

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	濃縮個別 35-1 R1
提出年月日	令和3年10月26日

竜巻防護扉又は竜巻防護板による
設計飛来物の進入防止に係る補足説明資料

本資料は、【濃縮個別 35-1 R0】の改訂版（R1）である。
改訂内容は以下のとおり。

○添付1において、事業変更許可申請書における竜巻影響の評価方法及びその考え方を追加した。

※【濃縮個別 35-1 R0】から変更した部分を青字、青枠にて示す。

目 次

1. 概要	1
2. 設計の考え方	1
添付1 「別添1 竜巻防護扉又は竜巻防護板による設計飛来物の進入防止について」に関する補足説明	

1. 概要

本資料は、第 5 回申請の【加工施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書】（以下「説明書」という。）において説明した事項のうち、「別添 1 竜巻防護扉又は竜巻防護板による設計飛来物の進入防止について」に関して、申請内容の妥当性、記載内容の根拠等について説明するものである。

2. 設計の考え方

2 号均質槽の設計飛来物に対する防護設計の概要を以下に示すとともに「別添 1 竜巻防護扉又は竜巻防護板による設計飛来物の進入防止について」に関する補足説明を添付 1 に示す。

- 2 号均質槽は 2 号発回均質棟に収納し、建屋により防護することを基本とする（竜巻事象に対する建屋の強度評価については、第 3 回申請までで申請し認可済みである。）。
- 設計飛来物の進入により 2 号均質槽の安全機能に影響を及ぼし得る開口部には、防護板等（竜巻防護扉、竜巻防護板）により設計飛来物の進入を防止する設計とする。
- 防護板等（竜巻防護扉、竜巻防護板）の設置に当たっては、保守・点検及び資機材等の搬出入を考慮した設計とする。
- 防護設計を実施する開口部を設計飛来物導線と 2 号均質槽の配置関係から選定する。
- 開口部から離れた位置に設置する竜巻防護板は、設計飛来物の進入を防止できる高さ及び幅を有する設計とする。
- 竜巻防護扉及び竜巻防護板の健全性評価については、竜巻影響評価ガイドに準拠するとともに、事業変更許可申請書で設定した設計竜巻、設計荷重にて評価する。
- 竜巻防護扉及び竜巻防護板の評価対象部位の選定に当たっては、構造及び荷重伝播経路を考慮して選定する。
- 風力係数の設定については、設置場所及び形状を考慮し、「建設省告示 第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」に基づき設定する。
- 設計飛来物の貫通評価については、先行発電炉及び再処理施設を参考にし、BRL 式により評価する。

添付 1

「別添 1 竜巻防護扉又は竜巻防護板による設計飛来物の進入防止について」に関する補足説明

設工認申請書	補足説明	備考
<p>1. 概要</p> <p>本資料は、2号均質槽が設計上想定する竜巻の最大風速（100 m/s）による設計飛来物により閉じ込め機能を損なうおそれがないことを説明するものである。</p> <p>2号均質槽は2号発回均質棟に収納し、建屋により防護する。建屋自体の竜巻事象に対する強度評価については、本申請の第3回申請にて説明済であるが、2号発回均質棟の開口部（扉、シャッター）については、設計飛来物に対して防護が期待できない可能性がある。^(注1)</p> <p>このため、設計飛来物の進入により2号均質槽の閉じ込め機能に影響を及ぼし得る開口部に竜巻防護扉又は竜巻防護板を設置する。</p> <p>上記により、竜巻防護扉又は竜巻防護板が設計飛来物の貫通を防止又は設計飛来物の運動エネルギーを吸収できることを評価し、2号均質槽の閉じ込め機能が損なわれるおそれがないことを確認する。</p> <p>2. 竜巻防護扉、竜巻防護板の設置</p> <p>2.1 設置概要</p> <p>2号発回均質棟の開口部（扉、シャッター）のうち、2号均質槽の安全機能に影響を及ぼし得る開口部は、屋外から2号発回均質室西側に通じる扉、屋外と通じている予備室から2号発回均質室北側に通じる扉、屋外と通じている搬入室から2号発回均質室南側に通じる扉の3つであり、当該部に竜巻防護扉又は竜巻防護板を設置する。^(注2)</p> <p>2.2 構造概要</p> <p>2.2.1 竜巻防護扉</p> <p>竜巻防護扉は、表側鋼板及び扉枠等の鋼製材料を主構造とし、アンカーボルトによって建屋躯体に固定された扉枠に、ヒンジ及びカンヌキによって扉本体を固定することで支持する設計とする。また、竜巻防護扉表側鋼板に作用する荷重が扉枠を介して周辺躯体へ伝達する構造とする。竜巻防護扉の配置及び構造は「加工施設に関する図面」による。^(注3)</p> <p>2.2.2 竜巻防護板</p> <p>竜巻防護板は、設計飛来物の進入を防止するために十分な範囲を覆う鋼板と支持架構からなり、鋼板に作用する荷重が支持架構を介して周辺躯体へ伝達する構造とする。竜巻防護板の配置及び構造は「加工施設に関する図面」による。^(注4)</p> <p>3. 強度評価方針</p> <p>竜巻防護扉、竜巻防護板の強度評価は「4.3.4 荷重の組合せ」に示す荷重及びその組合せに対し、考慮する荷重ごとに設定した許容限界を満足することにより確認する。</p> <p>設計荷重に対する強度評価のフローを図1に示す。^(注5)</p>	<p>(注1) 第3回申請の竜巻事象に対する強度評価では、設計飛来物の衝突により建屋屋根・壁に貫通・裏面剥離が発生しないことを申請し認可済みである（竜巻防護板を設置する予備室及び搬入室の屋根・壁を含む）。なお、本評価で用いている設計飛来物は、第3回申請の評価で用いている設計飛来物と同じである。</p> <p>(注2) 2号均質槽の安全機能に影響を及ぼし得る開口部を設計飛来物導線（開口部からの設計飛来物進入経路）と2号均質槽の配置関係から選定する。具体的には、設計飛来物導線上に遮蔽物（建屋屋根・壁）がなく、2号均質槽の設置エリアに設計飛来物が進入し得る開口部を防護設計の対象として選定する。2号均質槽と開口部、設計飛来物導線を補足図-1に示す。</p> <p>2号発回均質棟の南側には2号カスケード棟、東側には渡り廊下（中央操作棟と同じ2階建ての建築構造物）、中央操作棟等の建屋があることから、これらの建屋に面している開口部を設計飛来物の進入経路から除外する。</p> <p>(注3) 竜巻防護扉は、2号発回均質室西側に通じる既設の建屋扉（補足図-1のNo.1）を竜巻防護扉に交換し、設計飛来物の進入を防止するものである。構造を補足図-2に示す（申請書の再掲）。</p> <p>(注4) 竜巻防護板は、屋外と通じている予備室から2号発回均質室北側に通じる扉（補足図-1のNo.15）及び屋外と通じている搬入室から2号発回均質室南側に通じる扉（補足図-1のNo.20）からの設計飛来物の進入を防止するものである。構造を補足図-3に示す（申請書の再掲）。</p> <p>竜巻防護板の設置にあたっては、当該開口部が物品搬入経路であることを考慮し、開口部から離れた位置（予備室・搬入室側）に竜巻防護板を設置するとともに、設計飛来物の進入を防止できる高さ及び幅を有する設計とする。設計飛来物導線と竜巻防護板の配置を補足図-4に示す。</p> <p>(注5) 強度評価フローについては、第3回申請の建屋評価と同じであり、基準竜巻の設定、設計竜巻の設定、設計荷重の設定は、事業変更許可申請書に示す以下の値及び荷重を用いる。</p>	<p>・第3回申請における2号発回均質棟の貫通限界厚さ：26.1 cm</p> <p>・第3回申請における2号発回均質棟の裏面剥離限界厚さ：45.4 cm</p> <p>・2号発回均質棟の屋根・外壁・内壁の厚さ：45.4 cm以上（2号Qマス室除く）</p> <p>・建屋への衝突及び建屋内の構造物との衝突等により飛来物の運動エネルギーが吸収される。</p>

設工認申請書	補足説明	備考												
<pre> graph TD A[評価対象部位の選定] --> B[荷重及び荷重の組合せの設定] B --> C[許容限界の設定] C --> D["(設計竜巻荷重) 竜巻による組合せ荷重"] C --> E["(衝突検出用竜巻荷重) 貫通評価"] D --> F[許容限界との比較] E --> G[許容限界との比較] </pre>	<p>③ 設計荷重の設定</p> <p>a. 設計上考慮する竜巻の設定</p> <p>基準竜巻及び設計竜巻は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（平成25年6月19日 原規技発第13061911号 原子力規制委員会決定）（以下「竜巻影響評価ガイド」という。）に準拠し、本施設が立地する地域の気候、竜巻発生の特徴、IAEAの基準（本施設を中心とした10万km²の範囲を目安とする）、分水嶺、気候区分及び本施設の立地地点を踏まえて設定した竜巻検討地域（青森県から岩手県の太平洋側及び北海道地方の南側の海岸線に沿った海側5km及び陸側10kmの範囲）を対象として、過去に発生した竜巻による最大風速（V_{B1}）及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速（V_{B2}）を踏まえて設定する。</p> <p>過去に発生した竜巻による最大風速（V_{B1}）については、竜巻影響評価ガイドに準拠し、総観スケールの気象条件に基づく検討に加えて突風関連指数を用いた検討を行った結果を踏まえ、竜巻検討地域において発生した過去最大の竜巻の最大風速とし、69m/sとする。</p> <p>竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速（V_{B2}）については、竜巻影響評価ガイドに準拠して算定し、年超過確率10⁻⁵に相当する風速として46m/sとする。</p> <p>上記のV_{B1}及びV_{B2}のうち、より値の大きい方を基準竜巻の最大風速（V_B）とし、さらに地形効果による増幅については、本施設の敷地の周辺が平坦であり、地形効果による増幅を考慮する必要がないことから、設計竜巻の最大風速を69m/sとする。</p> <p>ただし、竜巻に対する設計に当たっては、基準竜巻の設定に用いたデータが過去の記録に基づくものであること、突風関連指数による解析は相対的な傾向を把握するものであること及び日本において過去に発生した最大級の竜巻がF3であることから、今後の気象条件の変動等の不確定要素を考慮し、設計及び運用に保守性を持たせるために、設計上考慮する竜巻の最大風速は100m/sとする。設計荷重は、設計上考慮する竜巻の特性値に基づいて設定する。設計上考慮する竜巻の特性値を表5-8に示す。</p> <p>また、設計竜巻及び設計上考慮する竜巻については、今後も継続的に観測データ及び増幅に関する新たな知見等の収集に取組み、必要な事項については適切に反映を行う。</p> <p>表5-8 竜巻防護施設の設計で考慮する竜巻の特性値</p> <table border="1" data-bbox="1329 1528 2267 1755"> <thead> <tr> <th>最大風速 V_D (m/s)</th> <th>移動速度 V_T (m/s)</th> <th>最大接線風速 V_{Rm} (m/s)</th> <th>最大接線風速半径 R_m (m)</th> <th>最大気圧低下量 ΔP_{max} (hPa)</th> <th>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>15</td> <td>85</td> <td>30</td> <td>89</td> <td>45</td> </tr> </tbody> </table>	最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線風速半径 R_m (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)	100	15	85	30	89	45	
最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線風速半径 R_m (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)									
100	15	85	30	89	45									

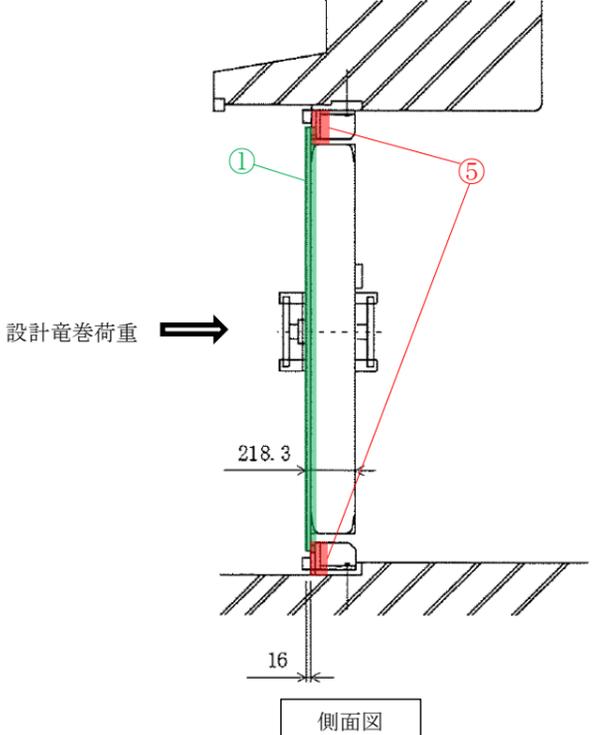
図1 設計荷重に対する強度評価のフロー図

設工認申請書	補足説明	備考																																																															
<p>4. 強度評価方法</p> <p>4.1 記号の定義</p> <p>強度評価に用いる記号を表1に示す。</p> <p style="text-align: center;">表1 強度評価に用いる記号</p> <table border="1" data-bbox="270 436 1228 995"> <thead> <tr> <th>記号</th> <th>定義</th> <th>単位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_D</td> <td>: 最大風速</td> <td>(m/s)</td> </tr> <tr> <td>V_T</td> <td>: 移動速度</td> <td>(m/s)</td> </tr> <tr> <td>V_{Rm}</td> <td>: 最大接線風速</td> <td>(m/s)</td> </tr> <tr> <td>ΔP_{max}</td> <td>: 最大気圧低下量</td> <td>(hPa)</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>: 設計用速度圧</td> <td>(N/m^2)</td> </tr> <tr> <td>ρ</td> <td>: 空気密度 (= 1.22)</td> <td>(kg/m^3)</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>: ガスト影響係数 (= 1.0)</td> <td>(-)</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>: 風力係数</td> <td>(-)</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>: 受圧面積 (風向きに垂直な向きに投影した面積)</td> <td>(m^2)</td> </tr> <tr> <td>W_W</td> <td>: 風圧力による荷重</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>W_P</td> <td>: 気圧差による荷重</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>W_M</td> <td>: 設計飛来物による衝撃荷重</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>L_n</td> <td>: 設計飛来物サイズ (設計飛来物の各辺の長さのうち、最短辺の長さ)</td> <td>(m)</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>: 設計飛来物の質量</td> <td>(kg)</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>: 設計飛来物の最大水平速度</td> <td>(m/s)</td> </tr> </tbody> </table>	記号	定義	単位	V_D	: 最大風速	(m/s)	V_T	: 移動速度	(m/s)	V_{Rm}	: 最大接線風速	(m/s)	ΔP_{max}	: 最大気圧低下量	(hPa)	q	: 設計用速度圧	(N/m^2)	ρ	: 空気密度 (= 1.22)	(kg/m^3)	G	: ガスト影響係数 (= 1.0)	(-)	C	: 風力係数	(-)	A	: 受圧面積 (風向きに垂直な向きに投影した面積)	(m^2)	W_W	: 風圧力による荷重	(N)	W_P	: 気圧差による荷重	(N)	W_M	: 設計飛来物による衝撃荷重	(N)	L_n	: 設計飛来物サイズ (設計飛来物の各辺の長さのうち、最短辺の長さ)	(m)	M	: 設計飛来物の質量	(kg)	V	: 設計飛来物の最大水平速度	(m/s)	<p>b. 設計飛来物の設定</p> <p>竜巻影響評価ガイドを参考にプラントウォークダウンによる敷地全体を俯瞰した調査及び検討を行い、敷地内の資機材等の設置状況を踏まえ、竜巻防護施設に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。抽出した飛来物に竜巻影響評価ガイドに例示される飛来物を加え、それぞれの寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮して、竜巻防護対策によって防護が出来ない可能性があるものは、固縛、建屋内収納又は撤去により飛来物とならないようにする。</p> <p>なお、敷地内の車両については、入構を管理するとともに、固縛又は退避を必要とする区域 (以下「飛来対策区域」という。) を設定し、竜巻の襲来が予想される場合には、停車又は走行している状況に応じて固縛又は飛来対策区域外へ退避することにより、飛来物とならないよう管理を行うことから、設計飛来物として考慮しない。</p> <p>竜巻防護施設に衝突する可能性がある飛来物として、竜巻影響評価ガイドに例示される鋼製材及び鋼製パイプを設計飛来物として設定する。</p> <p>表5-9に本施設における設計飛来物を示す。</p> <p style="text-align: center;">表5-9 本施設の設計飛来物</p> <table border="1" data-bbox="1427 999 2163 1402"> <thead> <tr> <th>飛来物の種類</th> <th>鋼製パイプ</th> <th>鋼製材</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>寸法 (m)</td> <td>長さ×直径 2.0×0.05</td> <td>長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2</td> </tr> <tr> <td>質量 (kg)</td> <td>8.4</td> <td>135</td> </tr> <tr> <td>最大水平速度 (m/s)</td> <td>49</td> <td>51</td> </tr> <tr> <td>最大鉛直速度 (m/s)</td> <td>33</td> <td>34</td> </tr> </tbody> </table>	飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材	寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	質量 (kg)	8.4	135	最大水平速度 (m/s)	49	51	最大鉛直速度 (m/s)	33	34	
記号	定義	単位																																																															
V_D	: 最大風速	(m/s)																																																															
V_T	: 移動速度	(m/s)																																																															
V_{Rm}	: 最大接線風速	(m/s)																																																															
ΔP_{max}	: 最大気圧低下量	(hPa)																																																															
q	: 設計用速度圧	(N/m^2)																																																															
ρ	: 空気密度 (= 1.22)	(kg/m^3)																																																															
G	: ガスト影響係数 (= 1.0)	(-)																																																															
C	: 風力係数	(-)																																																															
A	: 受圧面積 (風向きに垂直な向きに投影した面積)	(m^2)																																																															
W_W	: 風圧力による荷重	(N)																																																															
W_P	: 気圧差による荷重	(N)																																																															
W_M	: 設計飛来物による衝撃荷重	(N)																																																															
L_n	: 設計飛来物サイズ (設計飛来物の各辺の長さのうち、最短辺の長さ)	(m)																																																															
M	: 設計飛来物の質量	(kg)																																																															
V	: 設計飛来物の最大水平速度	(m/s)																																																															
飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材																																																															
寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2																																																															
質量 (kg)	8.4	135																																																															
最大水平速度 (m/s)	49	51																																																															
最大鉛直速度 (m/s)	33	34																																																															

設工認申請書	補足説明	備考
	<p>c. 荷重の組み合わせと許容限界</p> <p>(a) 竜巻防護施設に作用する設計竜巻荷重</p> <p>設計上考慮する竜巻により竜巻防護施設に作用する設計竜巻荷重を以下に示す。</p> <p>i. 風圧力による荷重</p> <p>竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。</p> $W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$ <p>ここで、</p> <p>W_w : 風圧力による荷重</p> <p>q : 設計用速度圧</p> <p>G : ガスト影響係数 (=1.0)</p> <p>C : 風力係数 (施設の形状や風圧力が作用する部位 (屋根、壁等) に応じて設定する。)</p> <p>A : 施設の受圧面積</p> $q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$ <p>ここで、</p> <p>ρ : 空気密度</p> <p>V_D : 設計上考慮する竜巻の最大風速</p> <p>ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対して弱いと考えられる竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮した設計とする。</p> <p>ii. 気圧差による荷重</p> <p>建屋の壁、屋根等においては、設計上考慮する竜巻による気圧低下によって生じる竜巻防護施設の内外の気圧差による圧力荷重を考慮し、保守的に「閉じた施設」を想定して次式のとおり算出する。「閉じた施設」とは通気がない施設であり、施設内部の圧力が竜巻の通過以前と以後で等しいとみなせる。他方、施設の外側の圧力は竜巻の通過中に変化し、施設内外に圧力を生じさせる。</p> $W_p = \Delta P_{max} \cdot A$ <p>ここで、</p> <p>W_p : 気圧差による荷重</p> <p>ΔP_{max} : 最大気圧低下量</p> <p>A : 施設の受圧面積</p>	

設工認申請書	補足説明	備考
	<div data-bbox="1299 304 2303 525" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>iii. 飛来物の衝撃荷重</p> <p>竜巻影響評価ガイドに準拠し、衝突時の荷重が大きくなる向きで設計飛来物が竜巻防護施設に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。</p> <p>また、貫通評価においても、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。</p> </div> <div data-bbox="1299 548 2303 898" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>(b) 設計竜巻荷重の組み合わせ</p> <p>竜巻防護施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、竜巻影響評価ガイドに準拠し、風圧力による荷重 (W_w)、気圧差による荷重 (W_p) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は米国原子力規制委員会の基準類を参考として、以下のとおり設定する。</p> $W_{T1} = W_p$ $W_{T2} = W_w + (1/2) \cdot W_p + W_M$ <p>なお、竜巻防護施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。</p> </div> <div data-bbox="1299 921 2303 1654" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>(c) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定</p> <p>設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。</p> <p>i. 竜巻防護施設に常時作用する荷重及び運転時荷重</p> <p>竜巻防護施設に常時作用する荷重及び運転時荷重としては、自重、死荷重及び活荷重を適切に組み合わせる。</p> <p>ii. 竜巻以外の自然現象による荷重</p> <p>竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり⁽¹⁾、積乱雲の発達時に竜巻と同時に発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、降雪及び降水である。これらの自然現象により発生する荷重の組み合わせの考慮は、以下のとおりとする。</p> <p>なお、竜巻と同時に発生する自然現象については、今後も継続的に新たな知見等の収集に取組み、必要な事項については適切に反映を行う。</p> <p>(i) 落雷</p> <p>竜巻及び落雷が同時に発生する場合においても、落雷による影響は雷撃であり、荷重は発生しない。</p> <p>(ii) 積雪</p> <p>本施設の立地地域は、冬季においては積雪があるため、冬季における竜巻の発生を想定し、建築基準法等に基づいて積雪の荷重を適切に考慮する。</p> </div>	

設工認申請書	補足説明	備考
<p>4.2 評価対象部位</p> <p>4.2.1 気圧差による荷重 (W_p) に対する応力評価における評価対象部位</p> <p>(1) 竜巻防護扉</p> <p>設計竜巻通過時に生じる気圧差による荷重は、通常時に対して躯体外向き方向に竜巻防護扉表側鋼板に作用し、ヒンジ、カンヌキ及び扉枠を介して建屋躯体に伝達されることから、これらの部位が評価対象候補部位として抽出される。</p> <p>このうち、表側鋼板に作用した荷重を保守的にカンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン、カンヌキ受けボルト）にて全て受けるものとし、ヒンジ及び扉枠は評価対象外とする。</p> <p>表側鋼板の健全性は「4.2.4 設計飛来物の衝突に対する貫通評価における評価対象部位」により確認するものとし、本項における評価の対象外とする。^(注6)</p>	<div data-bbox="1299 306 2300 737" style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> <p>(iii) 降雹</p> <p>降雹は積乱雲から降る直径5mm以上の氷の粒であり、仮に直径10cm程度の大型の降雹を仮定した場合でも、その質量は約0.5kgである。竜巻及び降雹が同時に発生する場合においても、直径10cm程度の降雹の終端速度は59m/s⁽²⁾、運動エネルギーは約0.9kJであり、設計飛来物の運動エネルギーと比べて十分小さく、降雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。</p> <p>(iv) 降水</p> <p>竜巻及び降水が同時に発生する場合においても、降水により屋外施設に荷重の影響を与えることはない。また、降水による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。</p> </div> <div data-bbox="1299 768 2300 1157" style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> <p>(d) 許容限界</p> <p>建屋・構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さ及び部材の最小厚さを比較することにより行う。貫通評価は、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。さらに、設計荷重により発生する変形又は応力が安全上適切と認められる規格及び規準による終局耐力等の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。</p> <p>設備の設計においては、許容応力等が安全上適切と認められる規格及び規準による許容応力等の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。</p> </div> <p>(注6) 実際の気圧差による荷重は、竜巻防護扉の裏側鋼板に作用するが、主要部材である表側鋼板に作用するものとして考える。竜巻防護扉の気圧差による荷重伝播経路は以下のとおり。</p> <p>① 表側鋼板 ⇒ ② カンヌキ ⇒ ③ カンヌキ受けピン ⇒ ④ カンヌキ受けボルト ⇒ 躯体</p> <div data-bbox="1469 1434 2101 1801" style="text-align: center;"> </div>	

設工認申請書	補足説明	備考
<p>(2) 竜巻防護板 竜巻防護板 A, B は、予備室又は搬入室内に設置することから閉じた施設の障壁には該当せず、気圧差が生じないため、評価対象外とする。</p> <p>4.2.2 風圧力による荷重 (W_w) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) に対する応力評価における評価対象部位</p> <p>(1) 竜巻防護扉</p> <p>風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は、躯体内向き方向となり竜巻防護扉表側鋼板に作用し、扉枠に荷重が伝達される。そのため、扉枠を評価対象部位とする。</p> <p>ヒンジ、カンヌキは躯体内向き方向に作用する荷重に対して直接的な伝達経路とならない構造となっていることから、これらの部位は評価対象外とする。</p> <p>表側鋼板の健全性は「4.2.4 設計飛来物の衝突に対する貫通評価における評価対象部位」により確認するものとし、本項における評価の対象外とする。^(注7)</p>	<p>(注7) 竜巻防護扉の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重伝播経路は以下のとおり。 ① 表側鋼板 ⇒ ⑤ 扉枠 ⇒ 躯体</p> 	

設工認申請書

(2) 竜巻防護板

竜巻防護板 A, B は、竜巻防護扉と同様に躯体内向き方向に風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重が鋼板に作用し、支持架構を介して建屋躯体に伝達されるため、支持架構及び支持架構アンカーボルト、後打ちプレートを評価対象部位とする。

鋼板の健全性は「4.2.4 設計飛来物の衝突に対する貫通評価における評価対象部位」により確認するものとし、本項における評価の対象外とする。^(注8)

4.2.3 組合せ荷重に対する応力評価における評価対象部位

「4.3.4 荷重の組合せ」に記載する荷重の組合せに基づき、竜巻防護扉カンスキ部、竜巻防護扉扉枠、竜巻防護板支持架構、竜巻防護板アンカーボルト及び竜巻防護板後打ちプレートに対して標準力学式に従い応力評価を実施する。ただし、気圧差による荷重 (W_p) については、保守的な評価となるように風圧力による荷重 (W_w) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_m) に足し合わせ評価を行う。なお、設計飛来物の衝撃荷重に対するひずみ評価は行わない。

4.2.4 設計飛来物の衝突に対する貫通評価における評価対象部位

設計飛来物の進入を防止する設計とするため、開口部に設置する竜巻防護扉表側鋼板及び竜巻防護板鋼板を評価対象部位とする。

4.3 荷重及び荷重の組合せ

4.3.1 荷重の算定に用いる竜巻の特性値^(注9)

荷重の算定に用いる竜巻の特性を表2に示す。

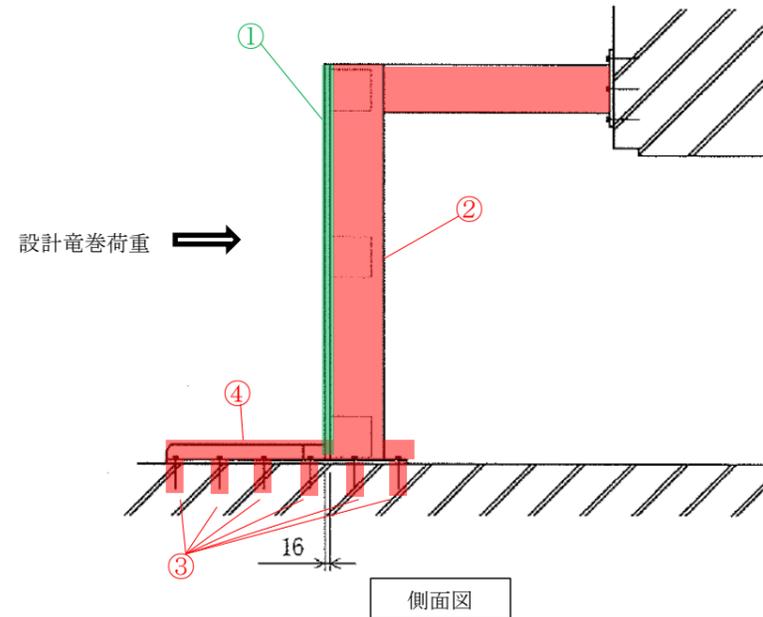
表2 荷重の算定に用いる竜巻の特性

最大風速	移動速度	最大接線風速	空気密度	最大気圧低下量
V_D	V_T	V_{RM}	ρ	ΔP_{max}
(m/s)	(m/s)	(m/s)	(kg/m ³)	(hPa)
100	15	85	1.22	89

補足説明

(注8) 竜巻防護板の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重伝播経路は以下のとおり。

① 鋼板 ⇒ ② 支持架構 ⇒ ④ 後打ちプレート ⇒ ③ 支持架構アンカーボルト ⇒ 躯体



(注9) 荷重の算定に用いる竜巻の特性値は、竜巻影響評価ガイドに基づき設定した事業変更許可申請書に示す値である。また、空気密度については、常温常圧 (15 °C程度, 1013 hPa) を前提としたものである。本施設の冬季における平均気温の平年値は-2 °C程度となるが、設計竜巻のような大規模な竜巻は、それほど低温状況下では発生していないこと、竜巻と低温の組合せを想定しても空気密度に及ぼす影響はごくわずかであることから、本評価に用いる空気密度は、国内外における基準類にて採用している 1.22 kg/m³とする。

備考

設工認申請書	補足説明	備考																																		
<p>4.3.2 荷重の算定に用いる設計飛来物 荷重の算定に用いる設計飛来物を表3に示す。^(注10)</p> <p style="text-align: center;">表3 荷重の算定に用いる設計飛来物</p> <table border="1" data-bbox="231 436 1199 632"> <thead> <tr> <th rowspan="3">飛来物</th> <th colspan="3">寸法</th> <th rowspan="3">質量 M (kg)</th> <th rowspan="3">最大 水平 速度 V (m/s)</th> <th rowspan="3">最大 鉛直 速度 V' (m/s)</th> </tr> <tr> <th>L₃:長さ (m)</th> <th>L₂:幅 (m)</th> <th>L₁:奥行 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鋼製材</td> <td>4.2</td> <td>0.3</td> <td>0.2</td> <td>135</td> <td>51</td> <td>34</td> </tr> </tbody> </table> <p>4.3.3 設計竜巻荷重 設計竜巻荷重を表4に示す。</p> <p style="text-align: center;">表4 設計竜巻荷重</p> <table border="1" data-bbox="267 877 1228 1171"> <tbody> <tr> <td>風圧力による荷重 (W_w)</td> <td>竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。 $W_w = q \times G \times C^{*1} \times A^{*2}$ $q = 1/2 \times \rho \times V_D^2$</td> </tr> <tr> <td>気圧差による荷重 (W_p)</td> <td>竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。 $W_p = \Delta P_{max} \times A$</td> </tr> <tr> <td>設計飛来物による衝撃荷重 (W_m)</td> <td>「4.3.2 荷重の算定に用いる設計飛来物」に基づき算定される設計飛来物の衝撃荷重 $W_m = M \cdot V^2 / L_1$</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1: 風力係数は、建築基準法・同施行令に基づき、算定する。^(注11) *2: 受圧面積は、風圧を受ける面積として竜巻防護扉表側鋼板、竜巻防護板鋼板の高さ及び幅により算定する。</p> <p>4.3.4 荷重の組合せ 荷重の組合せは以下のとおり設定する。 設計竜巻荷重は、竜巻影響評価ガイドに準拠し、風圧力による荷重 (W_w)、気圧差による荷重 (W_p) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_m) を組合せた複合荷重 (W_{T1}及びW_{T2}) とする。</p> <p style="text-align: center;">表5 荷重の組合せ</p> <table border="1" data-bbox="267 1541 1228 1745"> <thead> <tr> <th>荷重の種類</th> <th colspan="2">荷重の組合せ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">設計竜巻荷重</td> <td>複合荷重 (W_{T1})</td> <td>W_p</td> </tr> <tr> <td>複合荷重 (W_{T2})</td> <td>W_w + 1/2W_p + W_m</td> </tr> <tr> <td>衝突検討用竜巻荷重</td> <td colspan="2">W_m</td> </tr> </tbody> </table>	飛来物	寸法			質量 M (kg)	最大 水平 速度 V (m/s)	最大 鉛直 速度 V' (m/s)	L ₃ :長さ (m)	L ₂ :幅 (m)	L ₁ :奥行 (m)	鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	51	34	風圧力による荷重 (W _w)	竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。 $W_w = q \times G \times C^{*1} \times A^{*2}$ $q = 1/2 \times \rho \times V_D^2$	気圧差による荷重 (W _p)	竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。 $W_p = \Delta P_{max} \times A$	設計飛来物による衝撃荷重 (W _m)	「4.3.2 荷重の算定に用いる設計飛来物」に基づき算定される設計飛来物の衝撃荷重 $W_m = M \cdot V^2 / L_1$	荷重の種類	荷重の組合せ		設計竜巻荷重	複合荷重 (W _{T1})	W _p	複合荷重 (W _{T2})	W _w + 1/2W _p + W _m	衝突検討用竜巻荷重	W _m		<p>(注10) 荷重の選定に用いる設計飛来物は、竜巻影響評価ガイドに基づき設定した事業変更許可申請書に示す設計飛来物である。</p> <p>事業変更許可申請書における設計飛来物の選定は、竜巻影響評価ガイドを参考にプラントウォークダウンによる敷地全体を俯瞰した調査及び検討を行い、敷地内の資機材等の設置状況を踏まえ、竜巻防護施設に衝突する可能性のある飛来物を抽出している。抽出した飛来物に竜巻影響評価ガイドに例示される飛来物を加え、それぞれの寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、貫通力及び運動エネルギーを考慮して、竜巻防護対策によって防護が出来ない可能性があるものは、固縛、建屋内収納又は撤去により飛来物とならない設計とすることで、本施設において考慮すべき設計飛来物として竜巻影響評価ガイドに例示される鋼製材及び鋼製パイプを選定している。このうち、本評価では、衝突時の影響の大きい鋼製材を評価に用いている。</p> <p>(注11) 風力係数の算出に係る設計の考え方を別添1に示す。</p>	
飛来物		寸法						質量 M (kg)	最大 水平 速度 V (m/s)	最大 鉛直 速度 V' (m/s)																										
		L ₃ :長さ (m)	L ₂ :幅 (m)	L ₁ :奥行 (m)																																
	鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	51	34																													
風圧力による荷重 (W _w)	竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。 $W_w = q \times G \times C^{*1} \times A^{*2}$ $q = 1/2 \times \rho \times V_D^2$																																			
気圧差による荷重 (W _p)	竜巻影響評価ガイドに準拠し、次式のとおり算出する。 $W_p = \Delta P_{max} \times A$																																			
設計飛来物による衝撃荷重 (W _m)	「4.3.2 荷重の算定に用いる設計飛来物」に基づき算定される設計飛来物の衝撃荷重 $W_m = M \cdot V^2 / L_1$																																			
荷重の種類	荷重の組合せ																																			
設計竜巻荷重	複合荷重 (W _{T1})	W _p																																		
	複合荷重 (W _{T2})	W _w + 1/2W _p + W _m																																		
衝突検討用竜巻荷重	W _m																																			

設工認申請書	補足説明	備考																																																
<p>4.3.5 設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定 竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発生時に竜巻と同時に発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、降雹及び降水である。これらの自然現象により発生する荷重は、竜巻防護扉、竜巻防護板が建屋躯体内に設置され、物理的な影響が小さいこと等から考慮不要とし、評価対象外とする。</p> <p>4.4 許容限界 竜巻防護扉、竜巻防護板の許容限界は、荷重の種類ごとに以下のとおりとする。</p> <p>4.4.1 設計竜巻荷重 算定された荷重により発生する荷重及び応力が許容限界以下であること。</p> <p>4.4.2 衝突検討用竜巻荷重 竜巻防護扉表側鋼板及び竜巻防護板鋼板の厚さが貫通限界厚さを上回ること。</p> <p>4.5 評価方法 「4.2 評価対象部位」に対して「4.3.4 荷重の組合せ」に示す荷重により発生する応力が、許容限界を超えないことを確認する。評価対象部位と荷重の関係を表6に示す。</p> <p style="text-align: center;">表6 評価対象部位と荷重</p> <table border="1" data-bbox="261 1031 1219 1423"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">評価対象部位</th> <th colspan="3">荷重の組合せ</th> </tr> <tr> <th>複合荷重 W_{T1}</th> <th>複合荷重 W_{T2}</th> <th>貫通評価</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">竜巻防護扉</td> <td rowspan="3">カンヌキ部</td> <td>カンヌキ</td> <td>●</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>カンヌキ受けピン</td> <td>●</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>カンヌキ受けボルト</td> <td>●</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>扉枠</td> <td>—</td> <td>●</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td></td> <td>表側鋼板</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>●</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">竜巻防護板</td> <td>支持架構</td> <td>—</td> <td>●</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>支持架構アンカーボルト</td> <td>—</td> <td>●</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>後打ちプレート</td> <td>—</td> <td>●</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>鋼板</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>●</td> </tr> </tbody> </table> <p>4.5.1 設計竜巻荷重 (1) 竜巻防護扉 a. カンヌキ部 (カンヌキ, カンヌキ受けピン, カンヌキ受けボルト) 竜巻防護扉が開放状態になることを防止するためにカンヌキ部が機能することから、次式により求められる曲げ応力及び組合せ応力が設計引張強さ : S₀を超えないこと、せん断応力については、設計引張強さの 1/√3 : S₀/√3 を超えないことを確認する。 ・カンヌキ $\sigma_b = M_K / Z_1$ $\tau_b = Q_K / A_1$</p>	評価対象部位		荷重の組合せ			複合荷重 W _{T1}	複合荷重 W _{T2}	貫通評価	竜巻防護扉	カンヌキ部	カンヌキ	●	—	—	カンヌキ受けピン	●	—	—	カンヌキ受けボルト	●	—	—	扉枠	—	●	—		表側鋼板	—	—	●	竜巻防護板	支持架構	—	●	—	支持架構アンカーボルト	—	●	—	後打ちプレート	—	●	—	鋼板	—	—	●		
評価対象部位			荷重の組合せ																																															
		複合荷重 W _{T1}	複合荷重 W _{T2}	貫通評価																																														
竜巻防護扉	カンヌキ部	カンヌキ	●	—	—																																													
		カンヌキ受けピン	●	—	—																																													
		カンヌキ受けボルト	●	—	—																																													
	扉枠	—	●	—																																														
	表側鋼板	—	—	●																																														
竜巻防護板	支持架構	—	●	—																																														
	支持架構アンカーボルト	—	●	—																																														
	後打ちプレート	—	●	—																																														
	鋼板	—	—	●																																														

設工認申請書	補足説明	備考																																																																		
$\sigma_{bb} = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau_b^2}$ $R = W_p / n$ $M_K = R \cdot L$ $Q_K = R$ <p>・カンヌキ受けピン</p> $\sigma_{bp} = M_p / Z_2$ $\tau_{bp} = Q_p / A_2$ $\sigma_{bpb} = \sqrt{\sigma_{bp}^2 + 3\tau_{bp}^2}$ $M_p = R \cdot L_p / 4$ $Q_p = R / 2$ <p>・カンヌキ受けボルト</p> $\tau_t = T / A_3$ $T = R / nb$ <p>ここで、</p> <table border="0"> <tr> <td>σ_b</td> <td>: カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>τ_b</td> <td>: カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>σ_{bb}</td> <td>: カンヌキ 1 本あたりに生じる組合せ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>σ_{bp}</td> <td>: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる曲げ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>τ_{bp}</td> <td>: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じるせん断応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>σ_{bpb}</td> <td>: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる組合せ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>τ_t</td> <td>: カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じるせん断応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>: カンヌキ 1 本あたりに生じる反力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>M_K</td> <td>: カンヌキに生じる曲げモーメント</td> <td>(N・mm)</td> </tr> <tr> <td>M_p</td> <td>: カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント</td> <td>(N・mm)</td> </tr> <tr> <td>Z_1</td> <td>: カンヌキの断面係数</td> <td>(mm³)</td> </tr> <tr> <td>Z_2</td> <td>: カンヌキ受けピンの断面係数</td> <td>(mm³)</td> </tr> <tr> <td>Q_K</td> <td>: カンヌキに生じるせん断力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>Q_p</td> <td>: カンヌキ受けピンに生じるせん断力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>T</td> <td>: カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じるせん断力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>A_1</td> <td>: カンヌキの断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>A_2</td> <td>: カンヌキ受けピンの断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>A_3</td> <td>: カンヌキ受けボルトの断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>: カンヌキの本数</td> <td>(本)</td> </tr> <tr> <td>nb</td> <td>: カンヌキ受けボルト本数</td> <td>(本)</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>: 作用点間距離</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>L_p</td> <td>: カンヌキ受けピンの軸支持間距離</td> <td>(mm)</td> </tr> </table> <p>b. 扉枠 扉枠に作用する荷重は、扉と接する4辺で受け持つこととし、次式により求められるせん断応力が設計引張強さの$1/\sqrt{3} : S_u/\sqrt{3}$を超えないことを確認する。</p>	σ_b	: カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力	(N/mm ²)	τ_b	: カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力	(N/mm ²)	σ_{bb}	: カンヌキ 1 本あたりに生じる組合せ応力	(N/mm ²)	σ_{bp}	: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる曲げ応力	(N/mm ²)	τ_{bp}	: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じるせん断応力	(N/mm ²)	σ_{bpb}	: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる組合せ応力	(N/mm ²)	τ_t	: カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じるせん断応力	(N/mm ²)	R	: カンヌキ 1 本あたりに生じる反力	(N)	M_K	: カンヌキに生じる曲げモーメント	(N・mm)	M_p	: カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント	(N・mm)	Z_1	: カンヌキの断面係数	(mm ³)	Z_2	: カンヌキ受けピンの断面係数	(mm ³)	Q_K	: カンヌキに生じるせん断力	(N)	Q_p	: カンヌキ受けピンに生じるせん断力	(N)	T	: カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じるせん断力	(N)	A_1	: カンヌキの断面積	(mm ²)	A_2	: カンヌキ受けピンの断面積	(mm ²)	A_3	: カンヌキ受けボルトの断面積	(mm ²)	n	: カンヌキの本数	(本)	nb	: カンヌキ受けボルト本数	(本)	L	: 作用点間距離	(mm)	L_p	: カンヌキ受けピンの軸支持間距離	(mm)		
σ_b	: カンヌキ 1 本あたりに生じる曲げ応力	(N/mm ²)																																																																		
τ_b	: カンヌキ 1 本あたりに生じるせん断応力	(N/mm ²)																																																																		
σ_{bb}	: カンヌキ 1 本あたりに生じる組合せ応力	(N/mm ²)																																																																		
σ_{bp}	: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる曲げ応力	(N/mm ²)																																																																		
τ_{bp}	: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じるせん断応力	(N/mm ²)																																																																		
σ_{bpb}	: カンヌキ受けピン 1 本あたりに生じる組合せ応力	(N/mm ²)																																																																		
τ_t	: カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じるせん断応力	(N/mm ²)																																																																		
R	: カンヌキ 1 本あたりに生じる反力	(N)																																																																		
M_K	: カンヌキに生じる曲げモーメント	(N・mm)																																																																		
M_p	: カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント	(N・mm)																																																																		
Z_1	: カンヌキの断面係数	(mm ³)																																																																		
Z_2	: カンヌキ受けピンの断面係数	(mm ³)																																																																		
Q_K	: カンヌキに生じるせん断力	(N)																																																																		
Q_p	: カンヌキ受けピンに生じるせん断力	(N)																																																																		
T	: カンヌキ受けボルト 1 本あたりに生じるせん断力	(N)																																																																		
A_1	: カンヌキの断面積	(mm ²)																																																																		
A_2	: カンヌキ受けピンの断面積	(mm ²)																																																																		
A_3	: カンヌキ受けボルトの断面積	(mm ²)																																																																		
n	: カンヌキの本数	(本)																																																																		
nb	: カンヌキ受けボルト本数	(本)																																																																		
L	: 作用点間距離	(mm)																																																																		
L_p	: カンヌキ受けピンの軸支持間距離	(mm)																																																																		

設工認申請書	補足説明	備考																		
<p> $\tau_t = T/A$ $A = 2a(Wh + Wd)$ ここで、 <table style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>τ_t</td> <td>: 扉枠に生じるせん断応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>$T(W_{T2})$</td> <td>: 扉枠に生じるせん断力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>: 扉枠に生じるせん断断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>: 扉枠の板厚</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>Wh</td> <td>: 扉枠が荷重を受ける高さ (竜巻防護扉表側鋼板の高さ)</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>Wd</td> <td>: 扉枠が荷重を受ける幅 (竜巻防護扉表側鋼板の幅)</td> <td>(mm)</td> </tr> </table> </p> <p>(2) 竜巻防護板</p> <p>a. 支持架構</p> <p>竜巻防護板A,Bの構造は、逆L字形架構2本からなり、竜巻防護板鋼板が躯体開口部を覆う構造である。逆L字形架構は下端を躯体床へ固定、上端を躯体壁へ固定する構造であり両端固定のL形ラーメンとみなせる。</p> <p>保守的な評価として、設計飛来物が縦はり中央に水平に衝突する場合を想定する。竜巻防護板に作用する風圧力による荷重 (W_w) の1/2を片側のL字架構で受け持つものとし、もう一方のL字架構でも1/2の荷重を受け持つものとする。なお、設計飛来物による衝突荷重 (W_M) は、一方のL字架構の縦はり中央に衝突する場合を想定しており、1/2の荷重として扱わないこととする。</p> <p>上記により、支持架構を両端固定のL形ラーメンとして図2のとおりモデル化し、次式により求められる組合せ応力 ($\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$) の最大応力値 ($\sigma_{max}$) が設計引張強さ : S_U を超えないことを確認する。</p> $\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{H_A}{A_A} + \frac{M_A}{Z_A}\right)^2 + 3\left(\frac{V_A}{A_A}\right)^2}$ $\sigma_B = \left(\frac{ M_B }{Z_B}\right)$ $\sigma_C = \sqrt{\left(\frac{V_C}{A_C} + \frac{ M_C }{Z_C}\right)^2 + 3\left(\frac{H_C}{A_C}\right)^2}$ $\sigma_{max} = \text{Max}(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C)$ $M_A = \frac{Pab^2}{2\ell^2(k+1)}$ $M_B = -\frac{Pab^2}{\ell^2(k+1)}$ $M_C = -\frac{Pab}{2\ell^2(k+1)}[k\ell + (k+2)a]$	τ_t	: 扉枠に生じるせん断応力	(N/mm ²)	$T(W_{T2})$: 扉枠に生じるせん断力	(N)	A	: 扉枠に生じるせん断断面積	(mm ²)	a	: 扉枠の板厚	(mm)	Wh	: 扉枠が荷重を受ける高さ (竜巻防護扉表側鋼板の高さ)	(mm)	Wd	: 扉枠が荷重を受ける幅 (竜巻防護扉表側鋼板の幅)	(mm)		
τ_t	: 扉枠に生じるせん断応力	(N/mm ²)																		
$T(W_{T2})$: 扉枠に生じるせん断力	(N)																		
A	: 扉枠に生じるせん断断面積	(mm ²)																		
a	: 扉枠の板厚	(mm)																		
Wh	: 扉枠が荷重を受ける高さ (竜巻防護扉表側鋼板の高さ)	(mm)																		
Wd	: 扉枠が荷重を受ける幅 (竜巻防護扉表側鋼板の幅)	(mm)																		

設工認申請書	補足説明	備考																																																																											
$-V_A = V_C = \frac{3M_A}{c}$ $H_A = \frac{Pb - M_B + M_C}{\ell}$ $H_C = P - H_A$ $k = \frac{cI_{BC}}{\ell I_{AB}}$ <p>ここで,</p> <table border="0"> <tr> <td>P (W_{T2})</td> <td>: 集中荷重 (W_w+1/2W_p+W_M) ※1</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>ℓ</td> <td>: 縦はり長さ</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>: 荷重作用点までの距離</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>: 荷重作用点までの距離</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>: 横はり長さ</td> <td>(mm)</td> </tr> <tr> <td>σ_A</td> <td>: 固定点 A に作用する組合せ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>σ_B</td> <td>: 接点 B に作用する組合せ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>σ_C</td> <td>: 固定点 C に作用する組合せ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>σ_{max}</td> <td>: 固定点 A, C, 接点 B に作用する最大組合せ応力</td> <td>(N/mm²)</td> </tr> <tr> <td>H_A</td> <td>: 固定点 A に作用する水平力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>H_C</td> <td>: 固定点 C に作用する水平力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>V_A</td> <td>: 固定点 A に作用する鉛直力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>V_C</td> <td>: 固定点 C に作用する鉛直力</td> <td>(N)</td> </tr> <tr> <td>M_A</td> <td>: 固定点 A に作用する曲げモーメント</td> <td>(N・mm)</td> </tr> <tr> <td>M_B</td> <td>: 接点 B に作用する曲げモーメント</td> <td>(N・mm)</td> </tr> <tr> <td>M_C</td> <td>: 固定点 C に作用する曲げモーメント</td> <td>(N・mm)</td> </tr> <tr> <td>A_A</td> <td>: 固定点 A の支持架構の断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>A_B</td> <td>: 接点 B の支持架構の断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>A_C</td> <td>: 固定点 C の支持架構の断面積</td> <td>(mm²)</td> </tr> <tr> <td>Z_A</td> <td>: 固定点 A の支持架構の断面係数</td> <td>(mm³)</td> </tr> <tr> <td>Z_B</td> <td>: 接点 B の支持架構の断面係数</td> <td>(mm³)</td> </tr> <tr> <td>Z_C</td> <td>: 固定点 C の支持架構の断面係数</td> <td>(mm³)</td> </tr> <tr> <td>I_{AB}</td> <td>: はり AB 間の断面二次モーメント</td> <td>(mm⁴)</td> </tr> <tr> <td>I_{BC}</td> <td>: はり BC 間の断面二次モーメント</td> <td>(mm⁴)</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>: 剛性比</td> <td>(-)</td> </tr> </table> <p>※1 : W_wの1/2の荷重を各L字架構が受け持つ。</p>	P (W _{T2})	: 集中荷重 (W _w +1/2W _p +W _M) ※1	(N)	ℓ	: 縦はり長さ	(mm)	a	: 荷重作用点までの距離	(mm)	b	: 荷重作用点までの距離	(mm)	c	: 横はり長さ	(mm)	σ _A	: 固定点 A に作用する組合せ応力	(N/mm ²)	σ _B	: 接点 B に作用する組合せ応力	(N/mm ²)	σ _C	: 固定点 C に作用する組合せ応力	(N/mm ²)	σ _{max}	: 固定点 A, C, 接点 B に作用する最大組合せ応力	(N/mm ²)	H _A	: 固定点 A に作用する水平力	(N)	H _C	: 固定点 C に作用する水平力	(N)	V _A	: 固定点 A に作用する鉛直力	(N)	V _C	: 固定点 C に作用する鉛直力	(N)	M _A	: 固定点 A に作用する曲げモーメント	(N・mm)	M _B	: 接点 B に作用する曲げモーメント	(N・mm)	M _C	: 固定点 C に作用する曲げモーメント	(N・mm)	A _A	: 固定点 A の支持架構の断面積	(mm ²)	A _B	: 接点 B の支持架構の断面積	(mm ²)	A _C	: 固定点 C の支持架構の断面積	(mm ²)	Z _A	: 固定点 A の支持架構の断面係数	(mm ³)	Z _B	: 接点 B の支持架構の断面係数	(mm ³)	Z _C	: 固定点 C の支持架構の断面係数	(mm ³)	I _{AB}	: はり AB 間の断面二次モーメント	(mm ⁴)	I _{BC}	: はり BC 間の断面二次モーメント	(mm ⁴)	k	: 剛性比	(-)		
P (W _{T2})	: 集中荷重 (W _w +1/2W _p +W _M) ※1	(N)																																																																											
ℓ	: 縦はり長さ	(mm)																																																																											
a	: 荷重作用点までの距離	(mm)																																																																											
b	: 荷重作用点までの距離	(mm)																																																																											
c	: 横はり長さ	(mm)																																																																											
σ _A	: 固定点 A に作用する組合せ応力	(N/mm ²)																																																																											
σ _B	: 接点 B に作用する組合せ応力	(N/mm ²)																																																																											
σ _C	: 固定点 C に作用する組合せ応力	(N/mm ²)																																																																											
σ _{max}	: 固定点 A, C, 接点 B に作用する最大組合せ応力	(N/mm ²)																																																																											
H _A	: 固定点 A に作用する水平力	(N)																																																																											
H _C	: 固定点 C に作用する水平力	(N)																																																																											
V _A	: 固定点 A に作用する鉛直力	(N)																																																																											
V _C	: 固定点 C に作用する鉛直力	(N)																																																																											
M _A	: 固定点 A に作用する曲げモーメント	(N・mm)																																																																											
M _B	: 接点 B に作用する曲げモーメント	(N・mm)																																																																											
M _C	: 固定点 C に作用する曲げモーメント	(N・mm)																																																																											
A _A	: 固定点 A の支持架構の断面積	(mm ²)																																																																											
A _B	: 接点 B の支持架構の断面積	(mm ²)																																																																											
A _C	: 固定点 C の支持架構の断面積	(mm ²)																																																																											
Z _A	: 固定点 A の支持架構の断面係数	(mm ³)																																																																											
Z _B	: 接点 B の支持架構の断面係数	(mm ³)																																																																											
Z _C	: 固定点 C の支持架構の断面係数	(mm ³)																																																																											
I _{AB}	: はり AB 間の断面二次モーメント	(mm ⁴)																																																																											
I _{BC}	: はり BC 間の断面二次モーメント	(mm ⁴)																																																																											
k	: 剛性比	(-)																																																																											

設工認申請書	補足説明	備考
--------	------	----

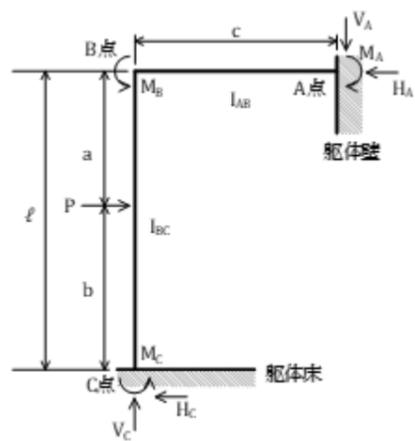


図2 支持架構モデル概略図

b. 支持架構アンカーボルト

アンカーボルトに作用する荷重は、支持架構A点及びC点のうち、曲げモーメント及び水平力が大きいC点での荷重 V_c , M_c , H_c とする。ここで、 H_c はせん断荷重、 M_c 及び V_c は引張荷重に寄与する。これらの荷重が「加工施設の耐震性に関する説明書」に基づき算出する許容引張力 (pa) 及び許容せん断力 (qa) の組合せ荷重が1を超えないことを次式により確認する。

$$\left(\frac{p}{pa}\right)^2 + \left(\frac{q}{qa}\right)^2 \leq 1$$

ここで、

- p : 引張荷重 (N)
- q : せん断荷重 (N)

c. 後打ちプレート

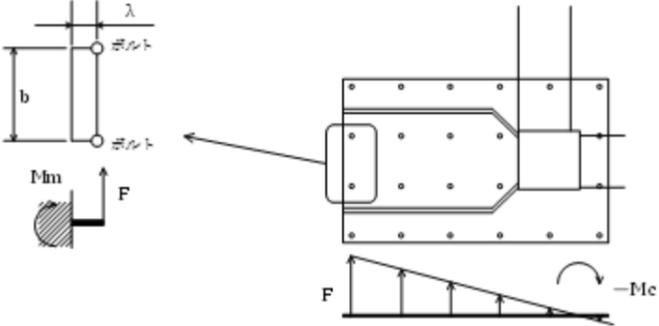
後打ちプレートに作用する荷重として、支持架構C点での支持架構のモーメントにより、後打ちプレートには引張力が作用する。最大の引張力が作用する部位で片持ちばりとして図3のとおりモデル化し、次式により求められる曲げ応力が設計引張強さ : S_u を超えないことを確認する。

$$\sigma_m = \frac{Mm}{Zm}$$

$$Mm = F\lambda$$

$$Zm = bt^2/6$$

ここで、

設工認申請書	補足説明	備考
<p> σ_m : 後打ちプレートに生じる最大曲げ応力 (N/mm²) M_m : 最大曲げモーメント (N・mm) Z_m : 計算モデルの断面係数 (mm³) F : 引張荷重 (2p) ※1 (N) λ : 計算モデルの曲げ長さ (mm) b : 計算モデルの幅 (mm) t : 後打ちプレートの厚さ (mm) </p> <p>※1: 後打ちプレートに作用する引張荷重と最大曲げモーメントは保守的にアンカーボルトの引張荷重2本分の荷重から求めるものとする。</p>		
 <p>図3 後打ちプレートモデル概略図</p>		
<p>4.5.2 衝突検討用竜巻荷重</p> <p>竜巻防護扉表側鋼板、竜巻防護板鋼板の厚さが、次式（「タービンミサイル評価について（原子炉安全専門審査会 昭和52年7月20日）」で用いられているBRL式）により求められる貫通限界厚さ（T）を0.97^{注1}で除した設計上担保する鋼板の貫通限界厚さを下回らないことを確認する。</p> <p>(注12)</p> $T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^2}$ <p>ここで、</p> <p> M : 設計飛来物の質量 (kg) V : 設計飛来物の最大水平速度 (m/s) K : 鋼板の材質に関する係数 (-) d : 設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m) T : BRL式による鋼板の貫通限界厚さ (m) </p> <p>※1: 研究報告の実験時のBRL式による貫通限界厚さ/研究報告で実験的に非貫通が確認された実測厚さ</p>	<p>(注12) 竜巻防護扉表側鋼板及び竜巻防護板鋼板の貫通評価については、タービンミサイル評価等で用いられているBRL式^{※1}を用いて貫通限界厚さを算出しており、評価式に含まれる等価直径の考え方によって、貫通限界厚さは変動する。</p> <p>貫通評価に用いる設計飛来物は、衝突面が角型の飛来物であり、BRL式の等価直径に入力する方法が明らかになっていないが、先行発電炉では、接触面積が同等な円直径を等価直径としている。</p> <p>一方、本施設では、設計飛来物が同じである再処理施設と同じく、最新の知見を取り入れて「衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径として設定している。最新の知見では、各種設計条件に対するBRL式の検証を解析及び試験の両面から実施しており、本設計の類似条件下においても一定の妥当性が示されていることから「衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径として適用することが可能である。再処理施設におけるBRL式の適用性に係る説明を別添2に示す。</p> <p>※1: 「タービンミサイルについて（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」の中で鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されているBRL式。</p>	

5. 強度評価結果

設計竜巻荷重については、表7及び表8に示すとおり、設計竜巻荷重により発生する荷重及び応力が許容限界を満足する。また、衝突検討用竜巻荷重については、表9に示すとおり、竜巻防護扉表側鋼板、竜巻防護板鋼板の厚さが設計上担保する鋼板の貫通限界厚さを上回ることから、許容限界を満足する。

表7 設計竜巻荷重と許容限界との比較（竜巻防護扉）

	受圧面積 (m ²)	設計竜巻荷重					評価結果										
		風圧力 による荷重 W _w (N)	気圧差 による荷重 W _p (N)	設計飛来物 による荷重 W _M (N)	組合せ荷重 W _{T1} W _{T2} (N)		曲げ応力			せん断応力			組合せ応力				
		計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	
竜巻防護扉	1.637	7.989×10 ³	1.457×10 ⁴	1.756×10 ⁶	1.771×10 ⁶	59.7	690	○	3.71	398	○	60.0	690	○			
						85.2	690	○	5.15	398	○	85.7	690	○			
									21.6	311	○						
									14.5	300	○						

表8 設計竜巻荷重と許容限界との比較（竜巻防護板）

	受圧面積 (m ²)	設計竜巻荷重					評価結果												
		風圧力 による荷重 W _w (N)	気圧差 による荷重 W _p (N)	設計飛来物 による荷重 W _M (N)	組合せ荷重 W _{T1} W _{T2} (N)		荷重				曲げ応力			組合せ応力					
		計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定			
竜巻防護板	5.72	2.791×10 ⁴	1.756×10 ⁶	1.770×10 ⁶	5.006×10 ⁴	1.014×10 ⁵	4.823×10 ⁴	8.517×10 ⁴	0.56	1	○	160	400	○	296	400	○		

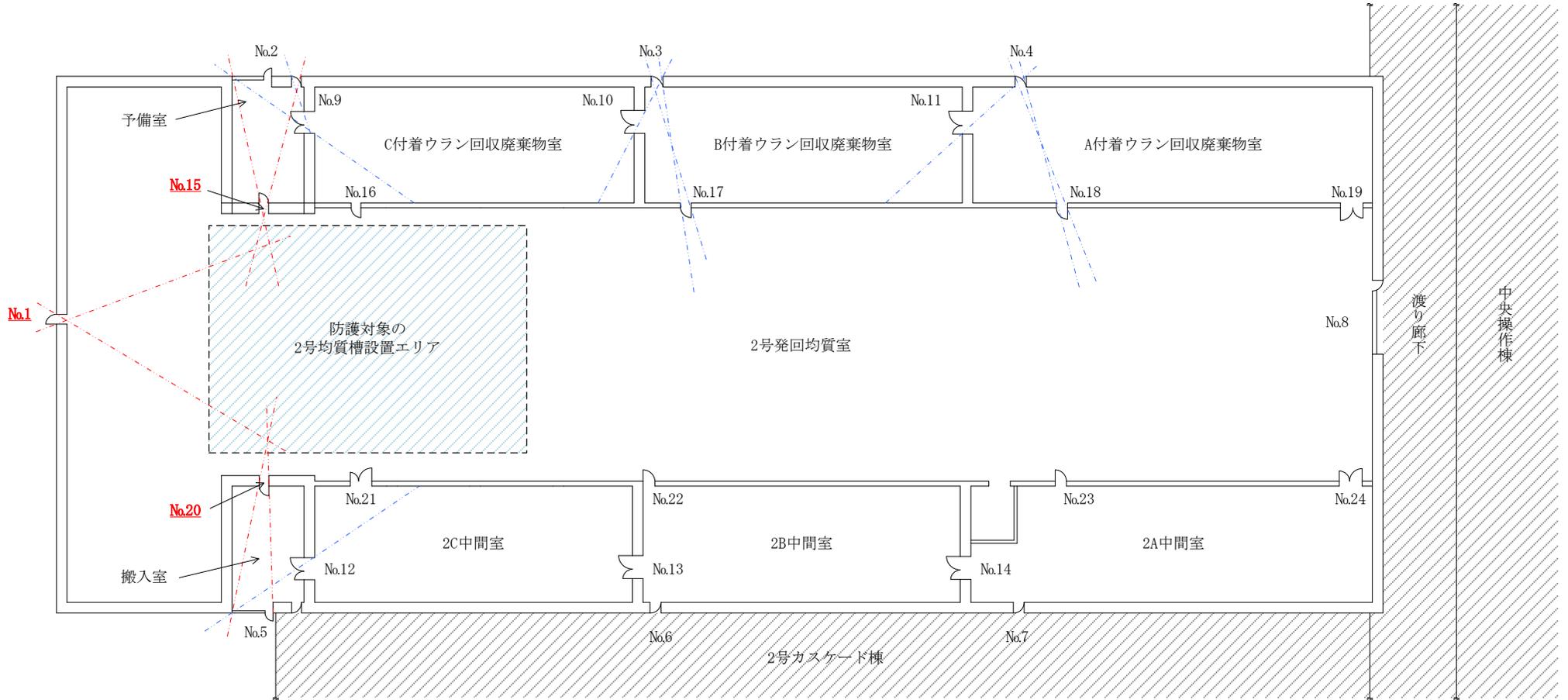
表9 衝突検討用竜巻荷重と許容限界との比較

	寸法 (m)	設計飛来物					設計上担保する鋼板の貫通限界厚さ		鋼板厚さ (mm)	判定 (-)	
		設計飛来物の質量 M (kg)	設計飛来物の最大水平速度 V (m/s)	鋼材の材質に関する係数 K (-)	外周長 ℓ (m)	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 d (m)	計算値	許容限界			
		計算値	許容限界	判定	計算値	許容限界	判定				
竜巻防護扉表側鋼板	SUS304	4.2×0.3×0.2	135	51	1.0	0.9781	0.311	0.0082	8.2	16.0	○
竜巻防護板鋼板	SS400									16.0	○

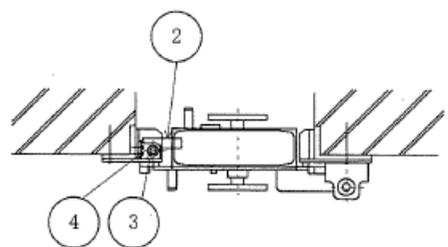
6. 準拠規格・基準等

- (1) 建築基準法及び同施行令
- (2) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC-1-2005/2007
- (3) タービンミサイル評価について（原子炉安全専門審査会 昭和52年7月20日）
- (4) 鋼構造設計基準-許容応力度設計法（日本建築学会 2005改訂）
- (5) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会 令和元年9月6日）
- (6) 機械工学便覧α3編 材料力学（日本機械学会 2005年4月25日）
- (7) 実用ラーメン計算便覧 増補改訂版（岡村雅夫編 瀧野正次著 産業図書 昭和58年5月15日）
- (8) 各種合成構造設計指針・同解説（日本建築学会 2010年11月1日 第2版）
- (9) 日本産業規格（JIS）
- (10) 竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究-BRL式の適用性に関する基礎検討（電力中央研究所 研究報告019003 2019年11月）

凡例
 - - - - - : 設計飛来物導線



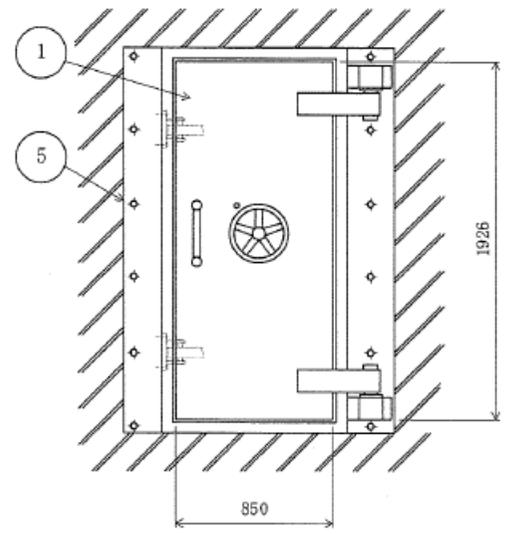
補足図-1 2号均質槽と開口部, 設計飛来物導線



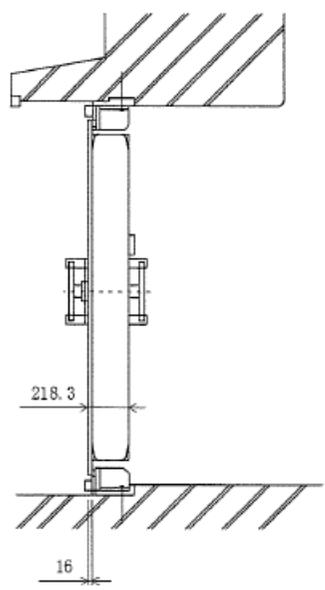
平面図

番号	部品名
①	表側鋼板
②	カンヌキ
③	カンヌキ受けピン
④	カンヌキ受けボルト
⑤	扉枠

単位：mm

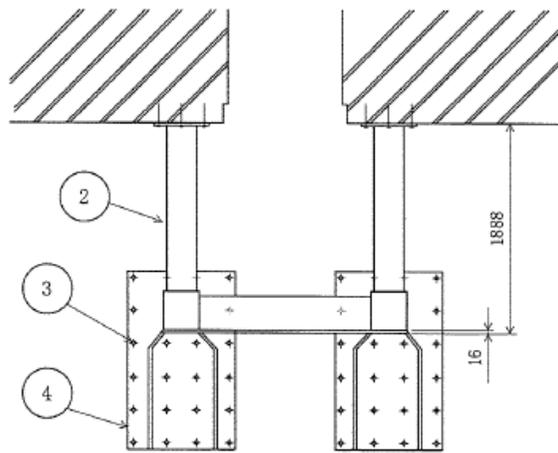


正面図

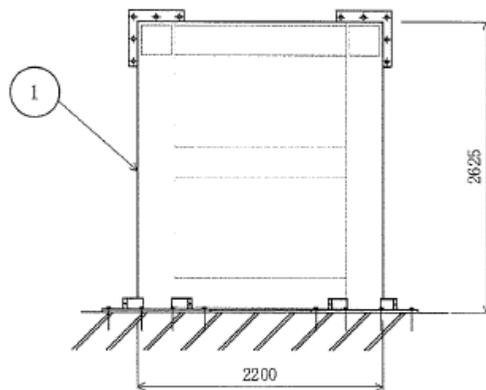


側面図

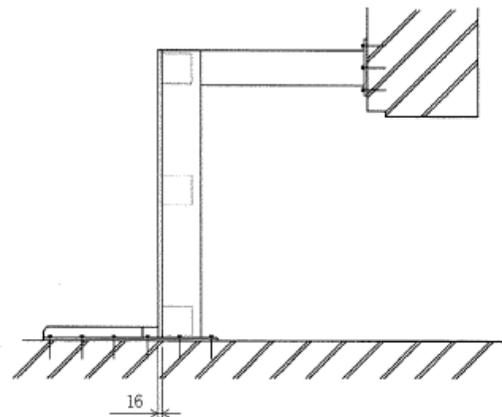
補足図-2 竜巻防護扉 構造図



平面図



正面図

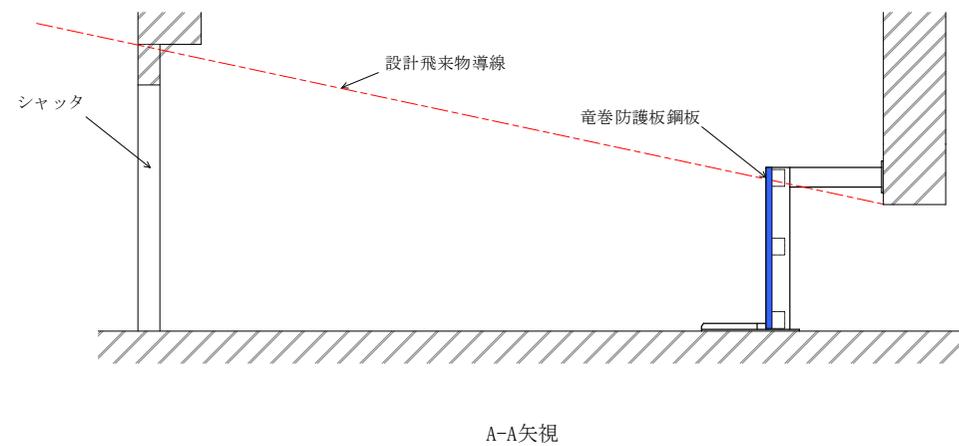
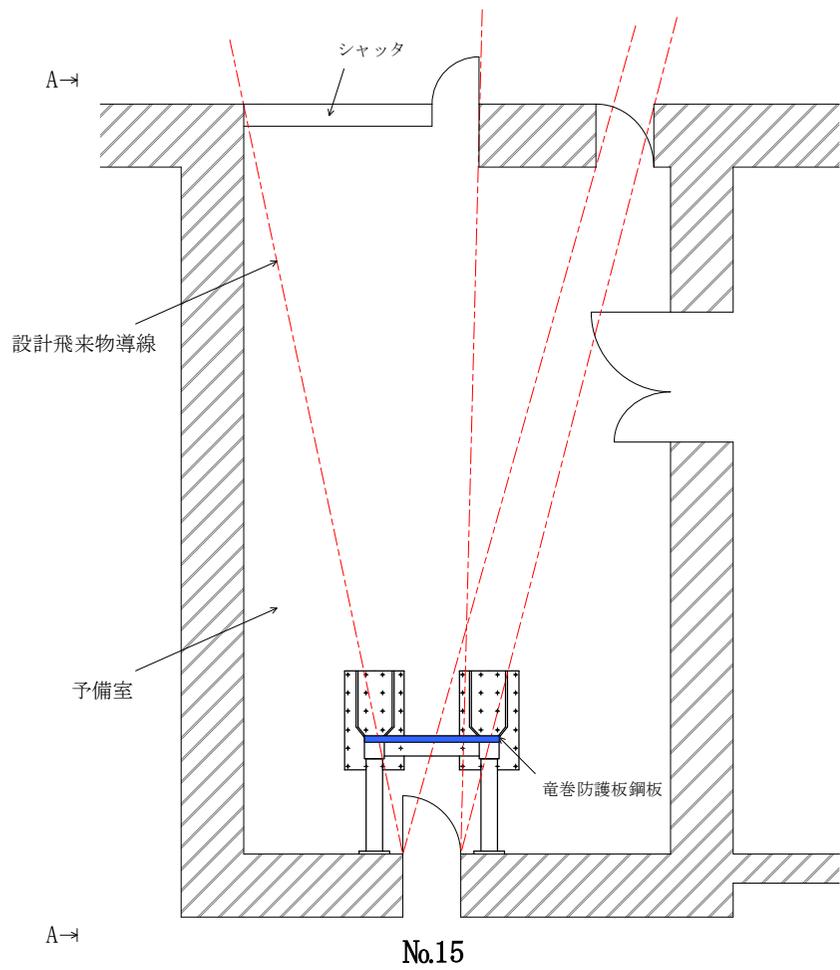


側面図

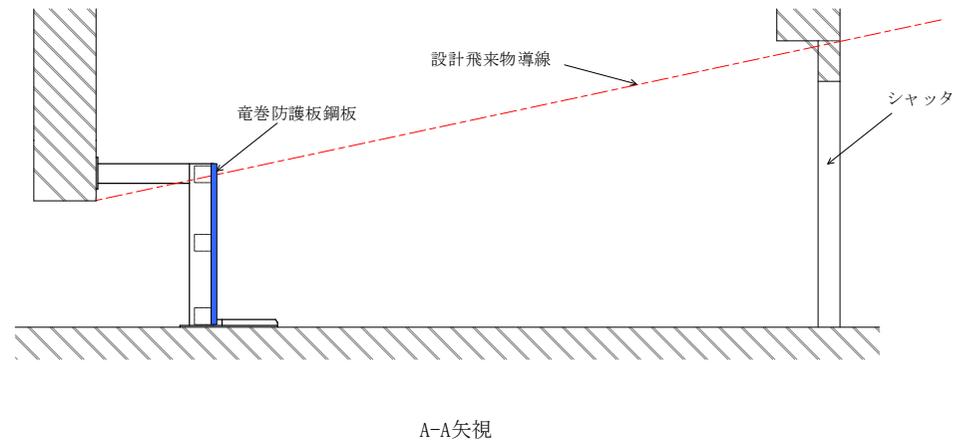
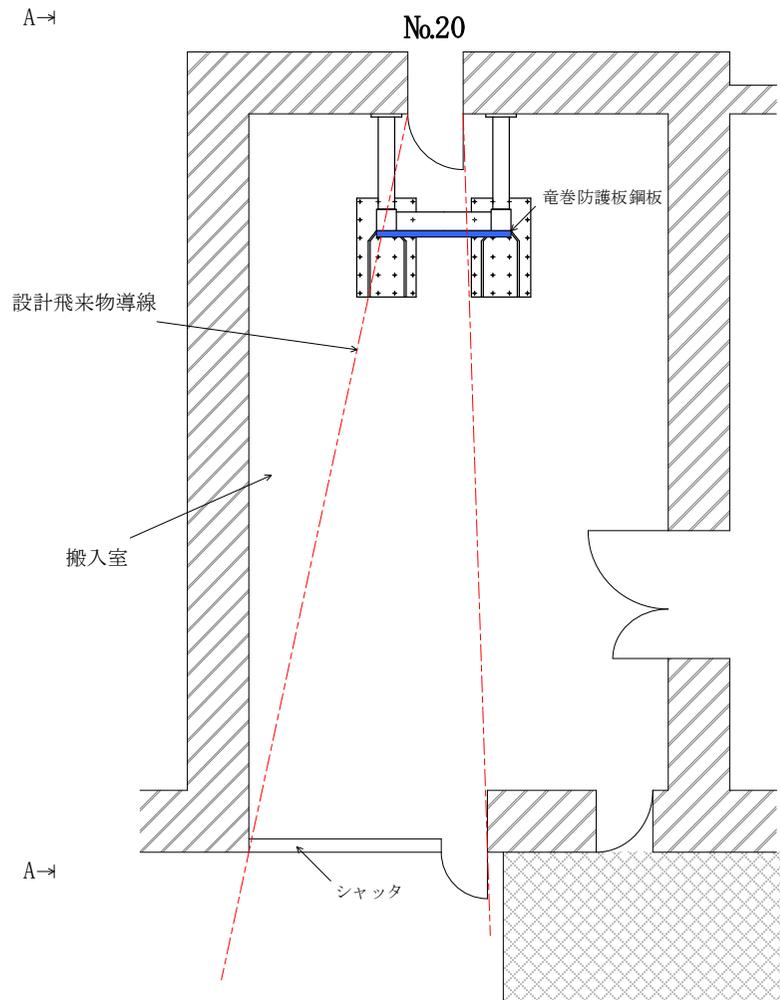
番号	部品名
①	鋼板
②	支持架構
③	支持架構アンカーボルト
④	後打ちプレート

単位：mm

補足図-3 竜巻防護板 構造図



補足図-3 設計飛来物導線と竜巻防護板の配置 (No.15 開口部)



補足図-4 設計飛来物導線と竜巻防護板の配置 (No.20 開口部)

別添1 風力係数について

【風力係数の設定根拠】

竜巻防護扉及び竜巻防護板の評価に用いる風力係数は「建設省告示 第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」に基づき、 $C_f = C_{pe} - C_{pi}$ として算出する。

竜巻防護扉は、屋外と通じる扉であり、躯体外側から内側方向に風圧力が作用する。また、竜巻防護板は、室内に設置するが、屋外と通じているシャッタ等が損傷した場合に風圧力が防護板に加わる。これらを踏まえ、 C_{pe} の値は、風上壁面の 0.8 kz とする。なお、 kz については、 H （約 7 m ） $> Z_b$ （5）、 $Z=H$ であることから 1 とする。

以上により、 $C_f = 0.8 \times 1 - 0$ となり、風力係数は 0.8 とする。

「建設省告示 第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」

第 3 表 1 「壁面の C_{pe} 」、表 5 「閉鎖型及び開放型の建築物の C_{pi} 」

$$C_f = C_{pe} - C_{pi}$$

この式において、 C_f 、 C_{pe} 及び C_{pi} は、それぞれ次の数値を表すものとする。

C_f 風力係数

C_{pe} 閉鎖型及び開放型の建築物の外圧係数で、次の表 1 から表 4 までに掲げる数値（屋外から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）

C_{pi} 閉鎖型及び開放型の建築物の内圧係数で、次の表 5 に掲げる数値（室内から当該部分を垂直に押す方向を正とする。）

ただし、独立上家、ラチス構造物、金網その他の網状の構造物及び煙突その他の円筒形の構造物にあっては、次の表 6 から表 9 までに掲げる数値（図中の→の方向を正とする。）を C_f とするものとする。

表 1 壁面の C_{pe}

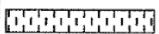
部位	風上壁面	側壁面		風下壁面
		風上端部より $0.5a$ の領域	左に掲げる領域以外の領域	
				
C_{pe}	0.8kz	-0.7	-0.4	-0.4

表 5 閉鎖型及び開放型の建築物の C_{pi}

型式	閉鎖型	開放型	
		風上開放	風下開放
C_{pi}	0 及び -0.2	0.6	-0.4

「建設省告示 第 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日制定）」

記号の説明及び kz 算出式

前項の図表において、 H 、 Z 、 B 、 D 、 kz 、 a 、 h 、 f 、 θ 及び ϕ はそれぞれ次の数値を、 Σ ：風向を表すものとする。

H	建築物の高さと軒の高さとの平均（単位 メートル）
Z	当該部分の地盤面からの高さ（単位 メートル）
B	風向に対する見付幅（単位 メートル）
D	風向に対する奥行（単位 メートル）
kz	次に掲げる表によって計算した数値

H が Z_b 以下の場合		1.0
H が Z_b を超える場合	Z が Z_b 以下の場合	$\left(\frac{Z_b}{H}\right)^{2\alpha}$
	Z が Z_b を超える場合	$\left(\frac{Z}{H}\right)^{2\alpha}$
この表において、 Z_b 及び α は、それぞれ次の数値を表すものとする。 Z_b 第 1 第 2 項の表に規定する Z_b の数値 α 第 1 第 2 項の表に規定する α の数値		

- a B と H の2倍の数値のうちいずれか小さな数値（単位 メートル）
- h 建築物の軒の高さ（単位 メートル）
- f 建築物の高さと軒の高さとの差（単位 メートル）
- θ 屋根面が水平面となす角度（単位 度）
- ϕ 充実率（風を受ける部分の最外縁により囲まれる面積に対する見付面積の割合）

Z_b 、 Z_G 及び α 地表面粗度区分に応じて次の表に掲げる数値

地表面粗度区分		Z_b (単位 メートル)	Z_G (単位 メートル)	α
I	都市計画区域外にあって、極めて平坦で障害物がないものとして特定行政庁が規則で定める区域	5	250	0.10
II	都市計画区域外にあって地表面粗度区分 I の区域以外の区域（建築物の高さが13メートル以下の場合を除く。）又は都市計画区域内にあって地表面粗度区分IVの区域以外の区域のうち、海岸線又は湖岸線（対岸までの距離が1,500メートル以上のものに限る。以下同じ。）までの距離が500メートル以内の地域（ただし、建築物の高さが13メートル以下である場合又は当該海岸線若しくは湖岸線からの距離が200メートルを超え、かつ、建築物の高さが31メートル以下である場合を除く。）	5	350	0.15
III	地表面粗度区分 I、II 又はIV以外の区域	5	450	0.20
IV	都市計画区域内にあって、都市化が極めて著しいものとして特定行政庁が規則で定める区域	10	550	0.27

H 建築物の高さと軒の高さとの平均（単位 メートル）

別添 2 再処理施設における BRL 式の適用性に係る説明

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 09 R4
提出年月日	令和 3 年 6 月 2 日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護対策設備の強度計算に関する

B R L 式に適用する等価直径について

(再処理施設)

目 次

1. 概要	1
2. 防護板に対する貫通評価式（BRL式）に適用する等価直径について	1
3. 等価直径（D）の入力方法に関する最新の知見について	2
3.1 円形衝突部の影響について	3
3.2 飛翔体質量と衝突速度の影響について	3
3.3 多角形の衝突部形状の影響について	4
4. 最新の研究報告の適用に係る考察	5
4.1 最新の研究報告について	5
4.2 設計飛来物へのBRL式の適用について	5
4.3 最新の研究報告の適用について	7
5. まとめ	8
6. 参考文献	8

1. 概要

本資料は、再処理施設の設計基準対象施設に対する後次回申請を含めた竜巻防護対策設備等の強度計算の方針について補足説明するものである。

ここでは、再処理施設の評価対象施設に対する鋼板の貫通評価にて使用するBRL式の等価直径の適用について説明する。

評価対象施設の鋼板の貫通評価については、タービンミサイル評価等で用いられているBRL式^{※1}を用いて貫通限界厚さを算出しており、評価式に含まれる等価直径(D)の考え方によって、貫通限界厚さは変動する。先行発電炉では、接触面積が同等な円の直径を等価直径(D)としている。

一方、再処理施設では防護板の厚さについて、保守性を持ちながらも、耐震性の観点から合理的な厚さとするため、最新の知見を取り入れて周長と同じ円周を持つ円の直径を等価直径(D)として設定することとしている。

また、本資料は、第1回申請(令和2年12月24日申請)のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「V-別添1-3 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」
- ・再処理施設 添付書類「V-別添1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書」

※1:「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会)」の中で鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている。

2. 防護板に対する貫通評価式(BRL式)に適用する等価直径について

防護板の貫通評価は、タービンミサイル評価等で用いられているBRL式により貫通限界厚さを算出している。

〈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)

K: 鋼板の材質に関する係数

m: 飛来物の質量 (kg)

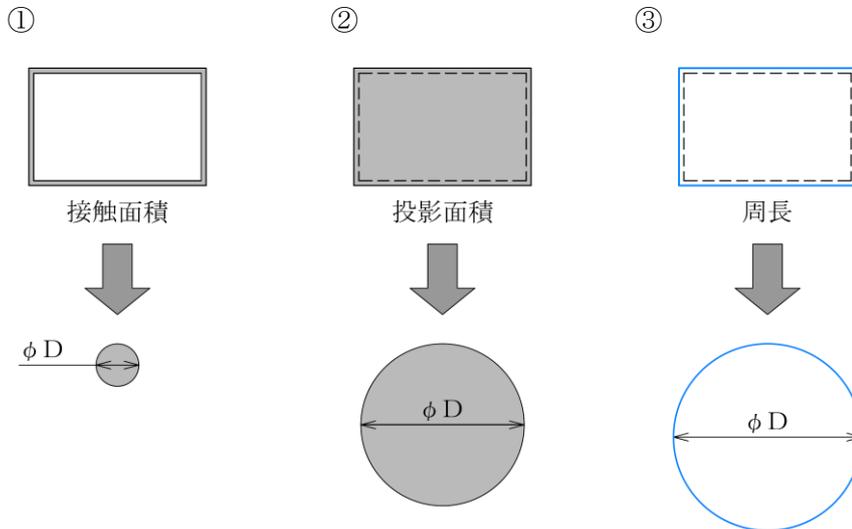
v: 飛来物の飛来速度 (m/s)

ただし、BRL式が記載されている「構造物の衝撃挙動と設計法(土木学会)」においては、この評価式の成り立ちに関する実験条件等が明確に示されておらず、衝突面が角型である飛来物を、BRL式の等価直径(D)に入力する方法が明らかになっていない。

衝突面が角型の飛来物を、BRL式の等価直径(D)に入力する方法として、以下の3つが挙げられる。第1図に等価直径(D)の入力方法イメージを示す。

- ① 衝突部の接触面積と等価な面積の円の直径

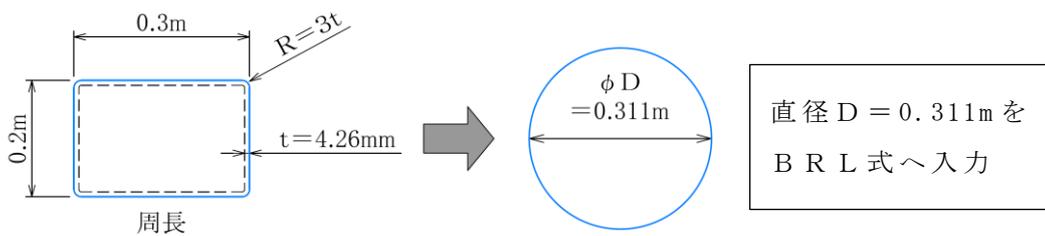
- ②衝突部の投影面積と等価な面積の円の直径
- ③衝突部の周長と等価な周長の円の直径



第 1 図 等価直径 (D) の入力方法イメージ

等価直径 (D) の入力方法が明らかになっていないため、先行発電炉では「①衝突部の接触面積と等価な面積の円の直径」を等価直径 (D) として入力しているのに対し、再処理施設では次項で示す最新知見を用いて「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径 (D) として入力している。

再処理施設における B R L 式の等価直径(D)の考え方を第 2 図に示す。



第 2 図 等価直径 (D) の考え方

3. 等価直径 (D) の入力方法に関する最新の知見について

2019年度電力中央研究所の研究報告 (参考文献 (1)) (以下、「最新の研究報告」という。) では、飛来物の衝突パラメータ (接触面積, 質量, 衝突速度, 形状) を考慮した B R L 式への等価直径 (D) の入力方法, 耐貫通性能に及ぼす影響及び B R L 式の適用性について実験結果から評価している。

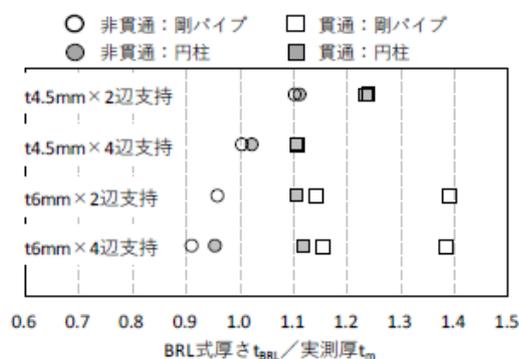
3.1 円形衝突部の影響について

最新の研究報告では、外径が等価で接触面積が異なる剛パイプと円柱を鋼板に衝突させる試験を実施している（第3図参照）。衝突部の外径は50mmである。

第4図に示す試験結果に有意な差が見られないことから、衝突時の接触面積による耐貫通性能への影響は小さいと結論付けている。すなわち、耐貫通性能への影響は外径に依存すると考えられるため、等価直径の設定において「①衝突部の接触面積と等価な面積の円の直径」を等価直径とすることにより得られる評価結果には非常に大きな保守性が含まれているものと言える。



第3図 飛翔体の衝突部形状（参考文献(1)より）



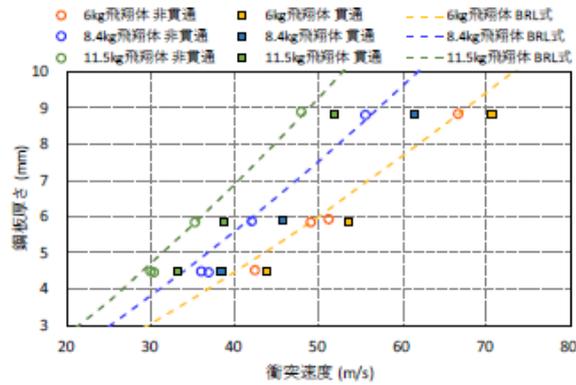
第4図 円形衝突部の試験結果（参考文献(1)より）

3.2 飛翔体質量と衝突速度の影響について

最新の研究報告では、円柱に対し、質量と衝突速度を変化させた貫通試験を実施している。質量は6kg, 8.4kg, 11.5kgの3種類としている。

試験結果を第5図に示す。BRL式による評価は、ある衝突速度に対する鋼板の貫通限界厚さを表しているのと同時に、ある鋼板厚さに対する貫通限界衝突速度を表している。試験結果によると、貫通が生じた試験ケースはいずれの飛翔体質量においてもBRL式により求めた貫通限界厚さを下回る右側の領域（すなわち、貫通限界衝突速度よりも速度が大きい領域）

でのみ観察されており，BRL式は飛翔体質量及び衝突速度によらず，試験結果を保守的に評価していると結論付けている。

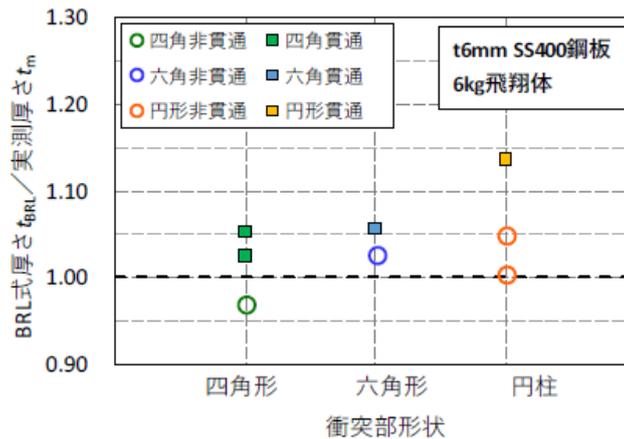


第5図 試験結果とBRL式の比較（参考文献(1)より）

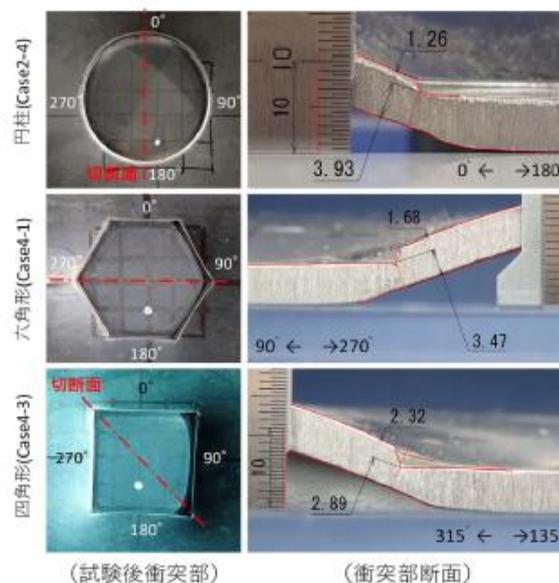
3.3 多角形の衝突部形状の影響について

最新の研究報告では，3.1に示した接触面積が貫通性能に与える影響は小さいとの結果を踏まえ，円形衝突部と周長を同一とする四角形，六角形衝突部による貫通試験を実施することにより多角形の衝突部形状の影響について確認している。

第6図に，多角形衝突部による試験結果を示す。また，第7図に多角形衝突部の試験後断面を示す。この結果，多角形の場合は円形に比べて試験後断面から過酷な衝突条件になることがわかるものの，BRL式へ入力する等価直径（D）を「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」とすることで，多角形衝突部の耐貫通性能についても保守的に評価可能であると結論付けている。



第6図 多角形衝突部による貫通試験結果（参考文献(1)より）



第 7 図 多角形衝突部の試験後断面（参考文献(1)より）

4. 最新の研究報告の適用に係る考察

4.1 最新の研究報告について

3.2より、剛飛来物の質量及び衝突速度を変化させた場合においても、試験結果に有意な差はなく、 B R L 式による評価は実現象よりも保守的に評価できることが分かった。また、3.3より、剛飛来物の形状が多角形（四角形、六角形）の場合であっても、その周長が等価な円の直径を等価直径(D)として入力することにより、鋼板の貫通限界厚さ(又は貫通限界衝突速度)を保守的に評価可能であることが分かった。

以上のことが実験的に確認された飛来物に比べ、設計飛来物の質量及び寸法はいずれも異なるため、最新の研究報告の適用の妥当性について4.2及び4.3に示す。

4.2 設計飛来物への B R L 式の適用について

2015年度電力中央研究所の研究報告（参考文献（2））（以下、「従来の研究報告」という。）では、設計飛来物と等価な断面形状（250×250mm（設計飛来物は200×300mm））及び質量を大きくすることにより同等以上の運動エネルギー（182～186kJ（設計飛来物は176kJ））を有する飛来物による衝突試験を実施している。竜巻影響評価ガイドに例示される設計飛来物の質量（135kg）及び寸法（200×300×4200mm）から、その板厚は4.26mmと算出できるが、本試験では設計飛来物より厚い板厚（4.5mm）の飛来物による試験を実施し、衝突部の変形によってエネルギーの一部が吸収され、9mmの板厚で非貫通の試験結果が得られたとしている（第8図、第1表参照）。

また、BRL式はタービンミサイルや設計飛来物に対する貫通評価において使用されてきた実績があることから、BRL式は飛来物の質量の大きさに係らず適用できるといえる。したがって、BRL式は設計飛来物の質量及び寸法においても適用できる。



第8図 試験後の柔パイプ重錘の変形状況（参考文献(2)より）

第1表 設計飛来物と等価な断面形状及びエネルギーを有する試験体を用いた鋼板（SS400：板厚9mm）の貫通試験の結果（参考文献(2)より）

	設計飛来物	貫通試験 SS-5 (柔飛来物)	(参考) 貫通試験 SS-1 (剛飛来物) ※
飛来物サイズ (mm)	200×300×t4.26	250×250×t4.5	250×250×t16
衝突エネルギー (kJ)	176	182	186
衝突速度 (m/s)	51	18.3	18.3
現象時間 (sec)	-	0.0652	0.0156
貫通の有無	-	無	有

※：貫通試験SS-1（剛飛来物）は、衝突断面の周長が設計飛来物とほぼ同等ではあるものの、その板厚（16mm）を前提とした場合、質量又は奥行きが設計飛来物と異なるため、本試験結果は参考とする。

4.3 最新の研究報告の適用について

4.1より、飛来物の質量を6 kg～11.5kgの範囲で変化させた場合でも、試験結果に有意な差はなく、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を用いたBRL式で貫通限界厚さを評価できることを確認した。

さらに、4.2より、BRL式は飛来物の質量の大きさに係らず適用できることを確認した。

以上より、設計飛来物の質量及び寸法においても、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力することにより、鋼板の貫通限界厚さは評価可能であるといえる。

最新の研究報告は、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力することで貫通限界厚さを評価できることを多数の実験データから確認しているものであり、かつ、これと相反するような実験データは確認されていないことから、十分な信頼性があるものといえる。しかし、四角形衝突部の場合の貫通限界厚さ付近の実験データは十分とはいえない。したがって、最新の研究報告を設計飛来物に適用するにあたっては、実験的に非貫通の結果が確認されている値を貫通限界厚さとして採用することとする。

具体的には、実験的に非貫通の結果が確認された比率（BRL式による貫通限界厚さ／実験的に非貫通が確認された実測厚さ）を考慮する。すなわち、BRL式の算出結果を当該比率で除することによって得られる8.2mmを設計上担保する貫通限界厚さとする。

（設計飛来物を対象としたBRL式による貫通限界厚さ）÷（研究報告の実験時のBRL式による貫通限界厚さ／研究報告で実験的に非貫通が確認された実測厚さ）

$$= 7.9 \div 0.97 = 8.2$$

なお、飛来物が鋼板に対して斜めに衝突する場合、局部的に厳しい結果となることが予想されるが、飛来物が貫通するために鋼板が破断する範囲は垂直に衝突する場合よりも大きくなる。また、実際には鋼板に衝突した際の角度を維持したままではなく、回転方向の運動になることが考えられる。したがって、鋼板に対して垂直に衝突しなければ、飛来物自体が鋼板を貫通し、さらに竜巻防護対象施設へ衝突することは考えられないため、竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことはない。

5. まとめ

以上のことから、最新の研究報告の内容は、設計飛来物の質量及び寸法に対する鋼板の貫通評価においても適用できる。

最新の研究報告は、「③衝突部の周長と等価な周長の円の直径」を等価直径（D）として入力することで貫通限界厚さを評価できることを多数の実験データから確認しているものであり、かつ、これと相反するような実験データは得られていないことから、十分信頼性があるものといえる。しかし、四角形衝突部の場合の貫通限界厚さ付近の実験データは十分ではないことを踏まえ、周長が同一の円の直径を等価直径としてBRL式で評価した結果に、実験的に非貫通の結果が確認されている値を採用することとし、設計上担保する貫通限界厚さを8.2mmとする。

6. 参考文献

- (1) 電力中央研究所報告O19003：竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究-BRL式の適用性に関する基礎検討-
- (2) 電力中央研究所報告N15004：竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案

以上