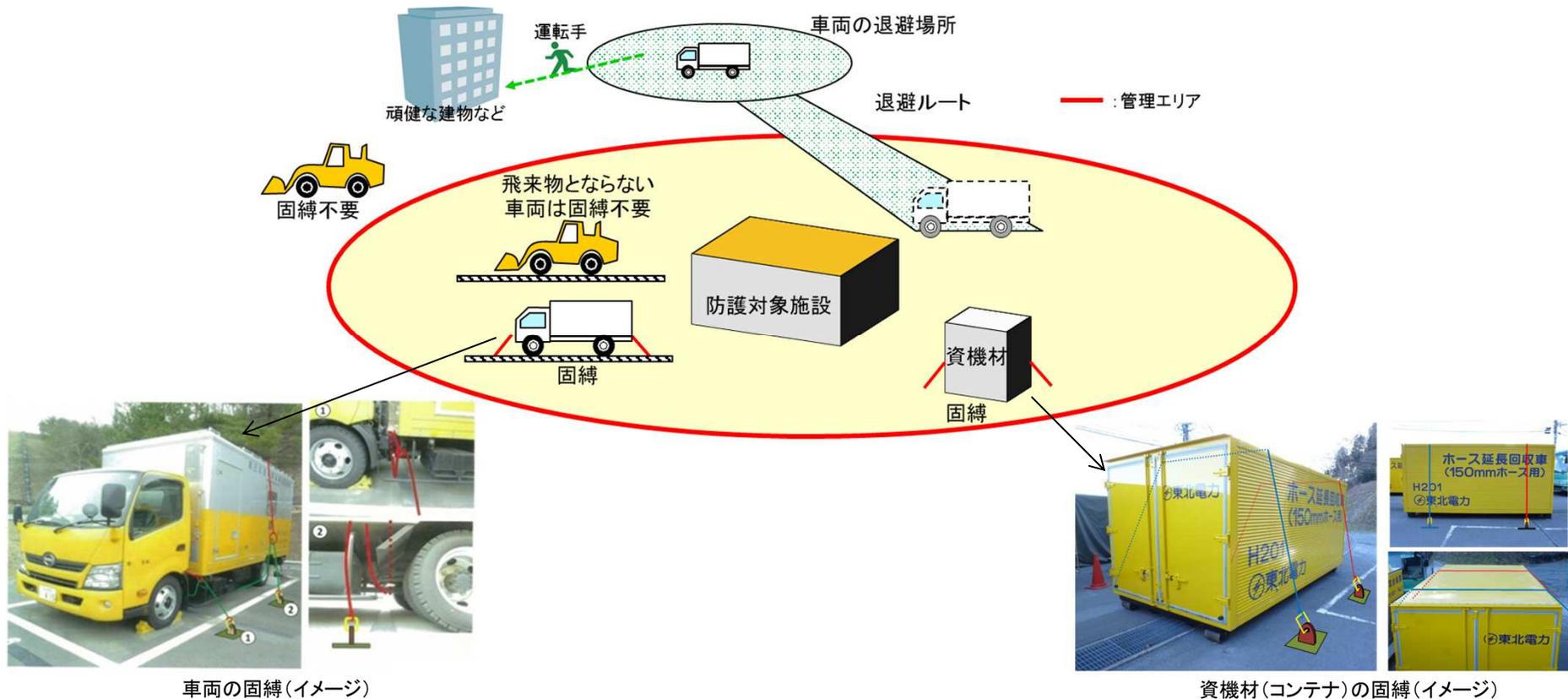
対象地域(広域)

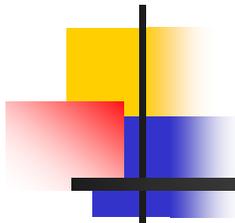


発電所上空(詳細)

## 6. 竜巻防護の運用対策(3/3)

- 防護対象施設の周囲に管理エリアを設定し、管理エリアの範囲内には原則として、車両や資機材を配置しない運用とする
- 管理エリア内に車両や資機材を配置する場合には、解析評価を実施し、飛来物となる可能性がある場合には固縛対策を実施
- 車両を固縛せず停車させる場合は、即座に車両を移動できる体制を構築し、退避レベルとなった場合には退避場所に車両を移動





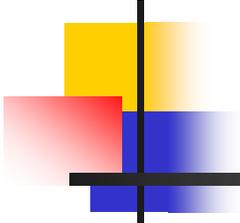
## 7. 適合性審査の状況

---

## 7. 適合性審査の状況

- 竜巻に対する設計方針について、当社はこれまでに審査会合を8回実施
- 審査では、飛来物の飛散評価手法の適用に対する先行プラントとの相違を踏まえた、妥当性に関して質問・指摘を受けて説明を実施。竜巻に対する全体的な設計方針に対する回答は概ね終了
- 竜巻防護ネットの設計方針についてご説明中  
 (竜巻防護ネットの支持部にゴム支承等を用いる設計を計画中であるが、同様の設計に対する審査実績がないことを踏まえて、特有の課題として、設計・構造成立性について説明中)

主な質問・指摘事項	回答
竜巻影響評価における不確実性を踏まえて、適切な保守性が考慮されていることを示すこと	設計竜巻の設計において、日本での最大竜巻の実績や将来的な気候変動等を勘案し、100m/sを設定しており、評価全体の各プロセスにおいて保守性を確保している
飛来物の飛散評価手法(フジタモデル)の評価において不確かさを考慮して保守性を説明すること	実際の竜巻現象の不確かさ、飛散評価手法における不確かさを考慮して、パラメータ等の設定において保守性を確保している



# 參考資料

---

## 確率論的に求めた竜巻の最大風速( $V_{B2}$ ) (1/2)

竜巻ガイドに基づき、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速( $V_{B2}$ )を求める

➤ 竜巻検討地域の設定

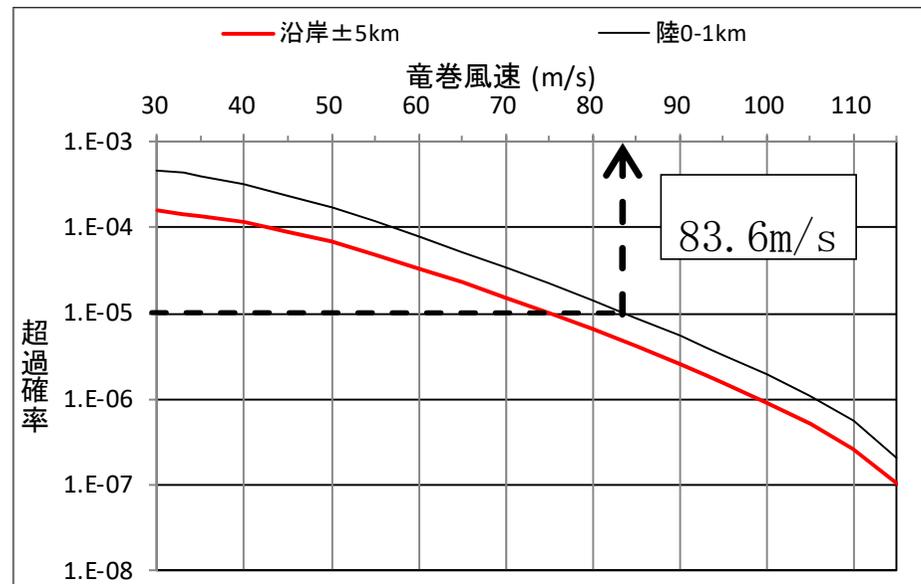
- 気候区分等の確認結果を踏まえ、「北海道襟裳岬から千葉県九十九里町にかけての海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲」を竜巻検討地域に設定



竜巻検討地域

## 確率論的に求めた竜巻の最大風速 ( $V_{B2}$ ) (2/2)

- 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ )
  - 最大風速 ( $V_{B2}$ ) を算定するため、竜巻検討地域全域 (沿岸 ±5km) における竜巻の年発生数の確率分布を考慮して、ハザード曲線 (竜巻風速と年超過確率の関係) を求める
  - さらに、竜巻検討地域を 1km ごとに細分化したエリア (陸側 0~1km) におけるハザード曲線を求める
  - 竜巻ガイドを踏まえて、上記ハザード曲線における  $10^{-5}$ /年の風速値 (最大値) を  $V_{B2}$  と設定する
- 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) は 83.6m/s (陸側 0~1km) とする



竜巻風速のハザード曲線