

第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）

（その4：竜巻）に係る説明書

－ 指摘への回答（その1） －

2022年7月25日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

- 指摘No. 351 設計飛来物が外殻施設屋根スラブに衝突する場合の評価結果を示すこと。
 指摘No. 355 竜巻防護柵の要求仕様を技術資料に記載すること。

【回答：概要】

- 飛来物の衝突に係る評価について、飛来物に、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に記載された鋼製材（135kg・長さ4.2m×幅0.3m×奥行0.2m／最大水平速度：51m/s／最大鉛直速度：34m/s）を、基本的に想定することに変更する。
- 鋼製材（ガイド）の貫通限界厚さ（水平）等は、既説明計算値と比較して、概ね保守的である。原子炉附属建物の外壁厚さは [] であり、鋼製材（ガイド）による貫通及び裏面剥離は生じない。主冷却機建物の外壁厚さは [] であり、鋼製材（ガイド）による貫通及び裏面剥離が生じる。

飛来物の種類	竜巻ガイド	既説明計算値			
	鋼製材	足場材	鋼製材	ワゴン車	コンクリートブロック
コンクリート貫通限界厚さ (mm)					
コンクリート裏面剥離限界厚さ (mm)	核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。				
鋼板貫通限界厚さ (mm)					

*1：原子炉附属建物と国道51号との距離は162m以上。ワゴン車の飛散距離は161mであり、原子炉附属建物に衝突しない。

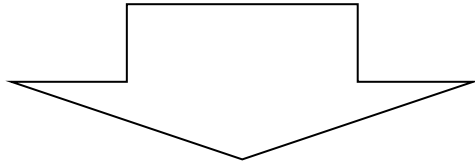
- 主冷却機建物の外壁には、鋼板 [] 以上に相当するアラミド繊維シートを塗布し、鋼製材（ガイド）の貫通を防止する。なお、表面は、不燃材仕上げとする。また、内壁には、剥離したコンクリートの飛散を防止するため、アラミド繊維シートを塗布する（表面：不燃材仕上げ）。竜巻防護柵は設置しない。
- 鋼製材（ガイド）の鉛直方向のコンクリート貫通限界厚さは、原子炉附属建物や主冷却機建物の屋根スラブ厚さを下回る。一方、裏面剥離限界厚さは、屋根スラブ厚さを上回る。天井内側には、剥離したコンクリートの飛散を防止するため、アラミド繊維シートを塗布する（表面：不燃材仕上げ）。

【詳細：次ページ以降参照】

飛来物の選定

【既説明】 下表の設計飛来物を選定し、TONBOSを用いて、各種パラメータを算出した。設計飛来物の施設への衝突については飛散高さ等により適切に考慮した。

飛来物の種類	板状物	棒状物	塊状物	
	足場材 (初期高さ0m ^{*1})	鋼製材 (初期高さ0m ^{*1})	ワゴン車 (初期高さ0m ^{*1})	コンクリートブロック (初期高さ12.5m ^{*2})
サイズ (m)	4.0×0.40×0.051	4.2×0.30×0.20	5.2×1.9×2.3	0.39×0.15×0.19
質量 (kg)	17.4	135	1,890	14.3
飛散距離 (m)	256	6.3	161	139
飛散高さ (m)	0.40	0.15	12	3.2
最大水平速度 (m/s)	43	12	52	47
運動エネルギー (kJ)	16	9.0	2,530	16
衝撃荷重 ^{*3} (kN)	627	90	2,670	210



*1:地表面からの飛来を想定

*2:主冷却機建物屋上からの飛来を想定

*3:衝撃荷重は以下の式により求めた。

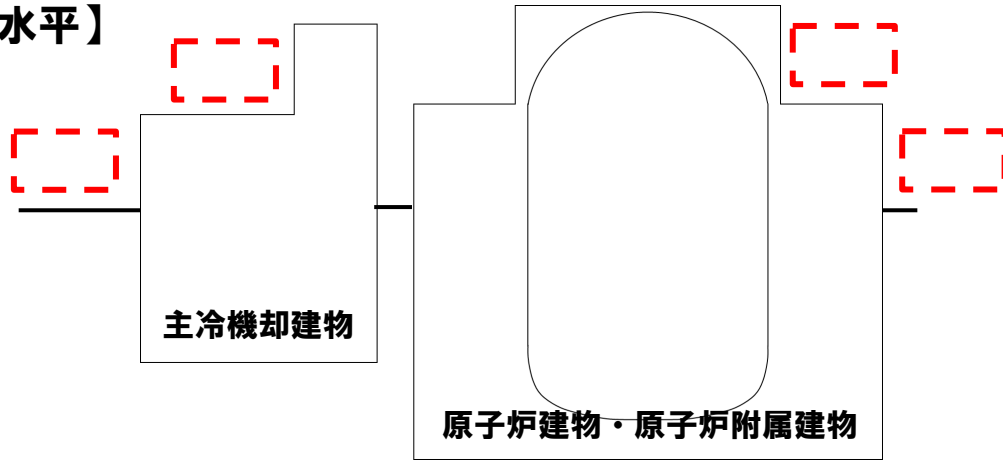
$F=mv^2/L_1$ F:飛来物の衝撃荷重 m:飛来物の質量 v:飛来物の最大水平速度 L_1 :飛来物の最短辺

設計飛来物は上表とするが、衝突に係る評価について、飛来物に、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に記載された鋼製材（右表参照）も想定する。米国原子力規制庁は飛散物（自動車）が9.14m(30feet)以下に影響を及ぼすものとして^[1]ことを踏まえ、本飛来物は高さ10mまで影響を及ぼすものとして評価することを基本とするが、プラント安全性を高めるべく、貫通・裏面剥離評価においては投影面積が小さい箇所を除いて、高さ10m以上への衝突も考慮する。

飛来物の種類	棒状物
	鋼製材
サイズ (m)	4.2×0.30×0.20
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	51
最大鉛直速度 (m/s)	34

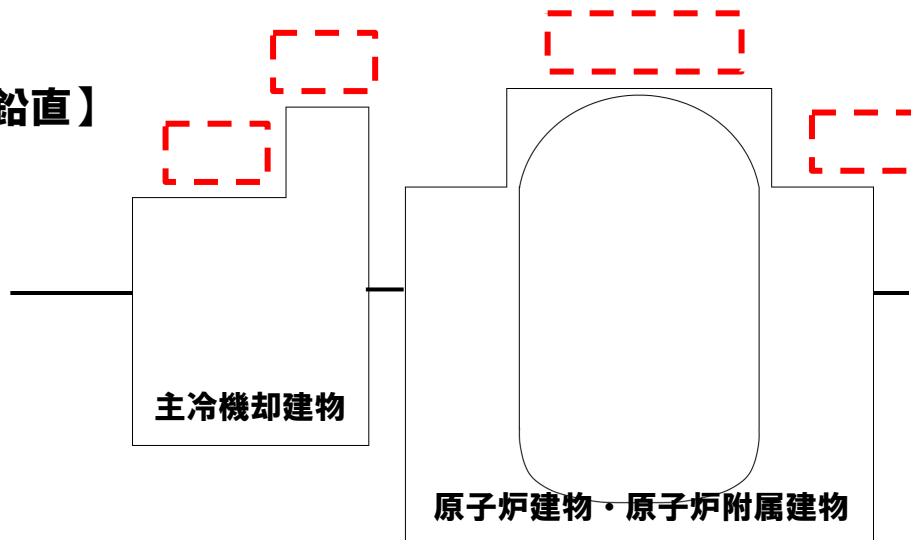
建物に係る貫通・コンクリート裏面剥離に係る評価

【水平】



	貫通	裏面剥離
原子炉附属建物	○	○
主冷却機建物	×	×

【鉛直】



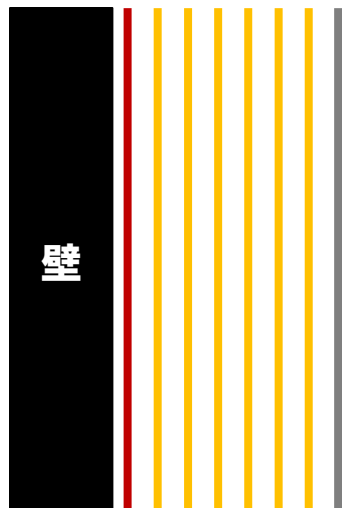
	貫通	裏面剥離
原子炉附属建物	○	×
主冷却機建物	○	×

貫通及び裏面剥離によるコンクリートの飛散を防止するための措置

【貫通】



外

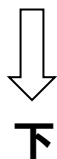


- 下処理樹脂
- ※ 表面平滑化
- アラミド繊維シート
- ※ 樹脂で接着
- 不燃材仕上げ
- ※ 表面不燃化

【裏面剥離】



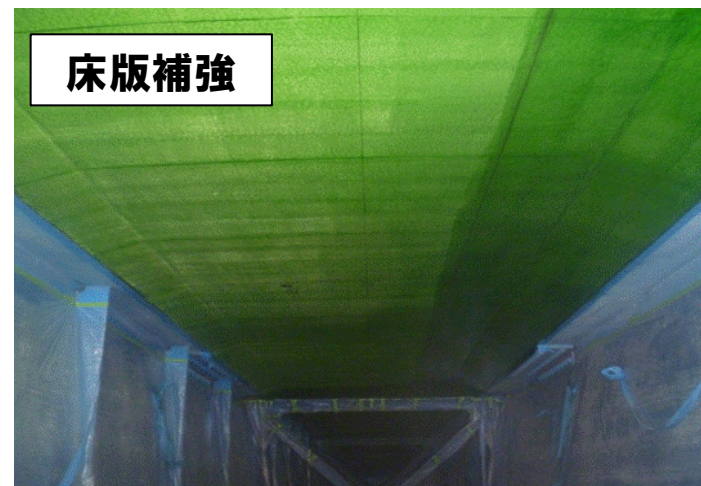
内



下



アラミド繊維シートの施工例



問い合わせ先におけるアラミドシート接着工事現場への納入実績は、700件以上あり一般的な工法である。

アラミド繊維シートの特徴等 (1/4)

- 軽量高強度素材であるアラミド繊維*1は、下図に示す通り、**SUS316線材の約5倍の引張強度**を有する**高強度部材**である。

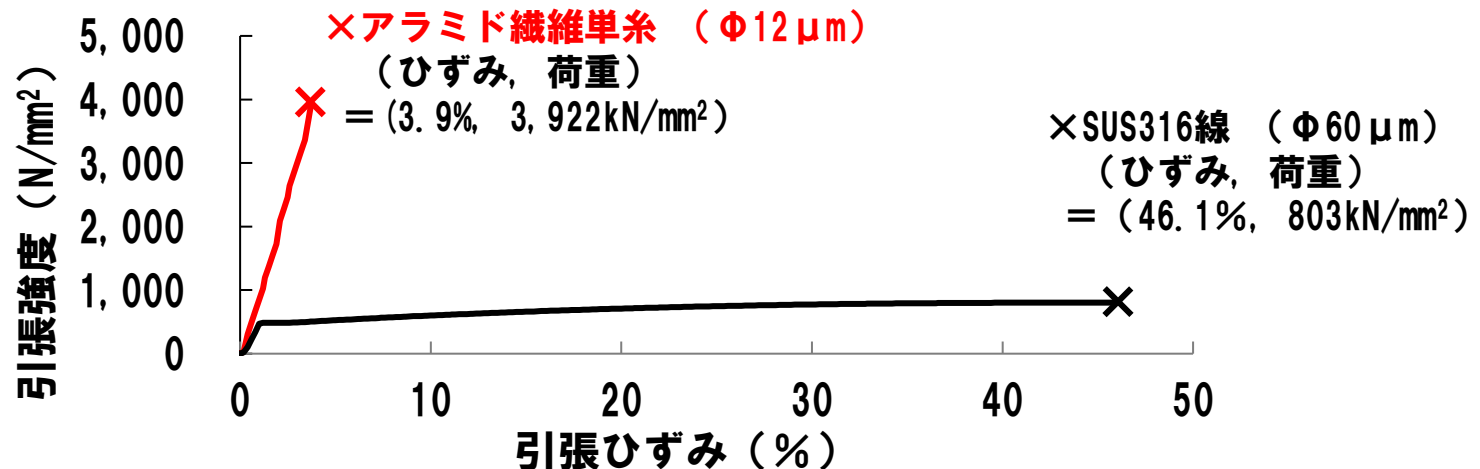
(参考情報)

耐衝撃部材としての使用実績

- 防弾チョッキ
- 装甲車
- 竜巻用シェルタ等

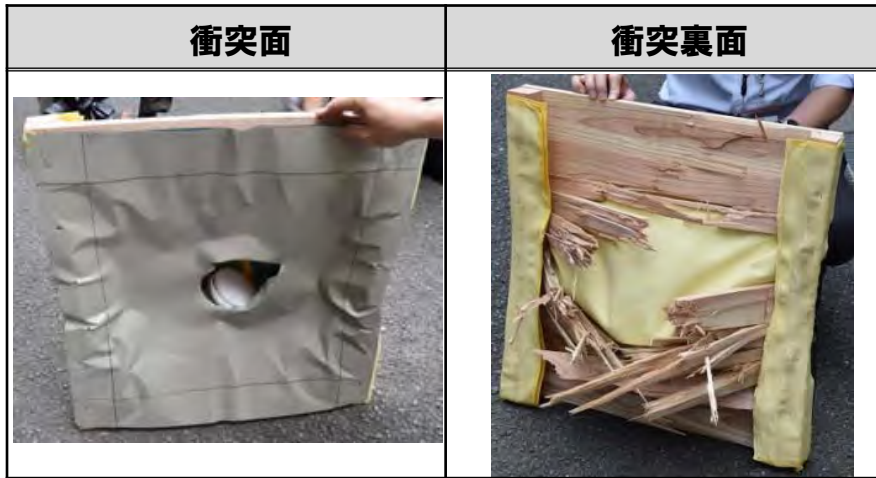
高強度、高弾性、
耐切創性等の
特性が求められる
用途で多くの実績有。

引張強度（試験値）の比較



アラミド繊維シートの特性等 (2/4)

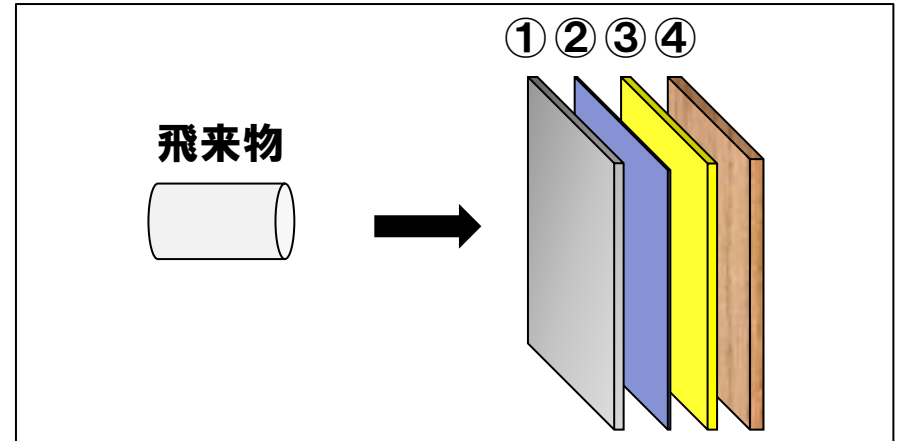
内閣府による活火山における退避壕の検討*¹における衝突試験で、アラミド繊維シートを構成要素とした退避壕補強屋根に貫通は生じなかった。



参考) 右記①～④と同構成の
衝突側供試体での試験写真

飛来物の諸元

- ・ 衝突速度 : 99.9m/s
- ・ 質量 : 2.66kg
- ・ 直径 : φ90mm
- ・ 鋼板貫通限界厚さ (BRL式*²) : 4.9mm



退避壕補強屋根 (模擬)

- ① 0.4mm ガルバリウム鋼板
 - ② 1.0mm 防水シート (非強度メンバ)
 - ③ 1.4mm アラミド繊維シート
 - ④ 18.0mm 杉板 (鋼板1.8mmと同等と算定*³)
- ⇒ 鋼板厚さ 2.7mm分 (4.9mm-0.4mm-1.8mm) を 1.4mm のアラミド繊維シートが受け止めた。

鋼板 : 2.7mm と アラミド繊維シート : 1.4mm を等価とし、鋼板をアラミド繊維シートに置き換えて、詳細設計を実施する。

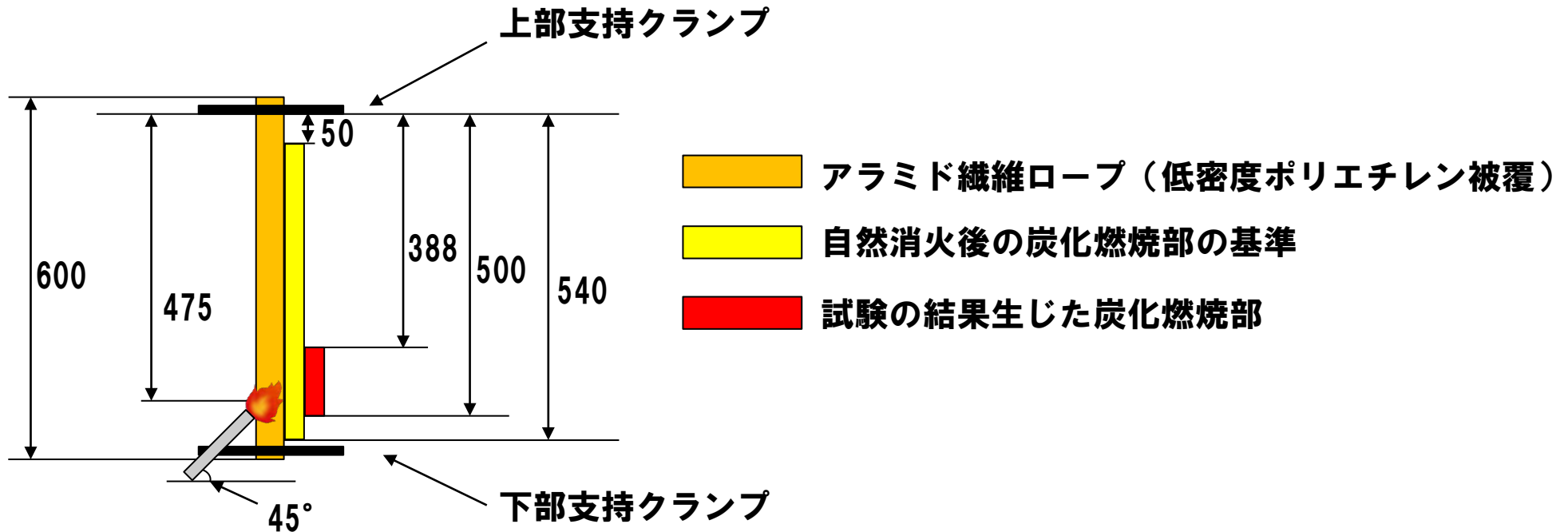
*1 : 内閣府 (防災担当) : 平成27年12月 活火山における退避壕等の充実に向けた手引き (参考資料)

*2 : 日本機械学会、竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン、JSME S NX6-2019

*3 : BRL式評価1.9mmとなる飛来物条件での試験より、合板1mmは鋼板0.1mm相当と判断した。杉板は合板と同等の強度と見なし、杉板18mmは鋼板1.8mm同等と算定した。

アラミド繊維（低密度ポリエチレン被覆）は国際電気標準会議規格（IEC）で定める一条垂直試験及び酸素限界指数（LOI値）により、難燃性を有することを確認した。

一条垂直試験結果



酸素限界指数による難燃性確認結果

ケブラー繊維（アラミド繊維の一種）の酸素限界指数（LOI値）は29であり*、一般的に「難燃性」と言われる基準である26を超える。

*：東レ・デュポンHPの技術情報書類：https://www.td-net.co.jp/kevlar/data/download/pdf/Burning_properties.pdf

ケブラーシート（FS3300）8層積層部材（仕上材未塗装）の簡易燃焼試験として、ガスバーナーによる垂直燃焼試験（燃焼10分間）を実施した。



燃焼前



燃焼中



10分燃焼後



燃焼後（すす除去）

- ・ 燃焼中も自己消化性があり燃え広がらなかった。
- ・ ガスバーナーの火を直接受けた部分の表層は炭化し穴が開いた。
- ・ 樹脂が剥離してシート浮きが確認されたのは表層の25×15cm程度と小さい。

主冷却機のうち屋外部分の貫通に係る評価

評価対象部位

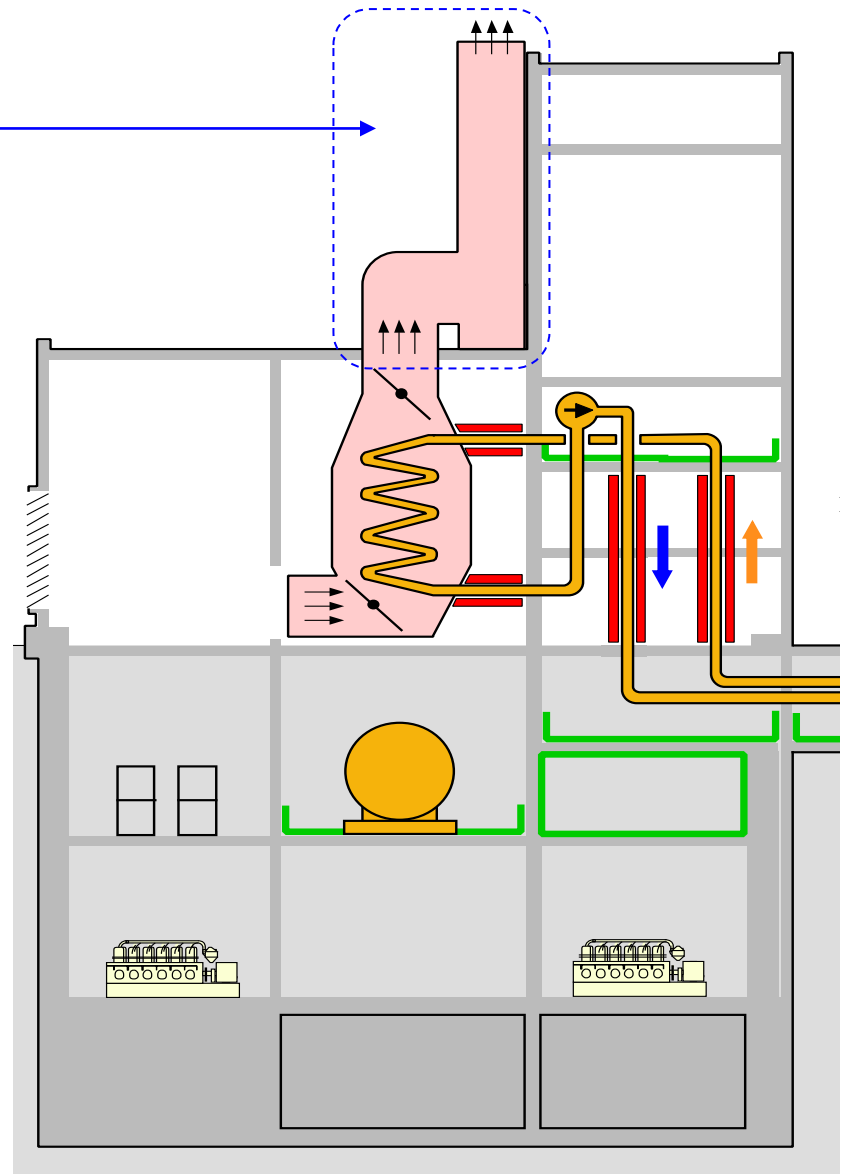
鋼板厚さ：

※ 基準：鋼板厚さ（水平）

鋼板厚さ（鉛直）

→ 貫通：無

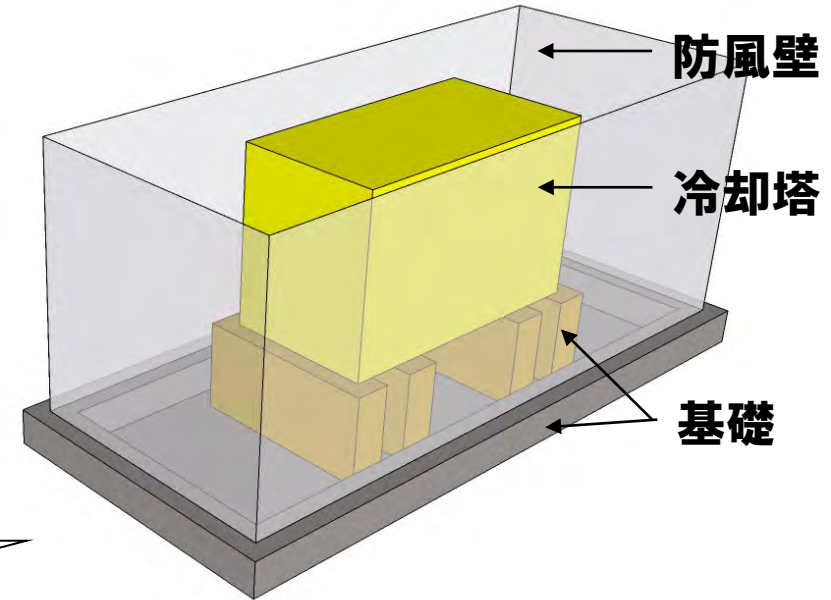
※ 飛来物が、真上から、開口部（3,000mm×3,000mm）を通過し、まっすぐに落下した場合であっても、主冷却機建物の天井により貫通は防止できる。裏面剥離については、アラミド繊維シート塗布により、コンクリートの飛散を防止する。



非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔の評価

非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔の周囲には防風壁を設置する。

※ 屋外に設置する冷却塔は、一般的に建築基準法に基づく基準風速において、その機能を確保できるように設計される。竜巻（100m/s）時に、その機能を担保することは困難であり、防風壁により、冷却塔が通常的环境条件で運転される状況を整える。



冷却塔は投影面積が小さく、飛来物が衝突するリスクは建物よりも十分に小さい。建物と同じように、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に記載された鋼製材を飛来物とすることは、過剰な設備対応を必要とする。ここでは、既説明で想定したコンクリートブロック（屋上に置き忘れたことを仮想）を飛来物とする。


【水平】

- ・ 防風壁について、コンクリートブロックの飛散高さである3.2mを超える高さを確保
- ・ 防風壁の厚さについて、コンクリートブロックの鋼板貫通限界厚さ（水平）である \square 相当以上を確保
 - ※ 鋼板をアラミド繊維シートに置き換えたプレートを使用することを検討中

【鉛直】

- ・ コンクリートブロックの鋼板貫通限界厚さ（鉛直）は、 \square （最大鉛直速度：16m/s）
- ・ 冷却塔の上板（鋼板）は、 \square 以上の厚さを確保
 - ※ 必要な場合には、鋼板をアラミド繊維シートで補強することを検討

原子炉建物（格納容器を含む。）及び原子炉附属建物の開口部の評価

開口面積は小さく、飛来物が衝突するリスクは建物よりも十分に小さい。建物外壁と同じように、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に記載された鋼製材を飛来物とすることは、過剰な設備対応を必要とする。ここでは、既説明で想定したコンクリートブロック（屋上に置き忘れたことを仮想）を飛来物とする（コンクリートブロックの鋼板貫通限界厚さ（水平）：）。

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。

主冷却機建物の開口部の評価

飛来物が貫通した場合に経路上に安全施設に関する設備が配置されている箇所

核物質防護情報（管理情報）が含まれているため公開できません。

開口部は地上高さに位置するため、飛来物には、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に記載された鋼製材（135kg・長さ4.2m×幅0.3m×奥行0.2m／最大水平速度：51m/s／最大鉛直速度：34m/s）を想定する。

ただし、竜巻発生時にあっては、原子炉を手動スクラムにより停止するものとしており、主送風機はすでに停止している。また、2A及び2Bの入口ベンドドライブユニットが損壊した場合にあっては、1A及び1Bの主冷却機により、原子炉の崩壊熱を除去し、最終ヒートシンクに熱を輸送することができる。

なお、開口部の鋼板厚さは「 」である。また、シャッターから安全施設に関連する設備の間に位置する扉（「 」／通常運転時：閉止）となり、合計「 」の鋼板厚さを確保できる。ガイド鋼製材の貫通（鋼板貫通限界厚さ：「 」）を防止するために、「 」相当以上の鋼板等を扉に追設する。

※ 鋼板をアラミド繊維シートに置き換えて扉を補強することを検討

指摘No. 352 非常用DG冷却塔について34m/sの風速に対して維持する機能を具体的に説明すること。

指摘No. 353 非常用DG冷却塔の防風壁の要求仕様を技術資料に記載すること。

13

【回答】

- 非常用ディーゼル電源系に関連する冷却塔について、34m/sの風速に対して維持する機能は、「ディーゼル発電機の冷却水」の冷却機能である。
- 防風壁の要求仕様は、竜巻による最大風速100m/sの風が冷却塔本体位置にて34m/sの風速に低減されることである。屋外に設置する冷却塔は、一般的に建築基準法に基づく基準風速において、その機能を確保できるように設計される。屋外に設置する冷却塔は、一般的に建築基準法に基づく基準風速において、その機能を確保できるように設計される。竜巻（100m/s）時に、その機能を担保することは困難であり、防風壁により、冷却塔が通常的环境条件で運転される状況を整える。また、構造健全性の観点では、風圧力+設計飛来物（コンクリートブロック）の衝突により倒壊しないものとする。

【回答】

設計飛来物のうちワゴン車については国道からの飛来を想定している。当該ワゴン車について、以下の2ケースで解析を実施し、設計飛来物の最大水平速度等が保守的に設定されていることを確認した。

ケース1：ワゴン車が停止していることを想定し、竜巻がその場発生するケース（設計飛来物として選定した条件）

ケース2：ワゴン車が走行していることを想定し、（60km/h=16.67m/s）分の風速を増大させた竜巻が停止しているワゴン車に接近してくるケース

	ケース1 (設計飛来物条件)	ケース2
飛散距離 [m]	161	113
飛散高さ [m]	12	4.6
最大水平速度 [m/s]	52	48

【回答（前頁続き）】

設計飛来物のうちワゴン車については国道からの飛来を想定している。国道を走行する車両は特定ができないため、車体形状と重量が異なる複数の車両の飛散解析を実施した。

	軽自動車	乗用車	ワゴン	ミニバン	観光バス
サイズ [m]	3.4×1.5 ×1.8	5.0×2.0 ×1.3	5.2×1.9 ×2.3	4.9×1.8 ×1.9	12×2.5 ×3.5
質量 [kg]	950	1,810	1,890	2,110	13,080
最大水平速度 [m/s]	52	39	52	46	32
飛散距離 [m]	157	53	161	95	57
飛散高さ [m]	7.7	2.8	12	4.7	3.0
衝突荷重 [kN]	1,680	2,023	2,663	2,346	5,399

飛散解析結果より、国道から「常陽」重要建物まで到達する車両は軽自動車及びワゴン車であり、衝突時の影響が大きいワゴン車を設計飛来物として選定した。