



2022年9月5日
静岡県防災・原子力学術会議
(原子力分科会) 資料①

浜岡原子力発電所における 外部火災および竜巻への対応について

中部電力株式会社

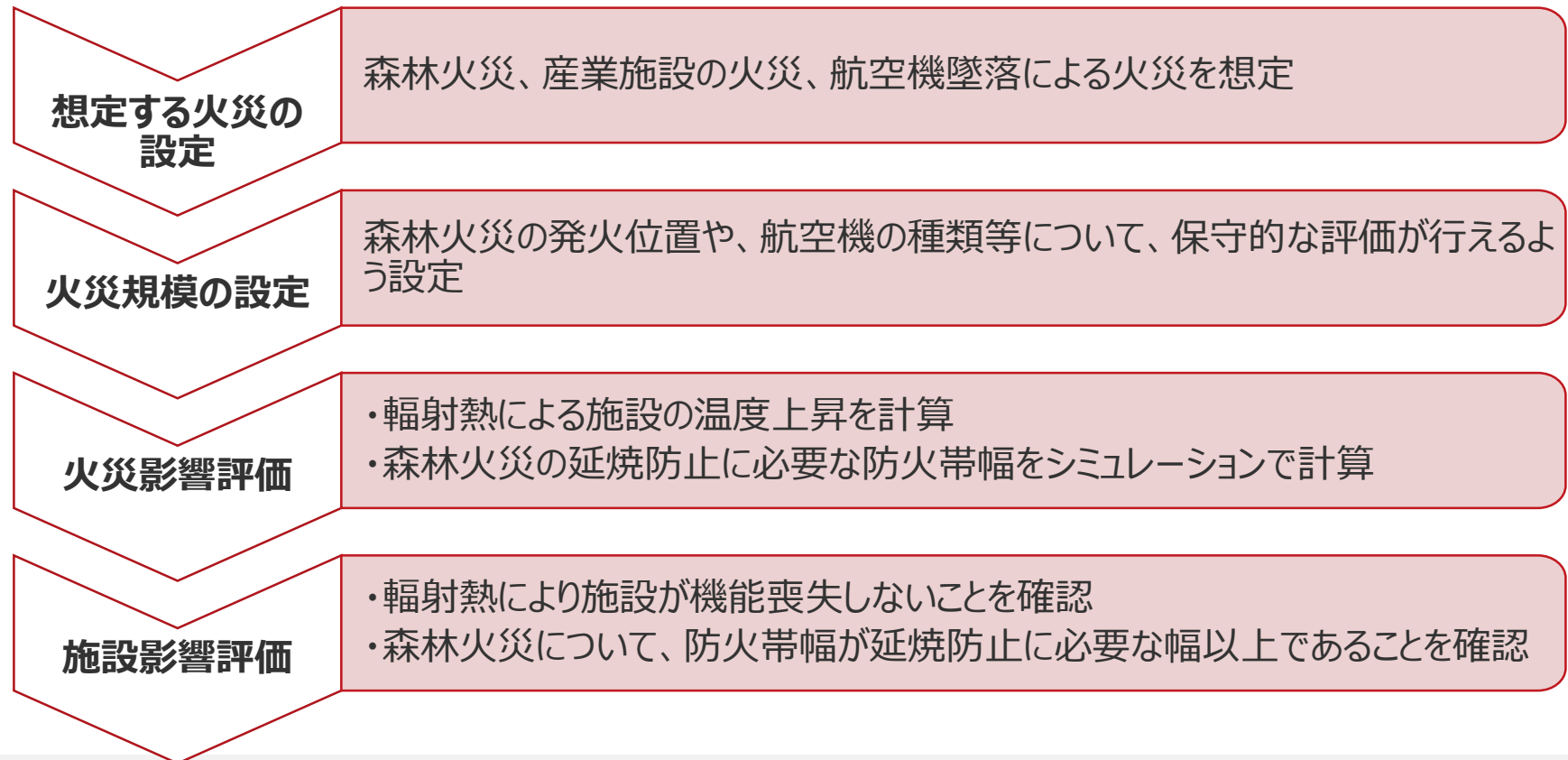
2022年9月5日

外部火災対策

外部火災影響評価ガイド

- 新規制基準における「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」にしたがって対策を実施する。

評価ガイドは発電所敷地外で発生する火災が原子炉施設へ影響を与えないことを評価するための手順の一例を示すもの。評価ガイドの概要は以下のとおり。



1. 外部火災対策の目的
2. 外部火災対策
3. 火災発生時の運用

1 外部火災対策の目的

- 原子力発電所の敷地内外において以下の火災を想定し、安全機能、つまり止める・冷やす・閉じ込める機能を有する設備（以下「防護対象設備」）に対して火災そのものに加え、延焼や放射熱などの影響の有無を確認し、影響がある場合は対策を実施する。

森林火災

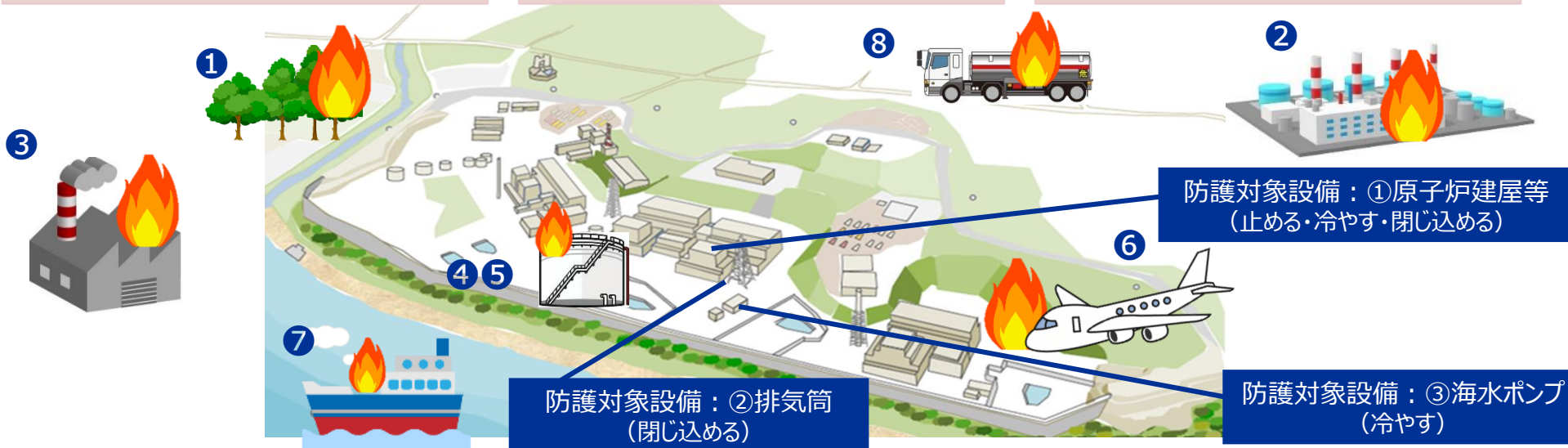
- 発電所敷地周辺で発生する**①森林火災**

燃料貯蔵施設の火災

- 燃料貯蔵施設の火災
 - 敷地外：**②石油コンビナート****③産業施設**の火災
 - 敷地内：**④軽油タンク**、**⑤重油タンク**の火災

輸送機器の火災

- 敷地内への**⑥航空機墜落**による火災
- 敷地周辺を運行中の**⑦船舶**や**⑧燃料輸送車両**の火災



2 外部火災対策 ①構成

- 原子力発電所における外部火災対策として、熱影響評価および防火帯の設置を行う。

外部火災対策

- 火災の輻射熱により原子炉施設の安全機能が喪失する恐れがあることから、想定した火災に対して**熱影響評価**を実施し、影響のある場合は対策を実施する。
- また、森林火災については、延焼により原子炉施設の安全機能が喪失する恐れがあることから、**防火帯※**を設置する。

※防火帯：可燃物が無い、延焼被害を食い止めるための帯状のエリア

熱影響評価および防火帯の設置方法

- ① **熱影響評価**：想定した火災について、輻射熱による防護対象施設の温度上昇を評価し、影響がある場合は対策を実施。（対策例：軽油タンクの地下化）
- ② **防火帯の設置**：森林火災をシミュレーションする解析コードにより、発電所防護に必要な防火帯幅を評価し、防火帯を設置。

2 外部火災対策

① 熱影響評価(1/4)

目的

対策

運用

- 8つの火災想定に対して、熱影響評価条件をそれぞれ決定し、熱影響評価結果を踏まえて対策を実施する。

【各火災想定の設定】（評価条件は、最大限保守的となるよう設定。）

火災想定 (附番はp.5参照)	熱影響評価条件
① 森林火災	発火地点を複数想定 最も評価が厳しくなる場所を発火地点に設定
③ 産業施設	発電所から10km圏内に位置する危険物貯蔵施設を確認 保有する危険物量や距離を考慮し、代表施設を選定
④⑤ 敷地内危険物タンク	発電所内の軽油タンク、重油タンク 保有する危険物量や距離を考慮し、火災を想定
⑥ 航空機墜落	航空機が落下し火災が発生するが、その際に敷地内重油タンク火災の重畳を想定
⑦ 船舶	浜岡原子力発電所は敷地内に港がないため、周辺海域を航行している船舶を想定
⑧ 燃料輸送車両	最大規模の燃料輸送車両が発電所敷地周辺道路で火災を起こすことを想定
② 石油コンビナート	発電所から直近のコンビナートは、約54km離れているため火災想定から除外

【対策の有無】輻射熱による防護対象設備の温度上昇を評価し、影響がある場合は対策を実施する。

2 外部火災対策

① 熱影響評価(2/4)

目的

対策

運用

- 熱影響評価においては保守的な条件を設定し、防護対象設備ごとに判定基準を設けている。

【熱影響評価条件】 主に以下の点を考慮することで保守性を確保

- **輻射強度を一定**：燃料が燃え尽きるまでの間一定として評価
- **燃料満載**：火災源（タンク等）は燃料が満載の状態の評価
- **ばい煙による軽減効果なし**：火災源から発生するばい煙による軽減効果なし

【判定基準】

防護対象施設	判定基準
①原子炉建屋等	施設外壁の温度が許容温度を超えないこと
②排気筒	排気筒鉄塔の温度が許容温度を超えないこと (排気筒の外側に鉄塔があり、評価上鉄塔が厳しい)
③海水ポンプ	電動機軸受部の温度が許容温度を超えないこと

2 外部火災対策

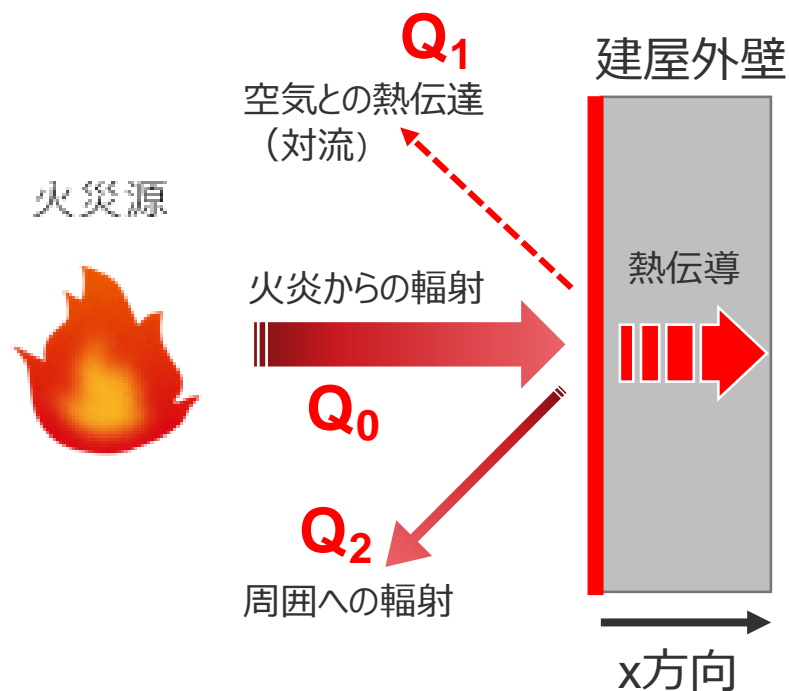
① 熱影響評価(3/4)

- 建屋の場合を例に影響評価を示す。
- 建屋外壁が吸収する熱量については対流や周囲への輻射を踏まえて算出する。

影響評価方法（建屋の例）

・建屋外壁表面が吸収する熱量は

$$Q_0 - Q_1 - Q_2$$



$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots \text{外壁内部の熱伝導を表す式}$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = Q_0 - Q_1 - Q_2 \dots \text{外壁表面における熱収支}$$

上記の式から外壁表面における温度 T を計算

- ρ : 外壁の密度
- c : 外壁の比熱
- λ : 外壁の熱伝導率
- t : 火災源の燃焼時間

2 外部火災対策

① 熱影響評価(4/4)

目的

対策

運用

- 計算で得られた防護対象施設の温度が許容温度を超えないことを確認する。

【評価結果】

防護対象施設	判定基準	結果
①原子炉建屋等	施設外壁の温度が許容温度を超えないこと	OK
②排気筒	排気筒鉄塔の温度が許容温度を超えないこと (排気筒の外側に鉄塔があり、評価上鉄塔が厳しい)	OK
③海水ポンプ	電動機軸受部の温度が許容温度を超えないこと	OK

【評価結果の一例】

防護対象施設		許容温度	森林火災	3号機軽油 タンク	航空機
①原子炉建屋		200℃	52℃	92℃	118℃
②排気筒		325℃	52℃	75℃	131℃
③海水ポンプ	上部軸受	80℃	71℃	71℃	77℃
	下部軸受	95℃	66℃	66℃	72℃

2 外部火災対策

②防火帯設置(1/4)

目的

対策

運用

- シミュレーションコードを用いて、複数の発火地点から火災影響が最も大きい発火地点を評価し、**最大火線強度に基づき防火帯幅を設定する。**

位置決定

発電所内の施設・設備を取り囲むように防火帯位置を決定

発火地点の選定

人為的な火災が想定される場所、発電所に向かって森林が続いている場所から複数設定

火線強度の計算

シミュレーションコードにより火災影響が大きい発火地点を求め、防火帯近傍で最大となる火線強度を計算

防火帯幅の決定

最大火線強度から防火帯幅を設定



※火線強度：火災源から放出されるエネルギーの大きさ
森林火災の強度を表す指標

2 外部火災対策

②防火帯設置(2/4)

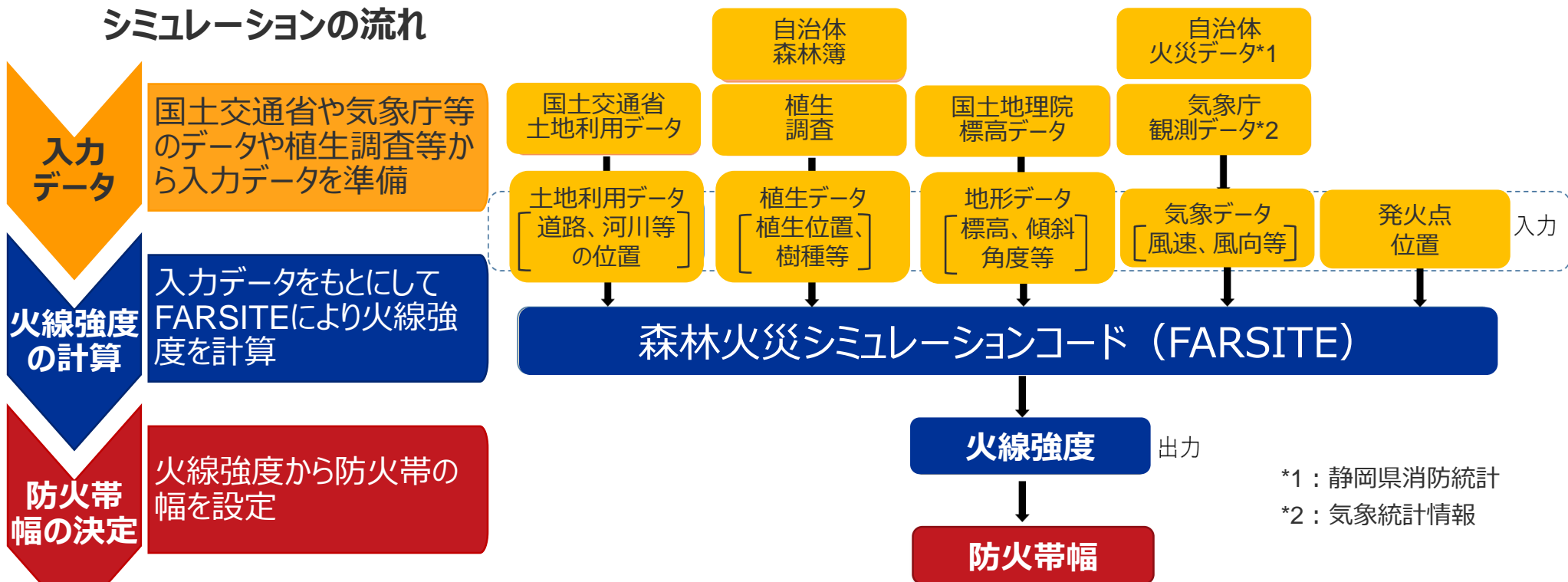
目的

対策

運用

- 国土交通省等のデータおよび植生調査等による入力データ、シミュレーションコードを用いて火線強度を求め、延焼防止に必要な防火帯幅を設定する。

シミュレーションの流れ



FARSITEは米国農務省が開発したコード (Fire Area Simulator) であり世界で広く用いられている。火災拡大に加えて飛び火等も評価可能。地理情報により火災拡大・強度について空間的に提示することが可能。

2 外部火災対策

②防火帯設置(3/4)

目的

対策

運用

- FARSITEから導き出された防火帯近傍における**最大火線強度は5,577kW/m**。(図1)。
- 上記の最大火線強度ケースにおける発火開始地点は、国道150号線沿いの発電所北側。(図1)
- 防火帯幅は、最大火線強度から求められた20.8mを踏まえて、**21m**に設定。(図2)

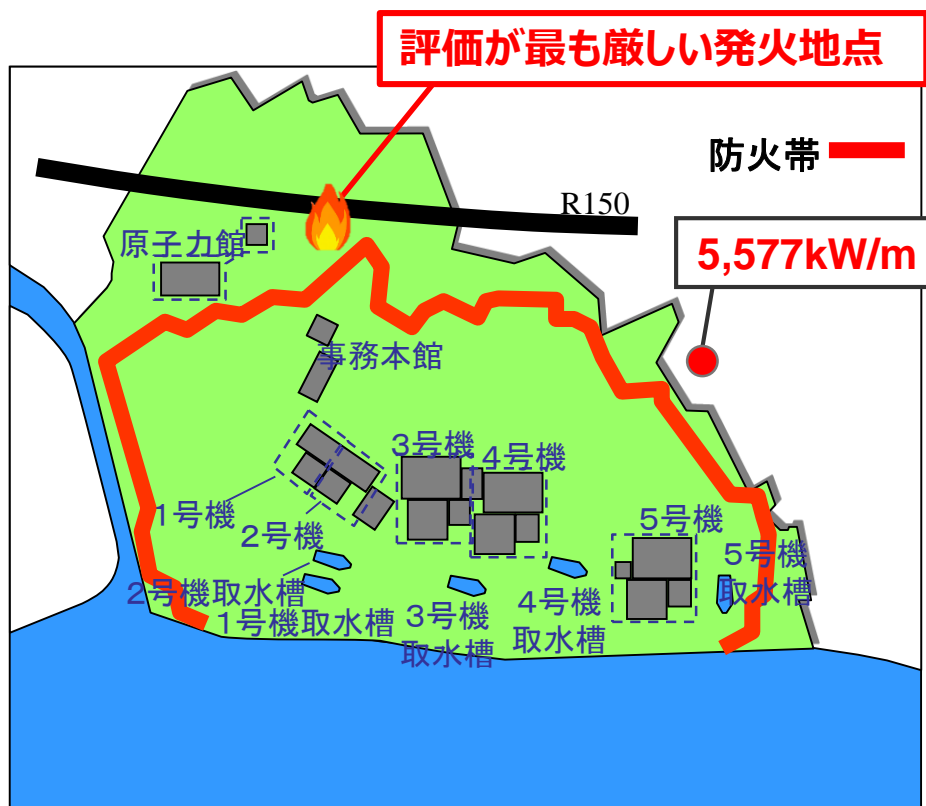


図1 発火開始地点と最大火線強度

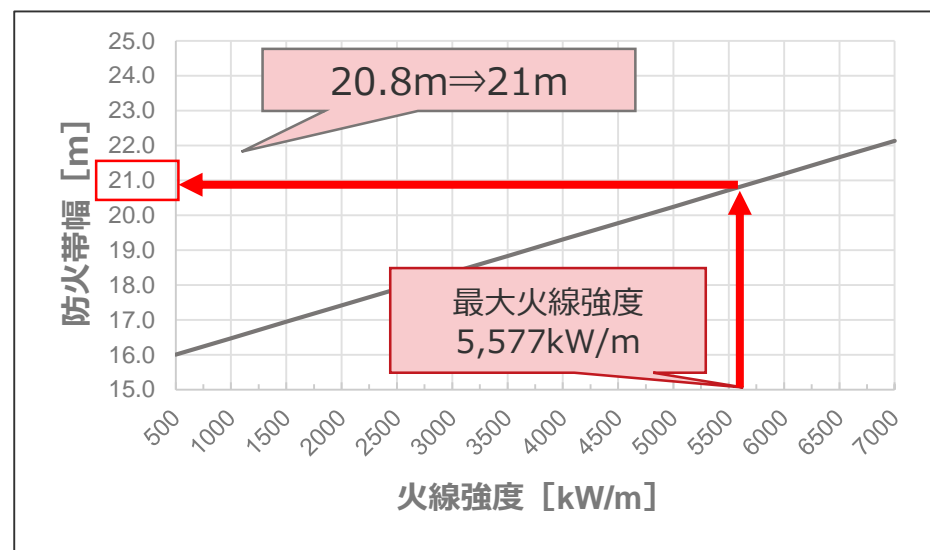


図2 防火帯幅と火線強度の関係※

※森林火災が防火帯を超えて延焼することを防止するのに必要な防火帯幅。海外の文献を参考に設定。

2 外部火災対策

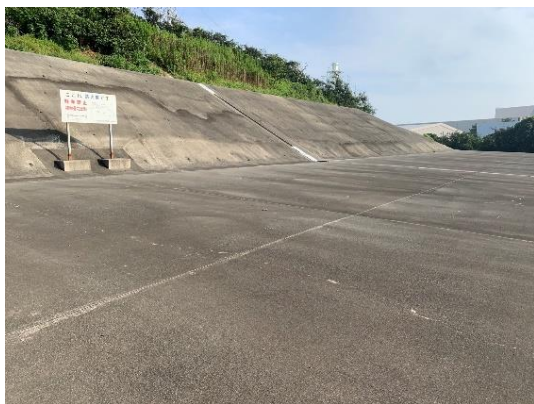
②防火帯設置(4/4)

目的

対策

運用

- 樹木伐採後の土砂流出等を考慮し、現場状況に応じてモルタル吹付けを実施した。(写真①③参照)
- 駐車車両等の可燃物および消火活動に支障となるものは配置しない。(写真②参照)



写真①



写真③



写真②

目的

対策

運用

3 火災発生時の運用(1/3)

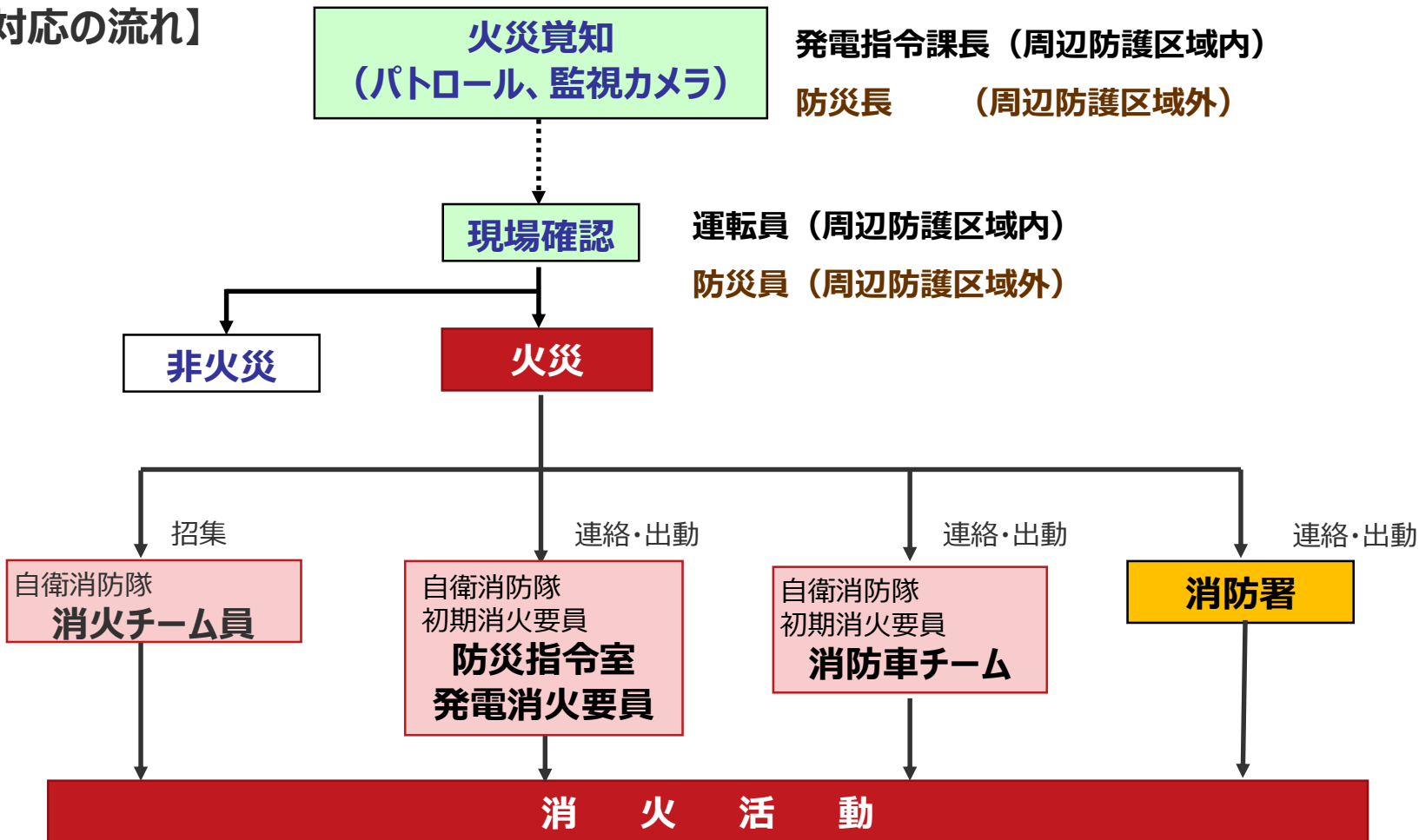
- 発電所には初期消火要員が常駐し、万一の火災に備えている。
- 火災発生時には初期消火要員に加え自衛消防隊（消火チーム員）を招集し、消火にあたる。

要員		人数	役割	
初期消火要員	防災指令室	防災長	1名 消火要員の指揮、消防署および関係部署への通報・連絡、消防隊員と自衛消防隊本部との連絡調整	
		防災員	4名 現場確認、初期消火活動、消防隊員の現場誘導、防災長支援等（3名） 防災長現場出勤時の代行（1名）	
	消防車チーム		正門警備員3名 防災員2名(兼務)	化学消防自動車、小型消防ポンプ付水槽車等による初期消火活動
	当該号機発電指令課長 または廃止措置工事課副長(当直)		1名	消防署および関係部署への通報・連絡等、他号機の応援を依頼
	発電消火要員(運転員)		3名	現場確認、初期消火活動
	防護員		3名	消防隊員後続隊の周辺防護区域内への現場誘導（1名） 周辺防護区域内火災時の各防護ゲートにおける緊急車両および人員の通行対応（2名）
自衛消防隊（消火チーム員）		4名（20名選任）	消火活動、自衛消防本部との連携	

3 火災発生時の運用(2/3)

- 火災覚知を受けて運転員または防災員が現場を確認し、**自衛消防隊が公設消防と連携して消火活動を行う。**

【初動対応の流れ】



目的

対策

運用

3 火災発生時の運用(3/3)

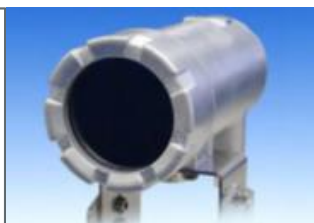
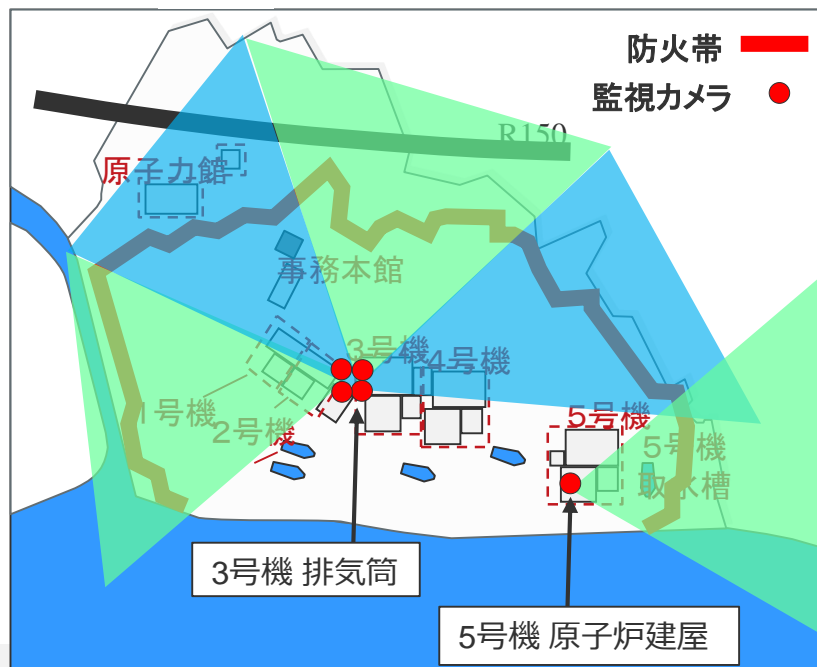
- 森林火災は、防災指令室から**監視カメラ**で**覚知**することが可能。また、火災を覚知したときは、消防車両により、**防火帯付近に早期に予防散水**を行う。

【火災の覚知】

- 固定式の監視カメラにより、防災指令室において森林火災の状況の把握が可能。（監視角度：57度、監視距離：約1km）
- 発電所の高所に**赤外線カメラ**と**可視光カメラ**を5台ずつ設置。

【初期消火】

- 消防自動車により、早期に防火帯境界付近等に**予防散水**を行う。



監視カメラ





竜巻対策

竜巻影響評価ガイド

- 新規基準における「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」にしたがって対策を実施する。

評価ガイドは竜巻が原子炉施設へ影響を与えないことを評価するための手順の一例を示すもの。評価ガイドの概要は以下のとおり。

設計竜巻の設定

観測記録をもとに基準竜巻を設定し、基準竜巻に対して風速の割り増しを行い設計竜巻を設定

竜巻影響評価

竜巻モデルをもとに、竜巻で生じる荷重や飛来物の速度等を計算

施設への影響評価

- ・竜巻荷重により施設が機能喪失しないことを確認
- ・飛来物の貫通等により施設が機能喪失しないことを確認

1. 竜巻対策の目的
2. 竜巻の影響評価プロセスおよび対策
3. 竜巻襲来時の運用

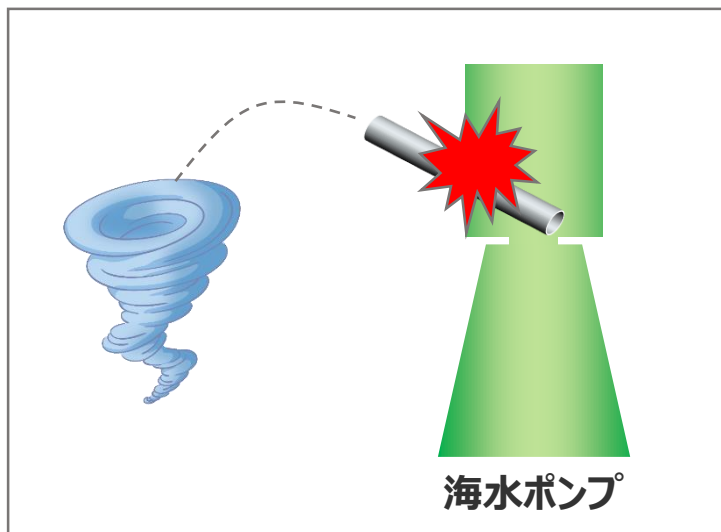
1 竜巻対策の目的

竜巻対策の目的

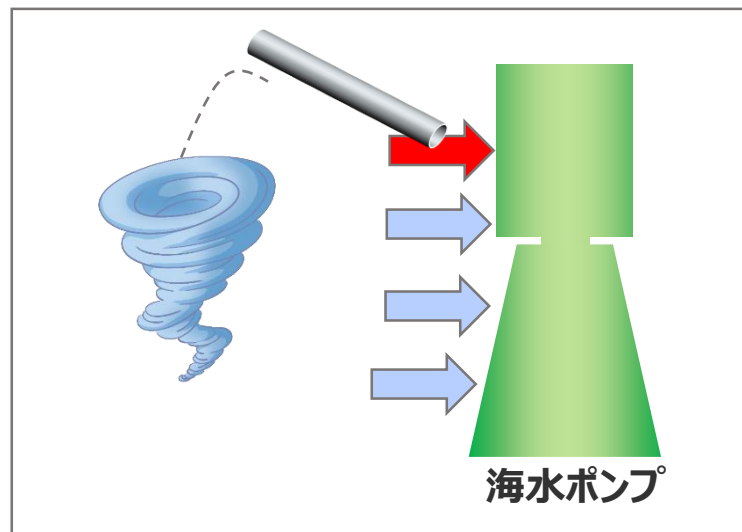
竜巻が発生したとき、**飛来物による設備の貫通**や**竜巻荷重**により、原子炉施設の安全機能（止める・冷やす・閉じ込める）が損なわれることのないよう、防護対象設備を防護する。

【竜巻被害の特徴】

- 竜巻に巻き上げられて、様々なものが猛スピードで飛んでくる。
- 竜巻は風速が非常に速く、建物の倒壊や、車両が横転する。



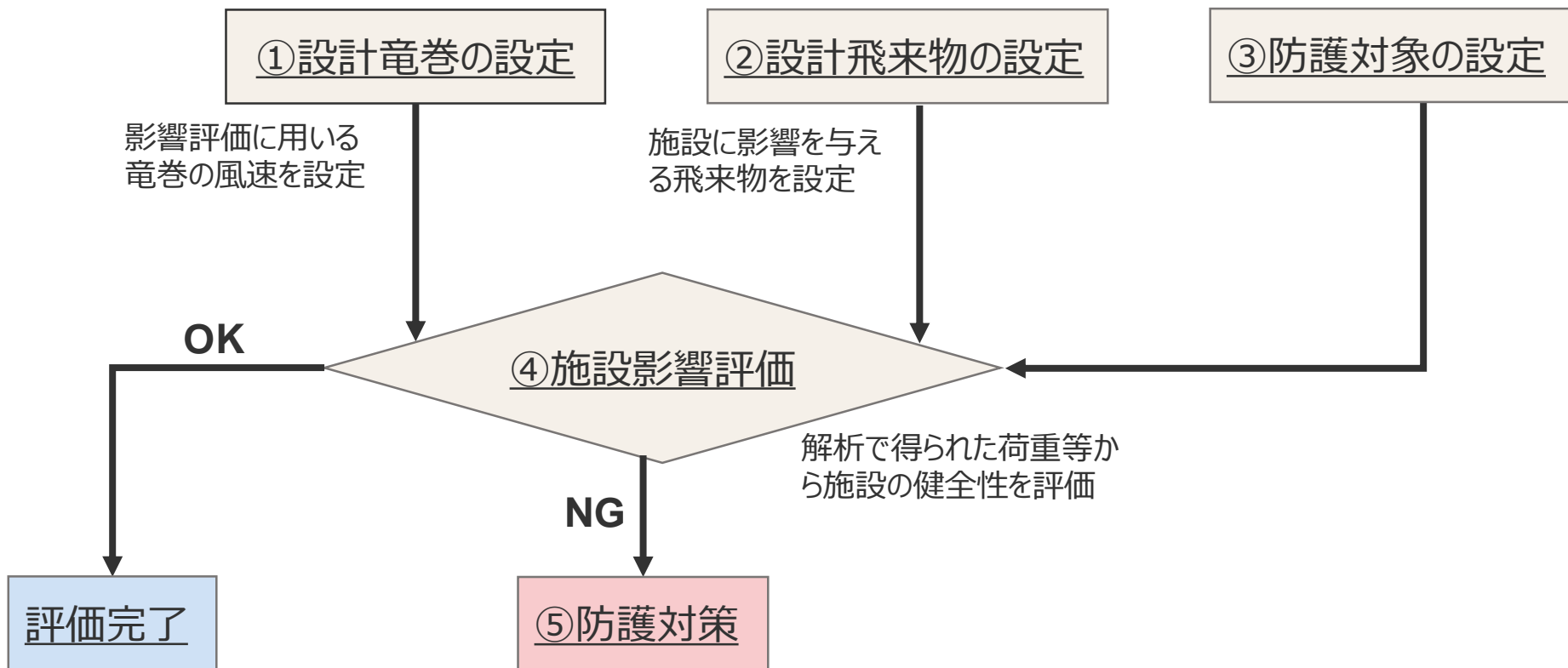
飛来物の貫通



風や飛来物による荷重

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

- 想定する竜巻（設計竜巻）、想定する飛来物（設計飛来物）から、**飛来物の貫通防止に必要な部材の厚さや竜巻荷重を評価**するとともに、防護対象設備への影響を評価し必要に応じて防護対策を講じる。



2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

① 設計竜巻の設定(1/2)

目的

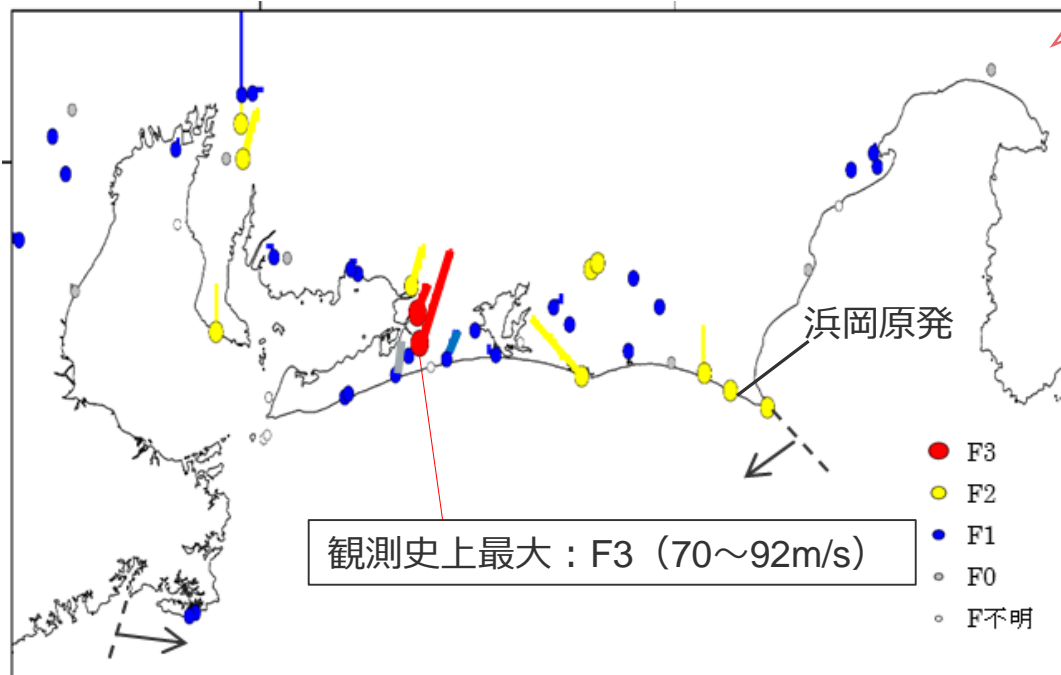
対策

運用

- 過去最大の竜巻風速と確率分布による竜巻風速を比較し、基準竜巻および**設計竜巻**を設定する。
- このうち、過去最大の竜巻風速はフジタスケールF3レベルであり、F3の最大値92m/sとする。

過去最大の竜巻風速

竜巻検討地域（発電所と気象条件が類似の地域）



竜巻検討地域で1961年以降に発生した竜巻をフジタスケールに基づき分類

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

フジタスケール：竜巻などの突風により発生した被害の状況から風速を大まかに推定したもの

F3 (70~92m/s) の最大値を取って、過去最大の竜巻風速を**92m/s**とする。

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

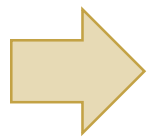
① 設計竜巻の設定(2/2)

- 確率分布による竜巻風速は90.4m/sであることから、基準竜巻を92m/sとし、**設計竜巻はこれを安全側に切り上げて100m/sとする。**

確率分布による竜巻風速

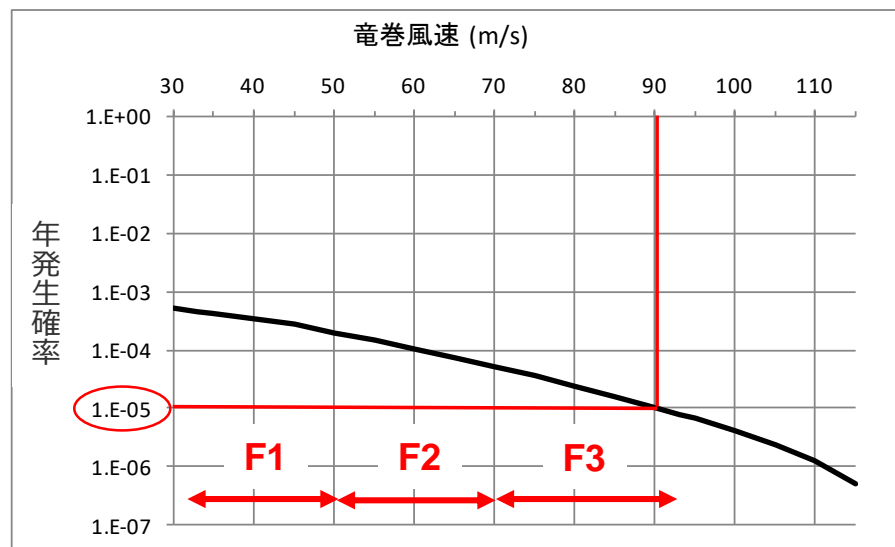
竜巻検討地域における竜巻データなどから、竜巻風速と年発生確率の関係を求める。

発生日	発生場所	フジタスケール
1999/9/24	愛知県豊橋市	F3
1969/12/7	愛知県豊橋市	F2~F3
1999/9/24	愛知県小坂井町	F2
2000/9/11	愛知県南知多市	F2
1962/8/26	静岡県浜松市	F2



発電所における竜巻風速と年発生確率※の関係

※発生確率に対応する竜巻風速以上の竜巻が発生する確率



発生確率が 10^{-5} /年となる竜巻風速は**90.4m/s**

過去最大の竜巻風速**92m/s**



確率分布による竜巻風速**90.4m/s**



基準竜巻の最大風速：92m/s

□ 基準竜巻を安全側に切り上げ、設計竜巻の最大風速を100m/sとする。

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

② 設計飛来物の設定(1/2)

目的

対策

運用

- 竜巻発生により飛来物となる可能性のある**約3000品目**を抽出。形状・材質等によるグルーピングを行い、鋼製材、砂利、コンクリートブロック、足場等、**約30品目**を代表飛来物として選定する。

【棒状】

鋼製材



【板状】

敷き鉄板



【塊状】

トラック



大型発電機



工事用コンテナ



鋼管



コンクリート板



フォークリフト



小型発電機



空調室外機



鋼製パイプ



足場材 (足場板)



コンクリートブロック



ガスボンベ



砂利



2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

② 設計飛来物の設定(2/2)

目的

対策

運用

- 約30品目に対し、竜巻で巻き上げられた際の速度や飛散距離等を評価し、**設計飛来物と飛来物管理エリア***を設定する。 (※防護対象施設まで飛来してくる物品が置いてあるエリア)
- 設計飛来物
 - ① 運動エネルギーおよび貫通力が大きい飛来物として「**鋼製材**」
 - ② 防護ネットをすり抜ける飛来物として「**砂利**」
- 管理エリア内で設計飛来物より影響の大きい物品に対しては、**固縛等の飛散防止対策**を実施する。

【鋼製材】



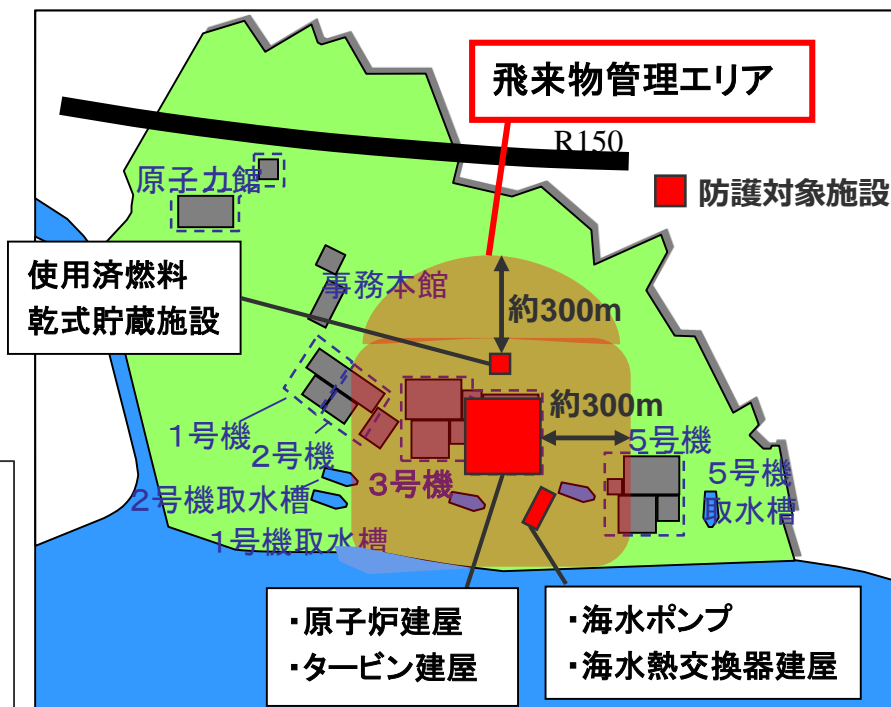
【砂利】



設備の固縛例

可搬型車両については以下の観点で固縛を実施。

- ① 飛散防止 (管理エリア)
- ② 竜巻荷重および地震荷重による機能喪失防止



・原子炉建屋
・タービン建屋

・海水ポンプ
・海水熱交換器建屋

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

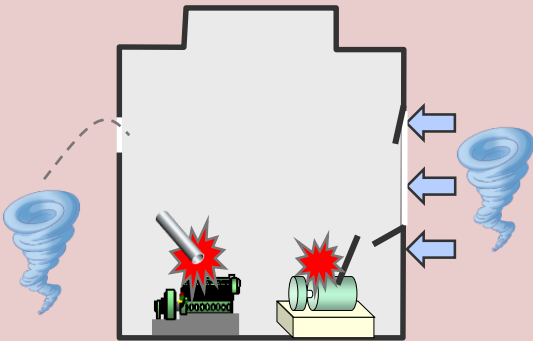
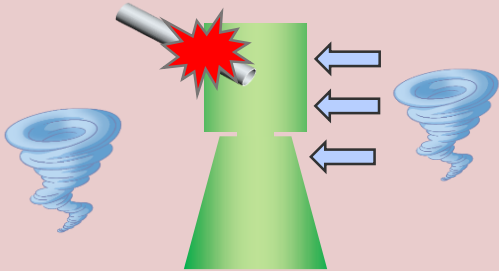
③ 防護対象の設定

目的

対策

運用

- 飛来物貫通および竜巻荷重により破損した場合に、防護対象施設に影響を及ぼす「建屋」、飛来物貫通および竜巻荷重の影響を受ける「屋外の防護対象施設」を防護対象と設定する。

分類	評価対象	考慮する竜巻の影響
防護対象施設の 外殻となる建屋	 <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋 ・海水熱交器建屋 ・使用済燃料乾式貯蔵施設 	竜巻荷重に伴う 建屋の倒壊 飛来物による 空調開口部の貫通・外壁コンクリート剥離 により防護対象施設の機能喪失
屋外設置の 防護対象施設	 <ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプ ・軽油タンク 	飛来物の 貫通 による防護対象施設の機能喪失 竜巻荷重に伴う 損傷 による防護対象施設の機能喪失

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

④ 施設影響評価 (1/3)

目的

対策

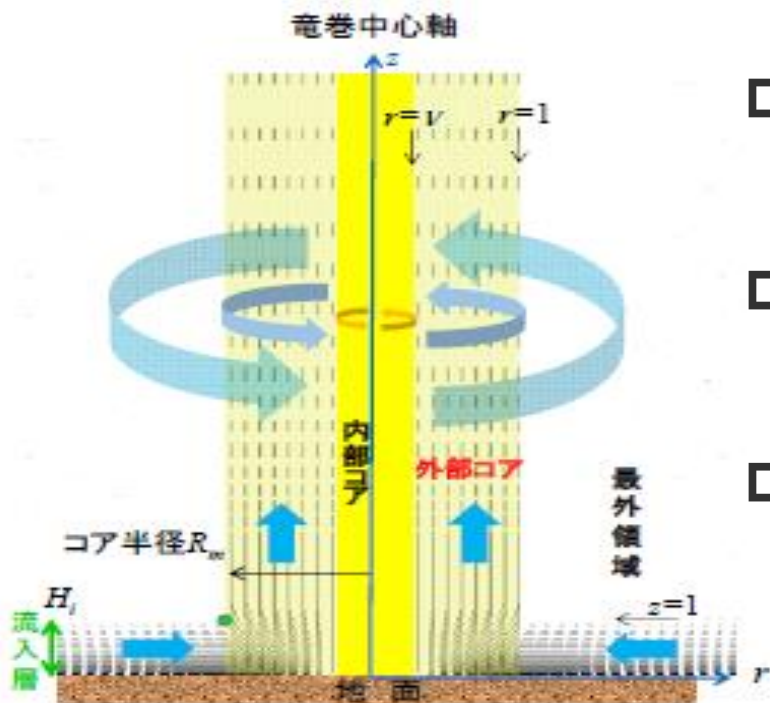
運用

■ 実現象に近い風速場構造を有するフジタモデルにより、施設影響評価を行う。

フジタモデルの特徴

- 観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり、**実現象に近い風速場構造**を有する。
- 地上の物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、**地上の物体の浮上・飛散解析**が可能。
- 半径方向に（内部コア、外部コア、最外領域）の3つの領域で構成され、外部コアに上昇風速を有する。

地上の物体に対する挙動の表現に適しており、**実効性の高い防護対策や固縛対策**を実施することが可能。



2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

④ 施設影響評価(2/3)

目的

対策

運用

- フジタモデルにより、気圧差荷重や飛来物の飛散速度を算出し、竜巻荷重影響評価を行う。

【竜巻荷重影響評価】

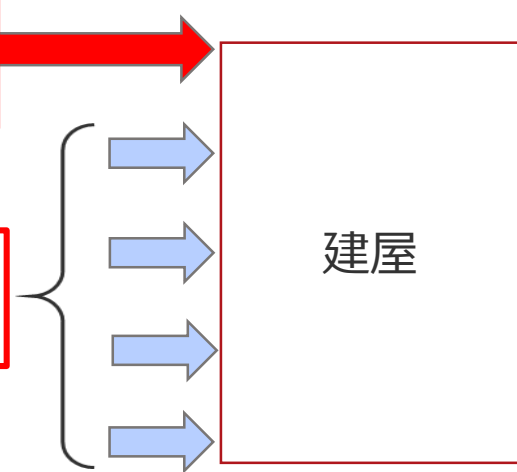
- 竜巻で生じる荷重（風荷重、気圧差荷重、飛来物衝撃荷重）の組み合わせを計算
- 評価対象の許容荷重と比較し、影響のある場合は対策を実施

評価例（原子炉建屋）

風荷重	気圧差荷重	飛来物衝撃荷重（鋼製材）
7,969N/m ²	7,600N/m ²	1,756kN（速度51m/s）

飛来物衝撃
荷重

風荷重
気圧差荷重



- 風荷重および気圧差荷重は建屋側面全体に作用し、飛来物は建屋頂部に衝突する想定で評価を実施。

建屋が倒壊しないことを確認

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

④ 施設影響評価 (3/3)

目的

対策

運用

- フジタモデルにより、飛来物の飛散速度を算出し、飛来物の貫通・コンクリート剥離影響評価を行う。

【飛来物の貫通・コンクリート剥離影響評価】

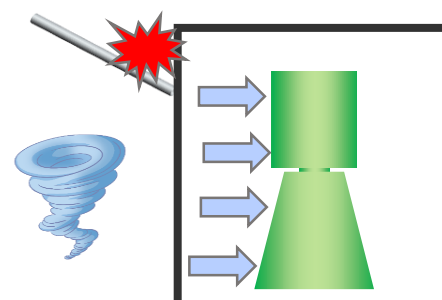
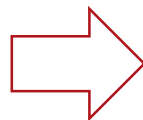
- 飛来物の質量、飛散速度などを基に、貫通・剥離防止に必要な部材の厚さを計算
- 評価対象の部材厚さと比較し、影響のある場合は対策を実施

評価対象	評価対象部位	竜巻影響	結果
建屋	外壁	飛来物によるコンクリート剥離	OK
	空調開口部	飛来物の貫通	防護対策要
海水ポンプ	電動機	飛来物の貫通	防護対策要
軽油タンク	外壁	飛来物の貫通	防護対策要

評価例 (海水ポンプ)



防護対策



防護対策後、風荷重・気圧差荷重による影響評価実施

貫通防止に必要な部材厚さ

結果

32mm

防護対策要

機能喪失しないことを確認

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

⑤ 防護対策 (1/4)

目的

対策

運用

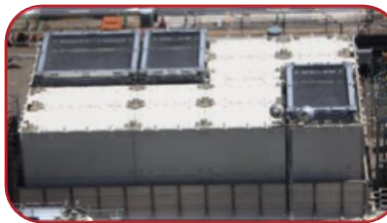


- 飛来物の貫通による影響を防ぐために、①鋼板の設置、②防護ネットの設置、③防護対象施設の移設を実施する。



① 鋼板設置

- 飛来物の貫通による影響を防ぐために、防護対象施設の周囲に鋼板を設置する。



② 防護ネットの設置

- 飛来物の貫通による影響を防ぐために、防護対象施設の周囲に防護ネットを設置する。



③ 防護対象施設の移設

- 鋼板および防護ネットの設置では対応できない場合には、防護対象施設の移設を行う。

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策





⑤ 防護対策 (2/4)

目的

対策

運用

- 飛来物の貫通による影響を防ぐために、開口部等へ鋼板、防護ネットの設置を実施する。

	Before 対策前	After 対策後
原子炉建屋壁面 (空調開口部)		 <p>鋼板設置</p>
海水ポンプ	 <p>海水ポンプ</p>	 <p>鋼板および 防護ネット設置</p>

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

⑤ 防護対策 (3/4)

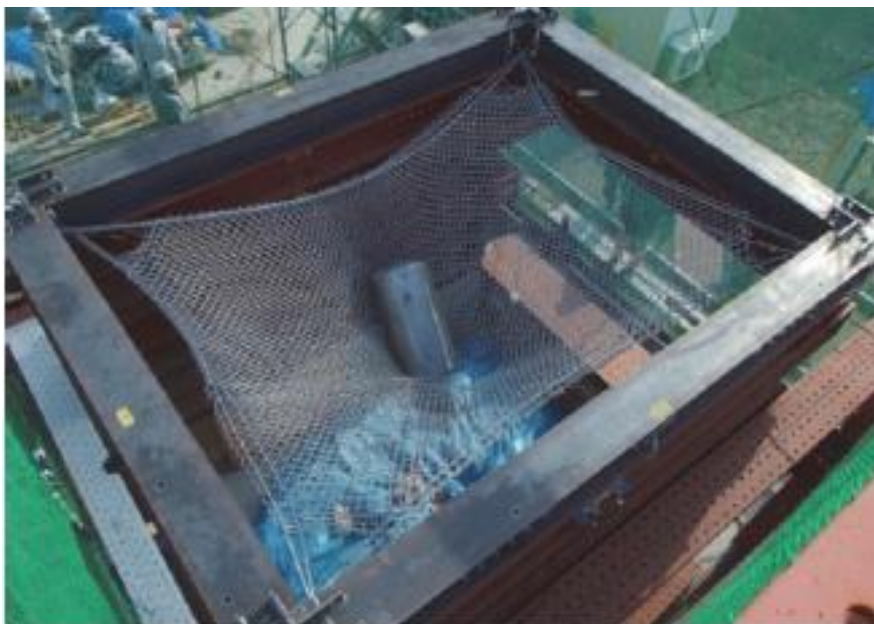
目的

対策

運用

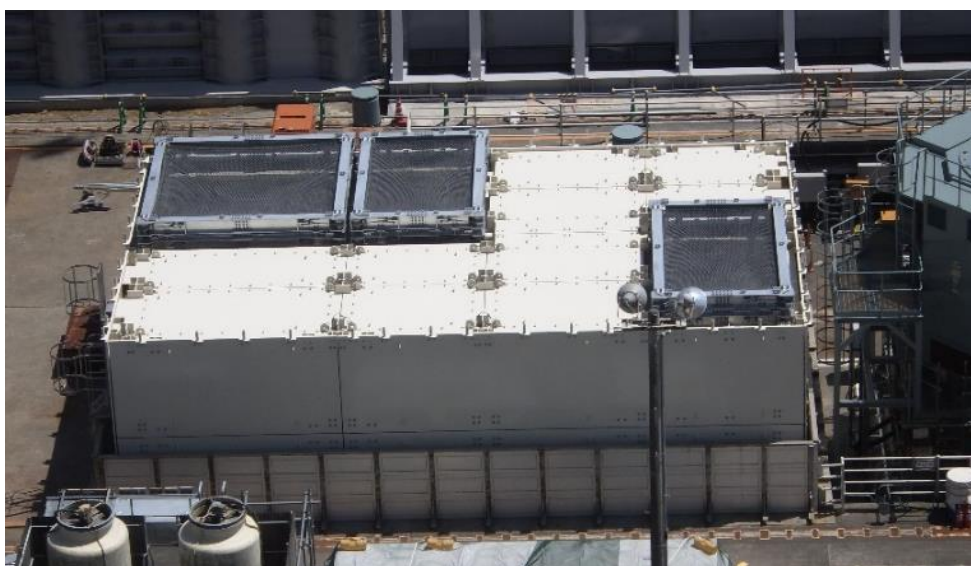
- 防護ネットは高強度の金網であり、飛来物から防護するためにネットの四隅を固定。設計飛来物を模擬した錘をネットに落下させ、貫通しないことを試験で確認した。
- 海水ポンプの防護について、軽量化の観点、および、ネットへの飛来物落下によりネットが沈んでポンプに衝突することを避けるため、鋼板とネットを併用する。

防護ネットの耐衝撃性能試験 (試験動画)



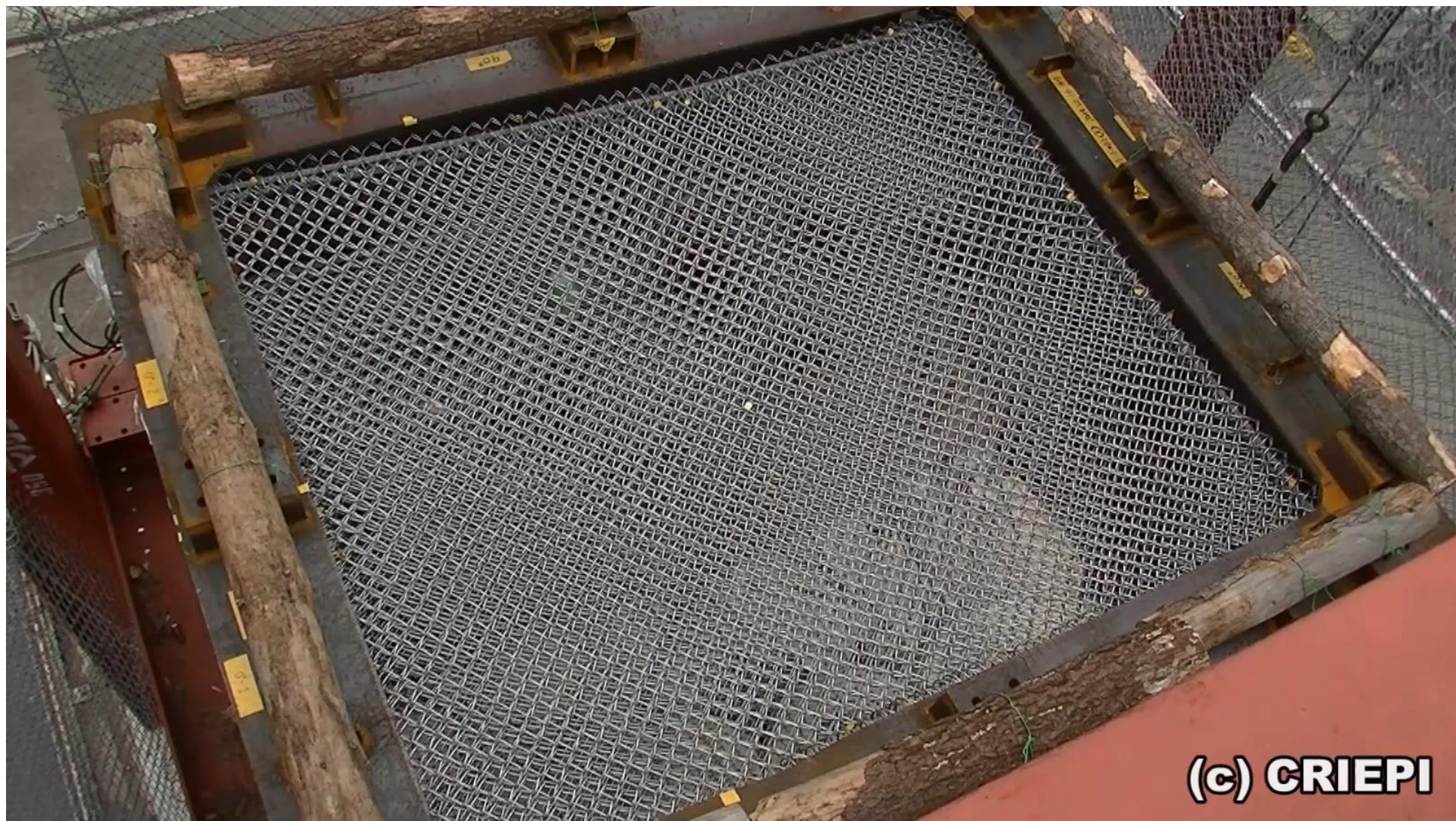
(錘落下後の状況)

海水ポンプの防護 (鋼板と防護ネットを併用)



出典 電力中央研究所報告001：高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策 防護ネットの耐衝撃性能試験動画



(c) CRIEPI

2 竜巻の影響評価プロセスおよび対策

⑤ 防護対策 (4/4)

目的

対策

運用

取扱注意

中部電力

- 鋼板および防護ネットの設置では対応できない場合には、防護対象施設の移設を行う。

地上の軽油タンクを地下に移設した例



3 竜巻襲来時の運用

- 竜巻の兆候の早期検知手法として気象庁から発表される情報（「雷注意報（竜巻又はひょう）」、「レーダーナウキャストによる予測（竜巻発生確度ナウキャスト、雷ナウキャスト）」を用いて竜巻襲来判断の基準を設定し、判断基準に応じて運用対策を実施する。

現状の運用

気象警報（大雨、暴風等）が発令された場合、屋外作業等の中止や足場材等の飛散防止措置、屋内への避難を実施。

今後の運用例

現状の運用に加えて、ナウキャスト情報も用いた竜巻襲来予測や、防護対象施設近傍の車両の退避等の対策も実施する予定。（ナウキャスト：竜巻等の発生を予測できる気象予報システム）

