

図7 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 40. 3m, T.P. 43. 3m)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



図8 泊発電所3号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T.P. 40. 3m, T.P. 43. 3m)

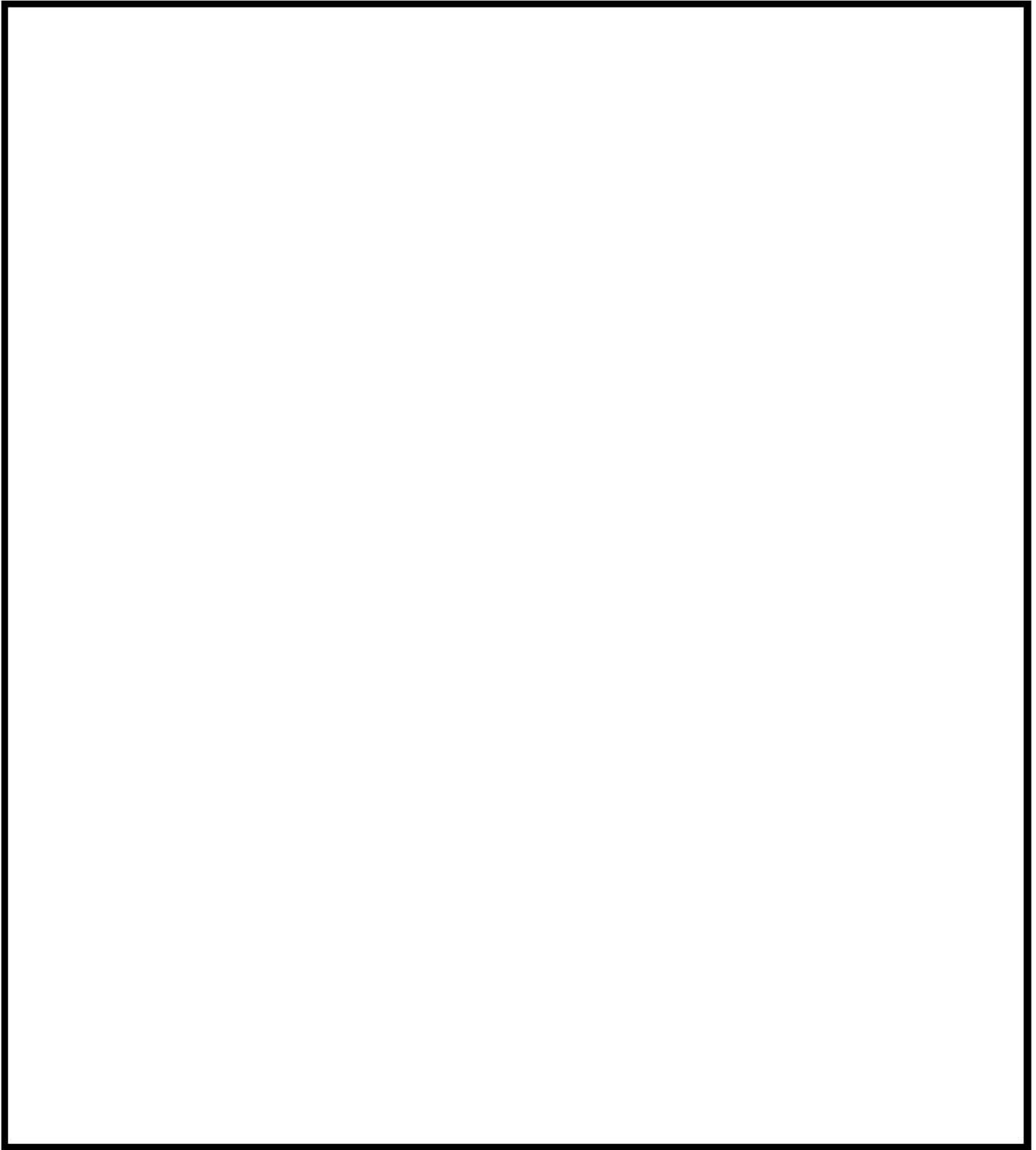


図9 泊発電所3号炉における建屋開口部 (T.P. 43.6m)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



図 1 0 泊発電所 3 号炉における建屋開口部周辺の屋内写真他 (T. P. 43. 6m)

起因事象を竜巻とした場合の排気筒の取り扱いについて

排気筒（厚さ 4mm）については、最大風速 100m/s の竜巻において飛来物により損傷するとの評価結果となっていることから、その対応について、以下のとおり整理した。

1. 排気筒の安全機能

- ・「設置許可基準規則」において、「安全機能」は次のように定義されている。

五 「安全機能」とは、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能であって、次に掲げるものをいう。

- イ その機能の喪失により発電用原子炉施設に運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、これにより公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがある機能
- ロ 発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所（以下「工場等」という。）外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能

- ・排気筒については、設計基準事故である原子炉冷却材喪失、制御棒飛び出しにおいて、格納容器等から放出される放射性物質による敷地境界での被ばくを軽減するため、排気筒を経由した高所クレジットを期待し安全解析を実施している。

このことから、排気筒の有する安全機能、つまり放射性物質の放出低減機能は「発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能」に該当することになる。

なお、設計基準事故のうち周辺環境に影響を与える事故として、原子炉冷却材喪失以外にも、放射性気体廃棄物処理施設の破損、蒸気発生器伝熱管破損並びに燃料集合体の落下が該当するが、これら事象については排気筒からの高所クレジットを期待しない地上放出にて安全解析を実施している。

- ・平常時にも排気筒からは、格納容器内の空気のページ、気体廃棄物の計画放出等を実施している。その際も排気筒からの高所放出を期待して敷地境界での被ばく評価を実施しているが、これはALARAの精神に対応するものであり、設置許可基準規則の安全機能に該当するものではない。

2. 設置許可基準第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）及び27条（放射性廃棄物の処理施設）への適合性

- ・設置許可基準規則第6条の要求は次のようになっている。

安全施設（兼用キャスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

- 2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

（解釈）

- 3 第1項に規定する「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組み合わせに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件において、その設備が有する安全機能が達成されることをいう。
- 5 第2項に規定する「大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象」とは、対象となる自然現象に対応して、最新の科学的技術的知見を踏まえて適切に予想されるものをいう。なお、過去の記録、現地調査の結果及び最新知見等を参考にして、必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させるものとする。
- 6 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは、大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。

- ・竜巻を起因として、原子炉冷却材喪失、制御棒飛び出しに発展することがないよう、1次冷却材配管、制御棒駆動装置等は、原子炉格納容器、原子炉建屋等の頑健な建屋内に施設していること、原子炉補機冷却水海水ポンプについては竜巻防護ネットにて防護していることから、竜巻を起因としてこれら設計基準事故に発展することはない。

上記の1項で述べたように、排気筒が有する安全機能は原子炉冷却材喪失、制御棒飛び出しにおける放射性物質の放出低減機能であり、竜巻を起因としてこれらの設計基準事故に発展することはないことから、竜巻影響評価においては、設計基準事故と重ならない限りにおいて排気筒に求められる安全機能要求はない。

また、設計基準事故と最大風速 100m/s（ハザード曲線から 10^{-7} /炉・年程度）の竜巻の発生頻度、飛来物が排気筒に衝突する頻度を考えた場合、設計基準事故との重ね合わせは、その可能性が小さいものと考えている。従って、竜巻影響評価においては、3項で述べる点検、補修、原子炉停止等の対応をとることにより、第6条に求めている自然事象そのものがもたらす環境条件の結果として生じ得る環境条件において、安全機能の要求はなく第6条に適合しているものと考えている。

なお、風速約 33～53m/s（ハザード曲線から 10^{-3} ～ 10^{-4} /炉・年以下）では、飛来物として想定している鋼製材、鉄パイプ、砂利において、砂利のみが 53m/s にて 9m 舞い上がるが、砂利の貫通厚さは 1mm 程度であるので厚さ 4mm の排気筒を貫通することはない。

さらに、原子炉冷却材喪失時において排気筒に期待している高所放出の安全機能について、事故の中で被ばく上最も厳しい原子炉冷却材喪失において、排気筒機能を喪失したと仮定した場合の影響評価をした結果、添付十の結果が約 0.23mSv（高所放出）であるのに対し、地上放出の場合も約 0.23mSv と同等であることから、線量めやす値である 5mSv を超えないことを確認している。

また、排気筒の機能喪失を仮定した場合の、中央制御室等における運転員の実効線量は 3 号炉で約 28mSv であり、判断のめやすの実効線量 100mSv を超えないことを確認している。

- ・設置許可基準規則第27条の要求は次のようになっている。

工場等には、次に掲げるところにより、通常運転時において放射性廃棄物（実用炉規則第二条第二項第二号に規定する放射性廃棄物をいう。以下同じ。）を処理する施設（安全施設に係るものに限る。以下この条において同じ。）を設けなければならない。

- 一 周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の濃度を十分に低減できるよう、発電用原子炉施設において発生する放射性廃棄物を処理する能力を有するものとする。

（解釈）

- 1 第1号に規定する「放射性物質の濃度を十分に低減できる」とは、気体廃棄物処理施設にあつては、ろ過、貯留、減衰及び管理等により、液体廃棄物処理施設にあつてはろ過、蒸発処理、イオン交換、貯留、減衰及び管理等によること。
- 2 第1号に規定する「十分に低減できる」とは、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) の考え方の下、当該工場等として「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」（昭和50年5月13日原子力安全委員会決定）において定める線量目標値（50マイクロシーベルト／年）が達成できるものであること。
- 3 上記2の線量目標値の評価に当たっては、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」（昭和51年9月28日原子力安全委員会決定）等において定めるところによること。

- ・平常時の被ばく評価において、排気筒機能を喪失したと仮定（1年間）した場合の影響確認をした結果、添付九評価の結果約7.9 μ Svから約8.1 μ Svに増加するものの、線量めやす値である50 μ Svを超えないことを確認していることから、第27条に適合しているものと考えている。

3. 排気筒が破損した場合の運用面での対応

- ・発電所に竜巻襲来の恐れがある場合には、格納容器内の空気のパージ、気体廃棄物の計画放出等の操作を実施している場合には直ちに停止する。さらに、竜巻の襲来を確認した場合には、竜巻通過後速やかに排気筒の点検を実施する。

具体的な点検は、次の手順で実施する。

① 双眼鏡を用いて排気筒全体に塗膜の剥離状況（上塗りと下塗りでは塗装色が異なる）、凹みの確認、異音の有無を確認する。

② ①で確認した結果、異常を確認した部位を恒設点検歩廊、格納容器屋上部歩廊を用い重点的に双眼鏡による点検、異音の有無を確認する。恒設点検歩廊等から確認できにくい部分は仮設足場などを利用し点検する。

なお、双眼鏡による目視確認では直径 10mm 程度の貫通穴であれば確認は可能であると考えている。（別紙参照）

- ・目視確認により排気筒に破損が確認された場合には、排気筒内を流れる流体の圧力は 5kPa 以下であることから、貫通穴を確認した場合は、当て板とステンレステープあるいは紫外線硬化型 FRP シートとシール材による応急補修を実施する。

- ・貫通穴を確認し応急補修できない場合には、高所放出が期待できないものと判断し、保安規定・運転操作手順に従いプラントを停止させ原子炉冷却材喪失等発生の蓋然性が低いプラント運転状態（モード5まで移行）に移行させる。（定格出力から R C S 温度 93℃への移行時間約 27 時間）

なお、この間にプラント停止に伴う格納容器からのパージ等の平常時による影響を考慮した場合、敷地境界での被ばくは約 0.074 μ Sv である。

- ・さらに、竜巻襲来後の点検において損傷が確認されなかった場合にも、至近の定検において仮設足場等を設置して排気筒の細部点検を実施する。

以上、竜巻を起因として放射性物質の放出を伴う設計基準事故に発展することはないことから、設計基準事故と重ならない限りにおいて竜巻影響評価においては、排気筒に求められる安全機能要求はなく、また、点検、補修、原子炉停止等の対応をとることにより、設置許可基準第6条及び第27条にも適合しているものと考えている。

このため、万一排気筒が破損した場合は、原子炉冷却材喪失等が生じないプラント運転状態に短時間に移行することが可能であることから、容易に応急補修できない損傷を確認した場合は保安規定・運転操作手順に従いプラントを停止し、原子炉冷却材喪失等発生の蓋然性が低いプラント運転状態（モード5）に短時間に移行することで対応する。

なお、今後、竜巻発生後の排気筒の点検方法、点検結果を踏まえたプラント対応等の詳細を検討する。

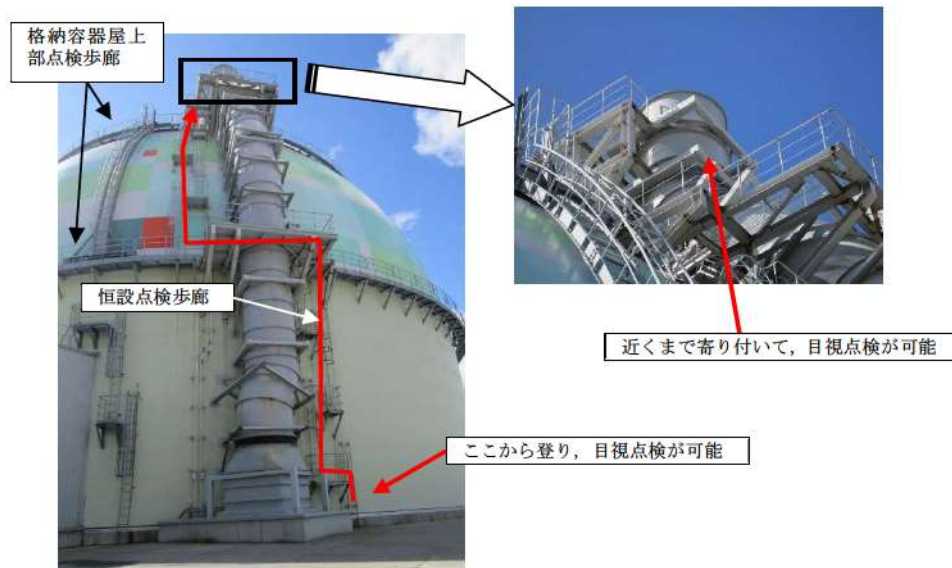
以上

別紙：排気筒の健全性確認方法

参考：地上放出時の実効線量評価

別紙：排気筒の健全性確認方法

下図のように排気筒への寄り付きは恒設点検歩廊で可能であり、また、双眼鏡での目視点検も可能である。



【参考：地上放出時の実効線量評価】

竜巻による排気筒損傷と原子炉冷却材喪失事故が重畳したと仮定した場合、本来排気筒から高所放出される気体状の放射性物質を含む内部流体は、フィルタユニット通過後、低所から放出されることになる。このため、公衆又は従業者の被ばくの増加が考えられる。

上記のような考え方を元に、公衆への影響評価として、原子炉冷却材喪失時（設計基準事故）を想定し、排気筒により高所放出されず、保守的に全量が地上放出されたとした場合の敷地境界外における実効線量の評価を実施した。

また、従事者への影響評価としては、第35回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合「資料1-1 泊発電所3号機中央制御室について」（平成25年10月22日）において排気筒による高所放出を前提とした中央制御室等の運転員の被ばくを評価していることから、保守的に全量が地上放出されたとした場合の運転員の実効線量を評価した。

公衆への影響評価での主要解析条件及び敷地境界外における実効線量の比較を、それぞれ表1及び表2に示す。

排気筒破損の影響により、地上放出として評価した結果、敷地境界外における最大の実効線量は約0.23mSvであり、判断のめやすの実効線量5mSvを超えないことを確認した。

また、従事者への影響評価での主要解析条件及び中央制御室における運転員の実効線量の比較を、それぞれ表3、表4及び表5に示す。排気筒破損の影響により、地上放出として評価した結果、中央制御室等における運転員の実効線量は約28mSvであり、判断のめやすの実効線量100mSvを超えないことを確認した。

表1 主要解析条件の比較 (1/3)

項 目	設計基準事故（原子炉冷却材喪失時） の解析条件	影響評価における解析条件
炉心熱出力	2,705MWt（定格熱出力の102%）	同 左
原子炉運転時間	最高 40,000 時間	同 左
事故後，原子炉格納容器 内に放出される核分裂生 成物の量	炉心内蓄積量の内 希ガス 1% よう素 0.5%	同 左
原子炉格納容器に放出さ れるよう素の形態	有機よう素 4% 無機よう素 96%	同 左
原子炉格納容器に放出さ れる核分裂生成物の内， 原子炉格納容器内部に沈 着する割合	希ガス 0% 有機よう素 0% 無機よう素 50%	同 左
原子炉格納容器スプレイ 水による無機よう素除去 効率	スプレイによるよう素除去に対する等 価半減期 無機よう素 50 秒 ただし，有機よう素・希ガスについて は考慮しない。	同 左
原子炉格納容器スプレイ による除去効果が有効に なる時間	事故後5分	同 左
原子炉格納容器からの漏 えい率	次式により求めた値を下回らない値 $L = \frac{C}{V} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$ L : 漏えい率 C : 定数 V : 原子炉格納容器気相部体積 ΔP : 差圧 ρ : 原子炉格納容器内気体密度	同 左
原子炉格納容器からの漏 えい割合	アニュラス部 97% アニュラス部以外 3%	同 左
アニュラス空気浄化設備 のよう素フィルタのよう 素除去効率	95%	同 左

表1 主要解析条件の比較 (2/3)

項 目	設計基準事故（原子炉冷却材喪失時）の解析条件	影響評価における解析条件
<p>アニュラス部の負圧達成までのよう素フィルタのよう素除去効率</p> <p>負圧達成後のアニュラス排気風量</p>	<p>(0～10分) アニュラス空気浄化設備を通じて全量排気筒放出 (フィルタの効果は考慮しない)</p> <p>(10分～30分) アニュラス空気浄化設備を通じてファン容量で排気筒放出 (フィルタの効果を検討する)</p> <p>(30分～30日) アニュラス空気浄化設備を通じてファン容量の35.5%で排気筒放出 (フィルタの効果を検討する)</p>	同 左
再循環系から安全補機室内への漏えい率	$4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	同 左
再循環開始時間	事故後 20 分	同 左
再循環水中の放射エネルギー	炉心内よう素蓄積量の 0.5%	同 左
再循環水体積	1,400 m^3	同 左
再循環系から安全補機室内に漏えいした再循環水中のよう素の気相への移行率	5%	同 左
安全補機室内でのよう素沈着率	50%	同 左
事故の評価期間	30 日	同 左
環境に放出された放射性物質の大気中の拡散条件	<p>1997年1月～1997年12月の気象データに基づき「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価された相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q)</p> <p>・排気筒放出 $\chi/Q : 4.3 \times 10^{-5} \text{ s}/\text{m}^3$ $D/Q : 3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy}/\text{Bq}$</p>	<p>1997年1月～1997年12月の気象データに基づき「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価された相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q)</p> <p>・地上放出 $\chi/Q : 4.5 \times 10^{-5} \text{ s}/\text{m}^3$ $D/Q : 3.1 \times 10^{-19} \text{ Gy}/\text{Bq}$</p>

表1 主要解析条件の比較 (3/3)

項 目	設計基準事故（原子炉冷却材喪失時）の解析条件	影響評価における解析条件
線量換算係数	よう素の吸入摂取に対して，小児実効線量換算係数を使用 I-131 : 1.6×10^{-7} Sv/Bq I-132 : 2.3×10^{-9} Sv/Bq I-133 : 4.1×10^{-8} Sv/Bq I-134 : 6.9×10^{-10} Sv/Bq I-135 : 8.5×10^{-9} Sv/Bq	同 左
呼吸率	小児 1 日平均の呼吸率 5.16 m ³ /d	同 左

表2 評価結果の比較

評 価 項 目		設計基準事故（原子炉冷却材喪失時）の評価結果	影 響 評 価 結 果
よう素の放出量 (I-131 等 価 量 - 小児実効線 量係数換算)	現行評価経路 (排気筒放出)	約 2.7×10^{11} Bq	—
	排気筒破損に より地上放出	—	約 2.7×10^{11} Bq
希ガスの放出量 (γ線エネルギー 0.5MeV換算)	現行評価経路 (排気筒放出)	約 6.1×10^{13} Bq	—
	排気筒破損に より地上放出	—	約 6.1×10^{13} Bq
被ばく線量 (実効線量)		約 0.23 mSv	約 0.23 mSv
上記被ばく線量のうち 直接・スカイシャイン線量		約 0.086 mSv	同 左

表3 主要解析条件の比較

項 目	中央制御室（設計基準事故）居住性評価に係る被ばく評価の解析条件	影響評価における解析条件
放出源及び放出高さ	排気筒 73.1 m	地上 0 m

表4 大気拡散条件の比較

評価対象	評価点	項目	中央制御室（設計基準事故） 居住性評価に係る被ばく評価 の相対濃度及び相対線量	影響評価における評価の 相対濃度及び相対線量
室内作業時	中央制御室中心	相対濃度 (希ガス)	$1.5 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$3.0 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対濃度 (よう素)	$1.6 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$3.3 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対線量	$1.1 \times 10^{-17} \text{ Gy/Bq}$	同 左
入退域時	出入管理建屋入口	相対濃度	$1.1 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$2.3 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対線量	$4.2 \times 10^{-18} \text{ Gy/Bq}$	同 左
	中央制御室入口	相対濃度	$1.7 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$	$3.4 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$
		相対線量	$1.3 \times 10^{-17} \text{ Gy/Bq}$	同 左

表5 中央制御室居住性に係る被ばく評価結果の比較 (mSv)

被ばく経路		中央制御室（設計基準事故） 居住性評価に係る被ばく評価結果	影 響 評 価 結 果
室内作業時	①建屋からのガンマ線による中央制御室内での被ばく	約 3.5×10^{-2}	同 左
	②大気中へ放出された放射性物質のガンマ線による中央制御室内での被ばく	約 1.7×10^{-1}	同 左
	③室内に外気から取り込まれた放射性物質による中央制御室内での被ばく	約 8.9×10^0	約 1.8×10^1
	小 計 (①+②+③)	約 9.2×10^0	約 1.8×10^1
入退域時	④建屋からのガンマ線による入退域時での被ばく	約 6.4×10^0	同 左
	⑤大気中へ放出された放射性物質による入退域時での被ばく	約 1.9×10^0	約 3.1×10^0
	小 計 (④+⑤)	約 8.3×10^0	約 9.5×10^0
合 計 (①+②+③+④+⑤)		約 18	約 28

注) 上記の被ばく経路①～⑤は、図-1に示す通り被ばく経路①～⑤に対応している。

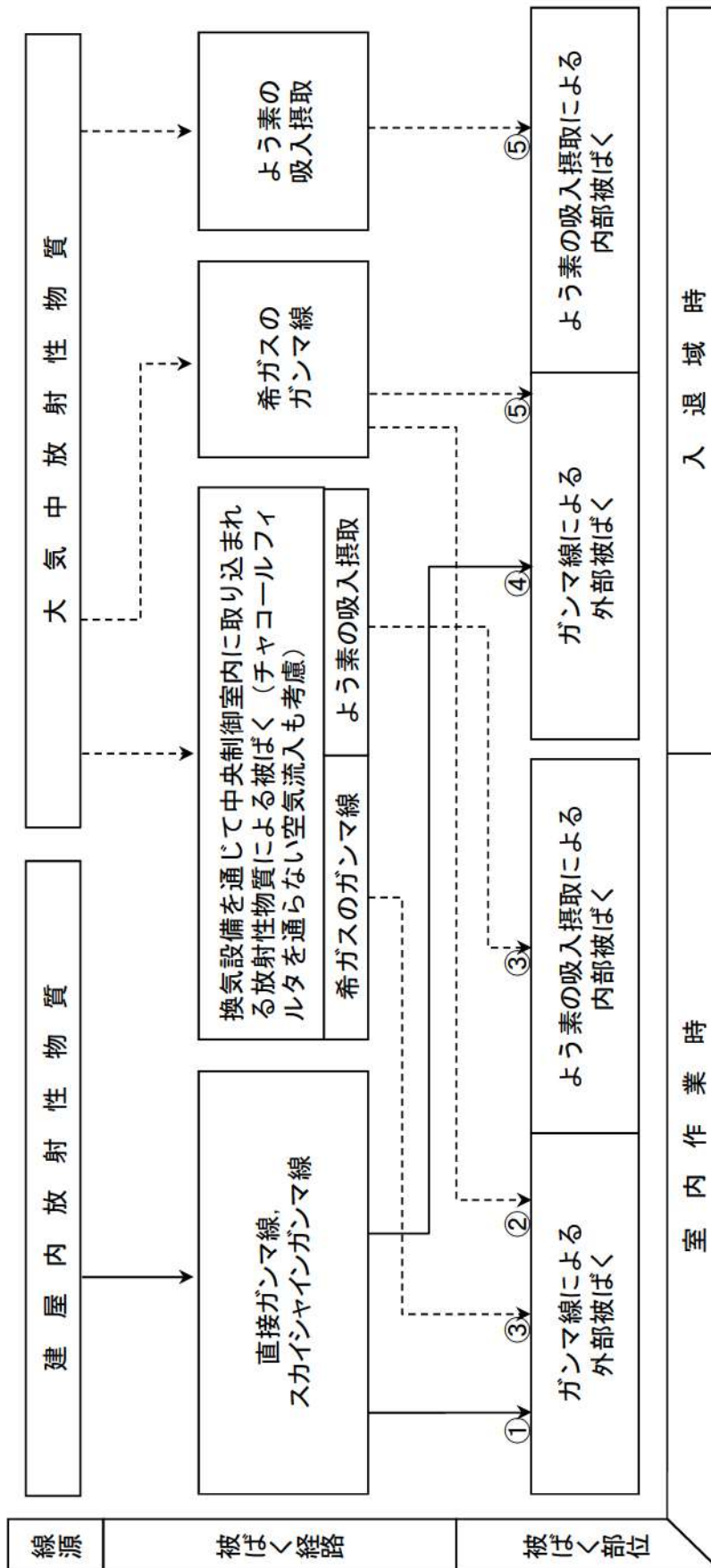


図1 事故時における中央制御室等の従事者の被ばく経路

竜巻防護ネットの構造設計について

1. 概要

設置許可基準規則第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

外部事象防護対象施設である原子炉補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ（配管、弁等を含む）（以下、「原子炉補機冷却海水ポンプ等」という。）は、想定される自然現象のうち、竜巻による設計飛来物の衝突により安全機能を損なうおそれがあることから、竜巻防護ネットによる防護対策を講じることで損傷を防止し、安全機能が損なわれない設計とする。

2. 竜巻防護ネットに対する要求事項

竜巻防護ネットは竜巻から原子炉補機冷却海水ポンプ等を防護する観点で、以下の要求事項を満足する必要がある。

(1) 竜巻防護に対する要求事項

- ・ 竜巻の風荷重や設計飛来物が衝突した際の衝撃力等に耐え、設計飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等に到達しないこと。
- ・ 設計飛来物が衝突した際に架台等が崩壊及び落下せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等を損傷させないこと。

(2) 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する要求事項

- ・ 竜巻以外の自然現象によって架台等が崩壊及び落下せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。

(3) 竜巻随件事象に対する要求事項

- ・ 竜巻随件事象として想定される事象である、火災、溢水及び外部電源喪失に対し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。
- ・ 竜巻防護ネット自体が、火災、溢水及び外部電源喪失の原因とならないこと。

3. 設計方針

3.1 竜巻防護ネットの構造

3.1.1 設置位置

竜巻防護ネットは、循環水ポンプ建屋内にある取水ピットポンプ室内の原子炉補機冷却海水ポンプエリア（以下、「海水ポンプエリア」という。）及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室ストレーナエリア（以下、「海水ストレーナエリア」という。）に設置する。

防護対象である原子炉補機冷却海水ポンプ等は、図1に示すように、ピット構造である海水ポンプエリア及び海水ストレーナエリア内の全域に及ぶことから、竜巻防護ネットはピット開口部の全面に設置する。

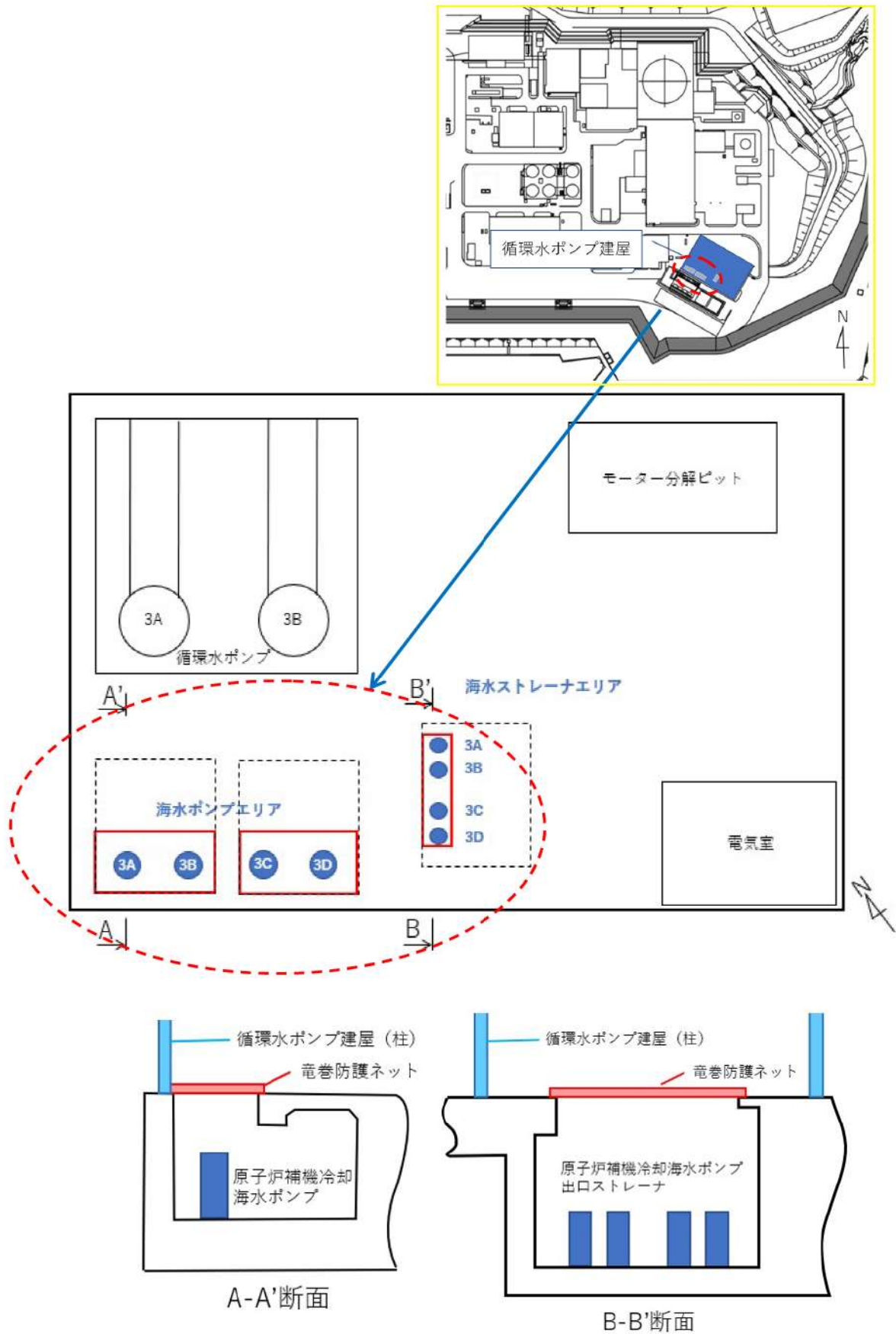


図1 海水ポンプエリア，海水ストレーナエリアの外形図

3.1.2 構造概要

竜巻防護ネットは海水ポンプエリア及び海水ストレーナエリア開口部に対し、架台に取り付けたネットを配置することで、設計飛来物の侵入を阻止し、原子炉補機冷却海水ポンプ等を防護する構造である。

ネットについては、原子炉補機冷却海水ポンプ等の設備点検時の竜巻防護ネットの取り外しの作業性及びネット1面の縦横の寸法の比は、電中研報告書にて適用性が確認されている範囲(1:1~2:1)に入る必要があることを考慮し、開口部に対して2組設置することとしており、2組のネットが接する位置に設計飛来物の鋼製材が衝突した場合は、当該部位の変形により鋼製材がすり抜ける可能性があるため、外部事象防護対象施設である原子炉補機冷却海水ポンプ等に影響を与えないよう、当該部位にすり抜け防止用鋼材(平板+アングル材)を設置する計画である。

竜巻防護ネットは主にネット(金網部)の目合いが変形し飛来物の衝突荷重によるエネルギーを吸収することで設計飛来物の侵入を阻止する構造である。

海水ストレーナエリア上部開口は海水ポンプエリア上部開口に対して面積が小さいことから、海水ポンプエリア上部と同じ目合い寸法のネットを採用した場合は、目合いの数が減少するためネットの吸収可能エネルギーも小さくなり、設計の裕度が小さくなる。

そのため、海水ストレーナエリア上部開口には、目合い寸法の小さい40mmのネットを採用し目合いの数を確保することで海水ポンプエリア上部開口に設置する竜巻防護ネットと同等の裕度を確保する計画である。

竜巻防護ネットの構造概要を図2及び図3に示す。また、竜巻防護ネットの仕様を表1に示す。なお、仕様は詳細設計により変更もあり得る。

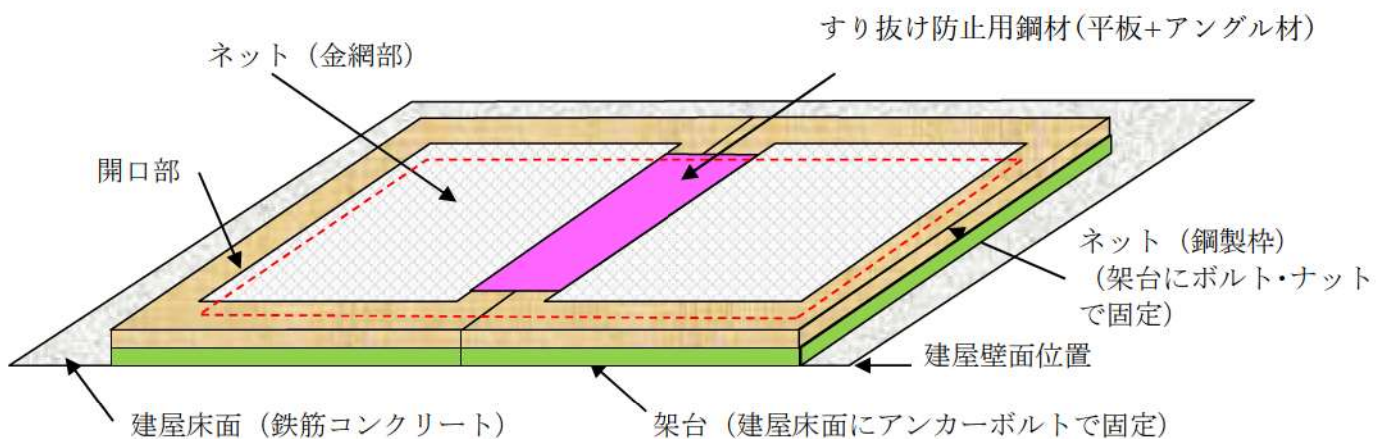
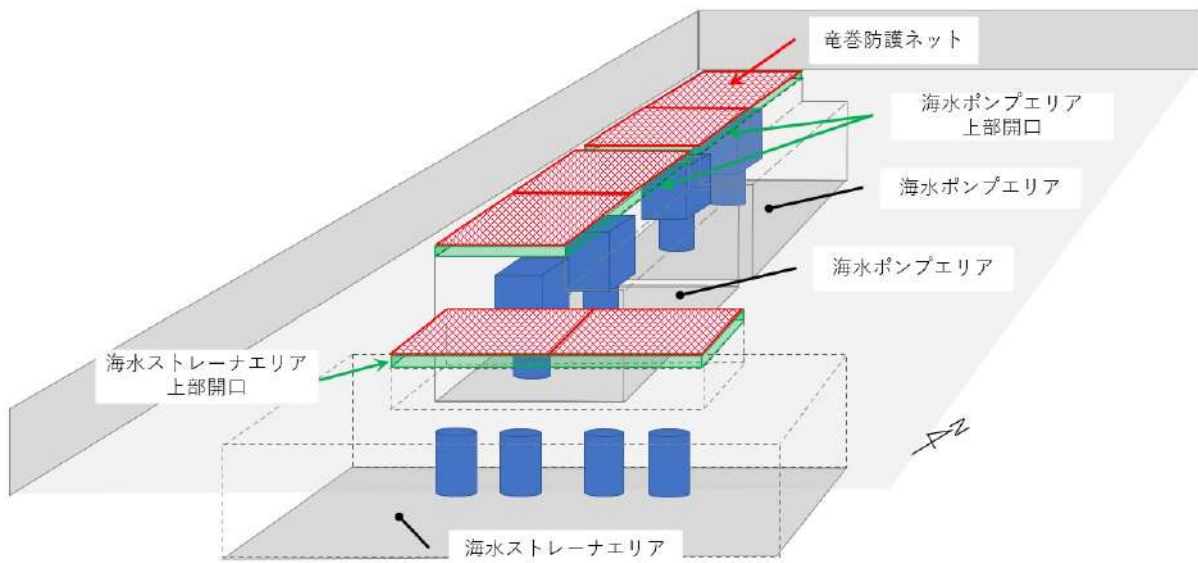
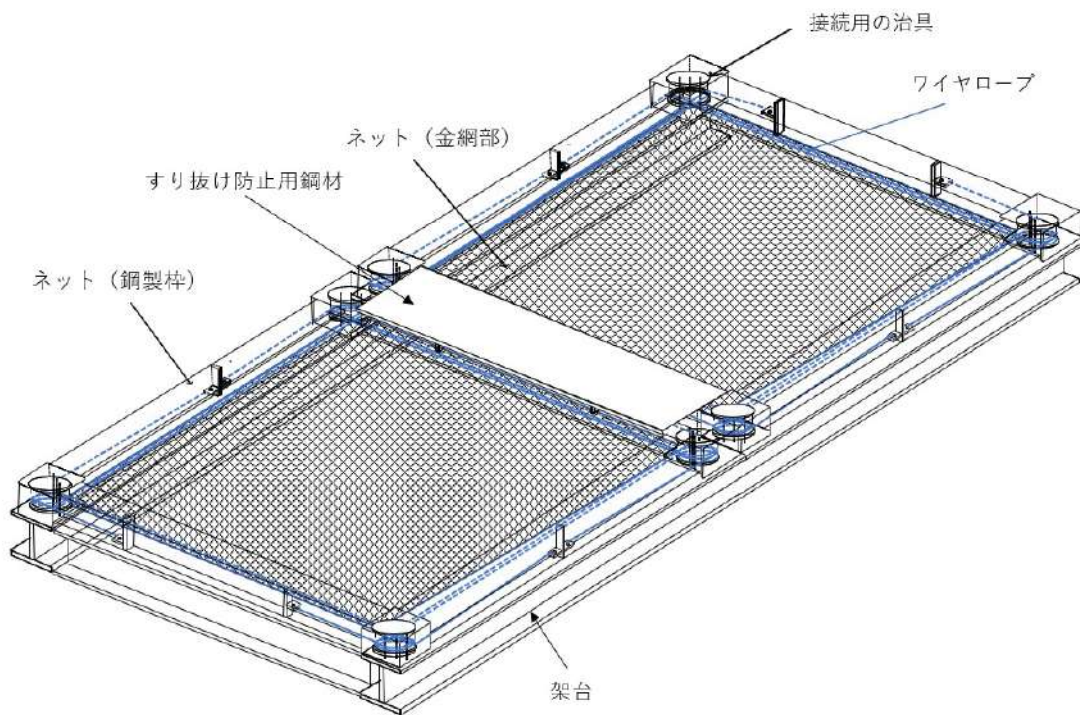


図2 海水ポンプエリア、海水ストレーナエリア開口部に設置する防護ネットのイメージ図



海水ポンプエリア，海水ストレーナエリアの竜巻防護ネット設置イメージ



竜巻防護ネットの構造イメージ

図3 竜巻防護ネットの設置イメージ図

表 1 竜巻防護ネットの仕様

海水ポンプエリア 上部	ネット (金網部)	構成	主ネット×2枚+補助ネット×1枚
		寸法	線径：φ4mm 目合い寸法：主ネット50mm，補助ネット40mm
		主要材料	硬鋼線材，亜鉛めっき鋼線
	ネット (鋼製枠)	寸法	約5.0×4.6m
		主要材料	SS400
		数量	4組
	架台	数量	2組（2開口に設置）
		寸法（高さ）	約340mm
		主要材料	SM490A，SM400A
海水ストレージエリア 上部	ネット (金網部)	構成	主ネット×2枚+補助ネット×1枚
		寸法	線径：φ4mm 目合い寸法：主ネット40mm，補助ネット40mm
		主要材料	硬鋼線材，亜鉛めっき鋼線
	ネット (鋼製枠)	寸法	約4.4m×2.6m
		主要材料	SS400
		数量	2組
	架台	数量	1組（1開口に設置）
		寸法（高さ）	約635mm
		主要材料	SM490A，SM400A
すり抜け防止用鋼材	主要材料	SM400A	
ブラケット	材料	SM490A	
耐震クラス	—	C	

3.2 設計条件

3.2.1 荷重条件

竜巻防護ネットは，設計竜巻による荷重とその他の荷重の組合せを適切に考慮した構造強度評価を実施し，各部材に発生する応力等が許容限界内にあることを確認する。構造強度評価の条件として，考慮する荷重の種類及び組合せを以下に示す。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重としては，竜巻防護ネットの自重を考慮する。

b. 運転時の状態で作用する荷重

竜巻防護ネットは動的機能を持たない構造であり，通常運転時及び設計基準事故時に作用する荷重はない。

c. 竜巻荷重

設計竜巻により作用する荷重は「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に示すとおり，「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て考慮する。複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は，以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$$

ここで、設計飛来物による衝撃荷重としては、設計飛来物が衝突する場合の荷重を設定する。なお、気圧差による荷重 (W_p) は、竜巻防護ネットの構造及び配置上考慮しない。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

設計竜巻風速 100 m/s の風圧力による荷重を考慮する。竜巻防護ネットの主たる形状は I 型断面であることから、風圧力による荷重の算出に使用する風力係数は「建築物荷重指針・同解説」の I 型断面部材を使用する。風圧力による荷重の算出にあたっては、風の方向によらず、I 型断面部材に対し最も大きい風力係数である $C=2.1$ を使用し算出する。

(b) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計竜巻の最大風速 100 m/s による設計飛来物の衝撃荷重は、砂利、鋼製パイプと比べ運動エネルギーが大きくなる鋼製材により算出する。竜巻防護ネットの形状は海水ポンプエリア上部 (約 10m×約 5.5m) 及び海水ストレーナエリア上部 (約 10m×約 2.6m) の全面に配置し、地上からの高さは約 0.7 m である。

竜巻防護ネットの配置状況を図 4 及び図 5 に示す。

竜巻防護ネットの形状、周囲の状況を踏まえて、飛来物の衝突方向は水平及び鉛直方向からの衝突を考慮する。

衝撃荷重は、鋼製材が衝突した場合の影響が大きくなる向きを考慮し、有限要素法により求める。飛来物の衝突速度を初速値として入力し、飛来物衝突評価により算出する。表 2 に設計飛来物の諸元を示す。

表 2 設計飛来物の諸元

設計飛来物	仕様		最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
	サイズ (m)	質量 (kg)		
鋼製材	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	135	57	38
鋼製パイプ	長さ×直径 2×0.05	8.4	49	33
砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.18	62	42

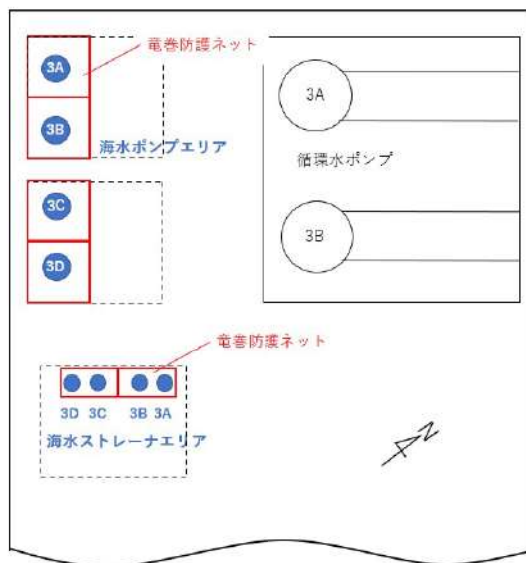


図4 竜巻防護ネットの配置（平面図）

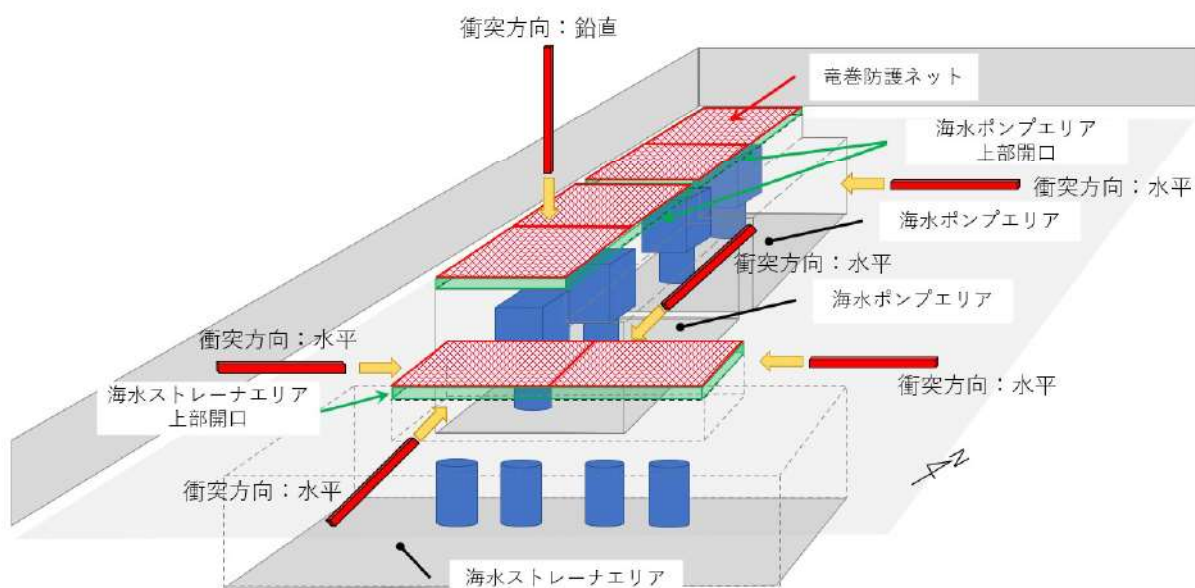


図5 竜巻防護ネットの配置（俯瞰図）

(2) 荷重の組合せ

「別添資料1 3.3.2 設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定」を踏まえ、荷重の組合せを表3に示す。

表3 竜巻防護ネットにおいて組合せを考慮する荷重

考慮する荷重				
常時作用する荷重	運転時の状態で作用する荷重	竜巻荷重		
自重		風圧力	気圧差	設計飛来物による衝撃荷重
○	—	○	—	○

○：考慮する，—：考慮不要

3.3 竜巻防護ネットの設計方針

3.3.1 竜巻防護ネットの設計方針

「2. 竜巻防護ネットに対する要求事項」を踏まえて、設置許可基準規則の各条文（第4条，第6条）に対する竜巻防護ネットの設計方針を表4のとおり整理した。

表4 竜巻防護ネットの設計方針

設置許可基準規則	竜巻防護ネットの設計方針	備考
第4条 地震による損傷の防止	上位クラスである原子炉補機冷却海水ポンプ等に対し、地震時において竜巻防護ネットの損傷等により波及的影響を及ぼさないよう、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有すること。	設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）』で説明
第6条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）	竜巻防護ネットは、竜巻時及び竜巻通過後において、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、内包する原子炉補機冷却海水ポンプ等が安全機能を損なわないよう、設計飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等に衝突することを防止可能な設計とする。また、竜巻防護ネットは、その他考えられる自然現象に対して、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。	

竜巻防護ネットは、上記設計方針及び「3.1.2 構造概要」で示した構造と、「3.2.1 荷重条件」で設定した荷重を踏まえて設計する。

竜巻防護ネットの設計フローを図6に示す。

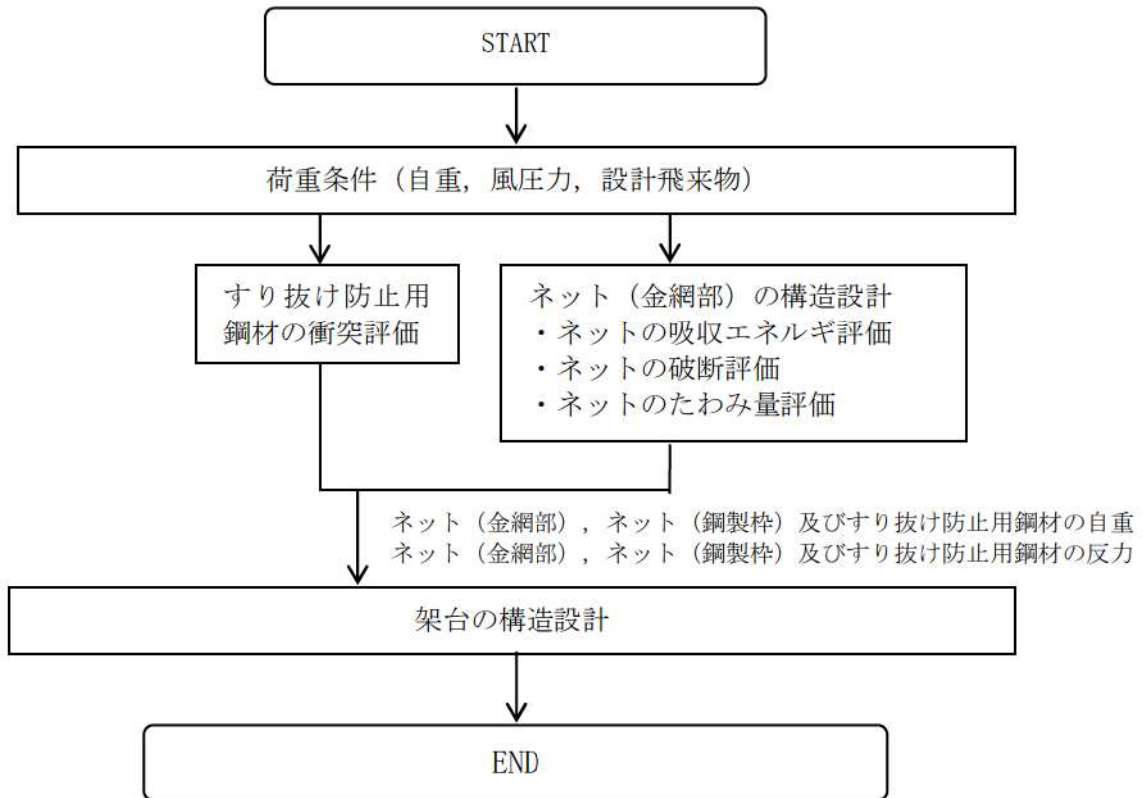


図6 竜巻防護ネットの設計フロー

3.3.2 竜巻防護ネットに対する各条文の設計方針に対応する各部位の役割

竜巻防護ネットに対する設置許可基準規則の各条文（4条及び6条）の設計方針に対する役割を表5のとおり整理した。

表5 竜巻防護ネットの各部位の役割

部位の名称		各部位の役割	
		地震 (4条)	竜巻 (6条)
	ネット (金網部)	—	設計飛来物の原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を防止する
	ネット (鋼製枠)		
	すり抜け防止用鋼材		
支持 部 材	架台	ネット (金網部) を支持する	ネット (金網部) を支持する 設計飛来物の原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を防止する
	ブラケット	架台を支持する	架台を支持する

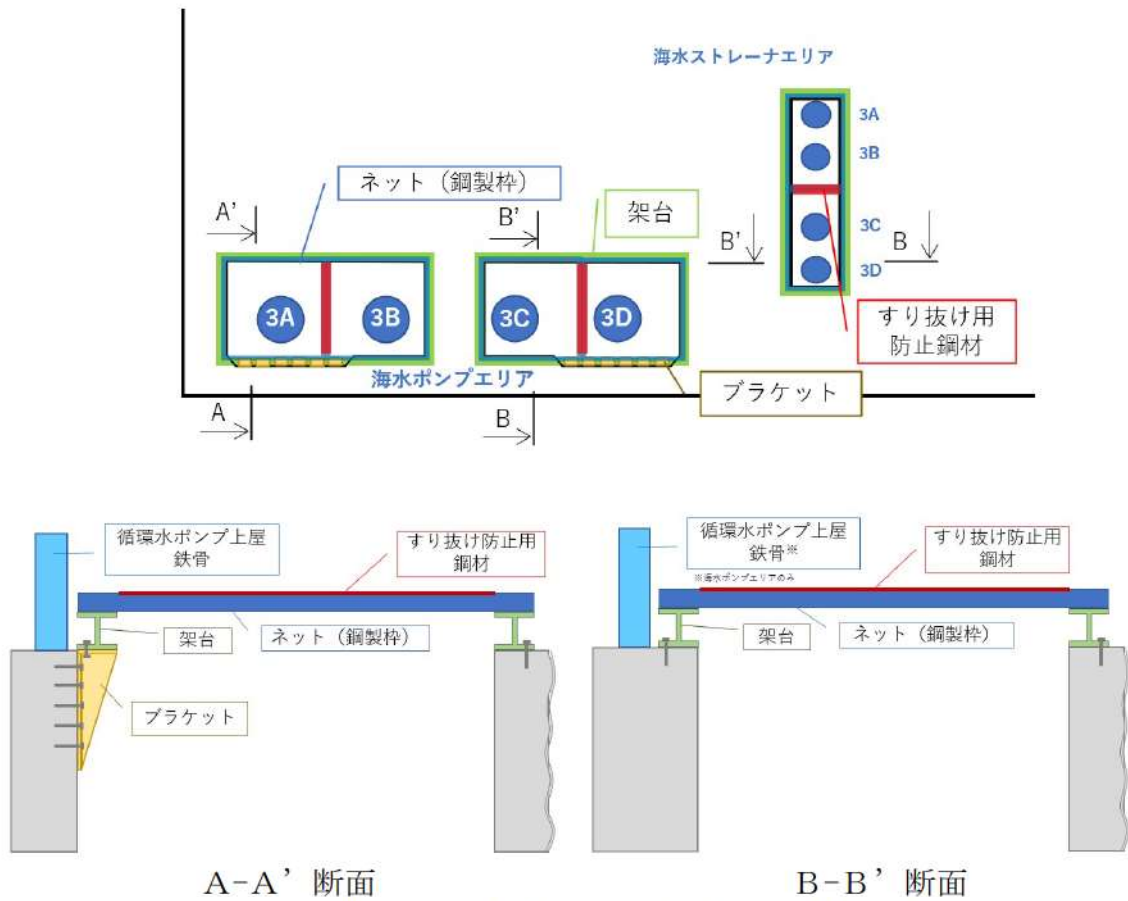


図7 竜巻防護ネットの構造 (イメージ)

3.3.3 竜巻防護ネット各部位の設計方針

各部位の役割を踏まえ、竜巻防護ネットの各部位に対する設計方針及び評価項目について表6に整理した。

表6 竜巻防護ネット各部位に対する設計方針

部位の名称		設計方針	評価項目
ネット (金網部)		金網部は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみが生じても、原子炉補機冷却海水ポンプ等の機能喪失に至る可能性がある飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等と衝突しないよう捕捉できる設計とする。	吸収エネルギー評価
			破断評価
			たわみ評価
ネット (鋼製枠)		鋼製枠は原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、ネット（金網部）及びすり抜け防止鋼材を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、設計飛来物の貫通及び脱落を生じない設計とする。	貫通評価
			支持機能評価
すり抜け防止用鋼材		鋼材は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が防護板を貫通せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えない設計とする。	貫通評価
支持部材	架台	架台は原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、ネット及びすり抜け防止鋼材を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、転倒及び脱落を生じない設計とする。	貫通評価
	ブラケット	ブラケットは架台を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、脱落を生じない設計とする。	支持機能評価

3.4 ネット（金網部）の構造設計

3.4.1 基本設計

設計飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより設計飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、原子炉補機冷却海水ポンプ等への衝突を防止する。

竜巻防護ネットの基本仕様は、電力中央研究所にて評価、試験を行い、検証されたものを適用し、防護性能の評価は以下のとおり実施する。設計の考え方については別紙1～7に示す。

設計飛来物の衝突位置の影響として、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

- ・ネットの吸収エネルギー評価
- ・ネットの破断評価
- ・ネットのたわみ量評価

電中研報告^{*1}によるネットの吸収エネルギーは表7のとおりであり、当社の設計飛来物の速度条件を包絡する。

表7 竜巻防護ネット（金網部）の吸収エネルギーと設計飛来物の衝突エネルギー

設置場所	海水ポンプエリア上部開口部		海水ストレートエリア上部開口部	
	A トレン	B トレン	海側	山側
ネット				
限界吸収エネルギー ^{*2}	324[kJ]	327[kJ]	252 [kJ]	251 [kJ]
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 38m/s)	98 [kJ]			

※1：竜巻設計飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案（電力中央研究所報告書 N13014, 平成26年3月）

※2：電力中央研究所報告書O01「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

3.4.2 構造設計

ネット（金網部）は、ひし形金網の高強度金網を使用しており、海水ポンプエリア開口部に設置するネット（金網部）は、50mm目合いの主ネット2枚と40mm目合いの補助ネット1枚を重ねて取り付ける。

海水ストレートエリア開口部に設置するネット（金網部）は、40mm目合いの主ネット2枚と40mm目合いの補助ネット1枚を重ねて取り付ける。

ネット（金網部）は、金網部の端部にワイヤロープを通すことによって支持し、ワイヤロープの端部は鋼製枠に取り付けた接続用の治具を介して、ワイヤロープ固定部に接続する。

ネット（金網部）に作用する自重や設計飛来物による衝撃荷重等の荷重は、ワ

ワイヤロープを通じて鋼製枠に伝達する。

ネットを取り付ける鋼製枠は、ピット開口部の周囲に配した架台の上に固定し、架台は床面及びブラケットに固定される。ネット（鋼製枠）の取付け概要を図 8 に示す。

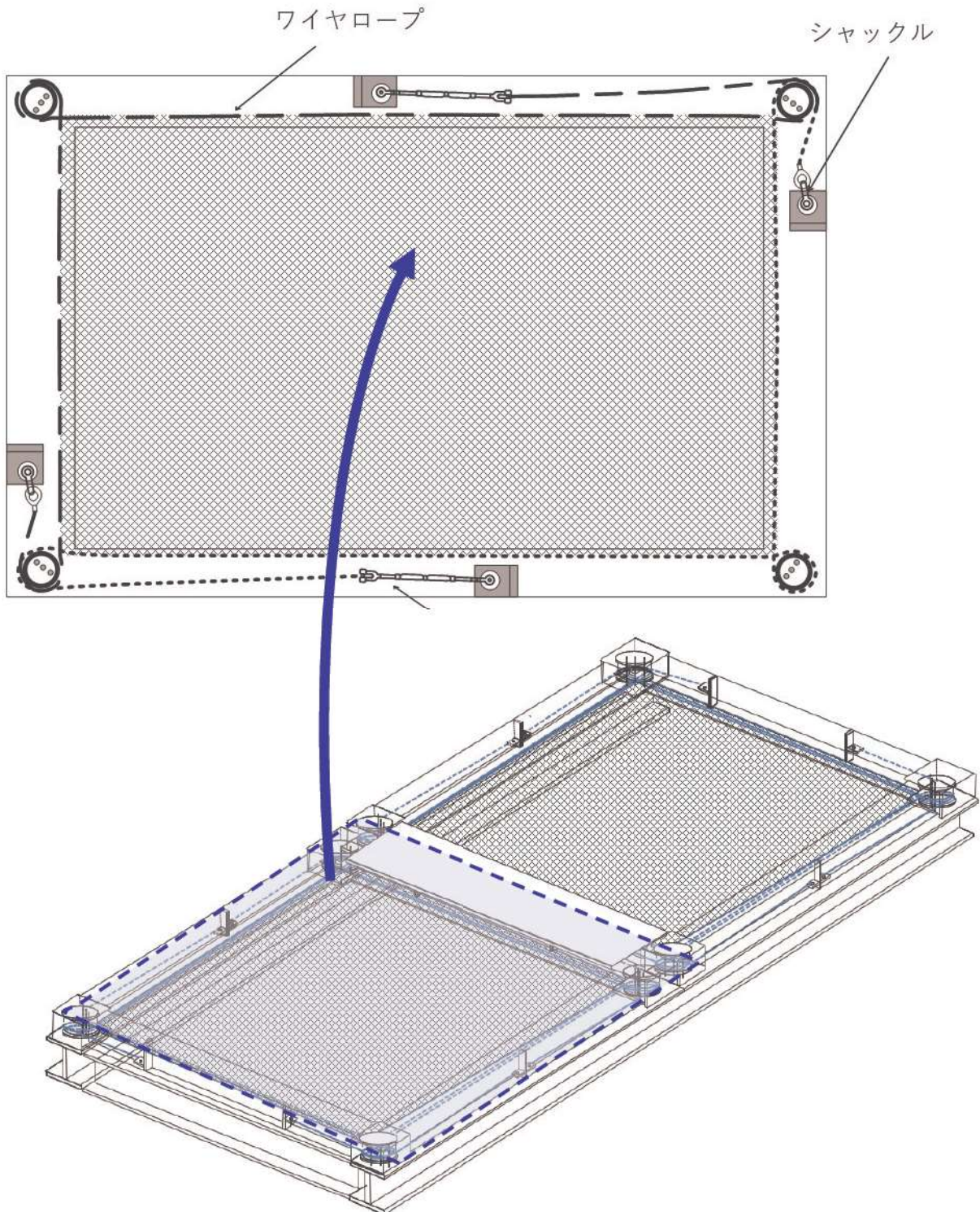


図 8 ネット（金網部）のフレーム取付け概要図

3.5 架台及びブラケットの構造設計

3.5.1 基本設計

竜巻防護ネットの架台は、設計飛来物の衝突において貫通が発生しない設計とする。

また、ネットやすり抜け防止用鋼材で受けた設計飛来物による衝撃荷重等が伝達されることから、荷重条件に対して上載するネット、すり抜け防止用鋼材を支持可能な構造強度を有する設計とする。設計飛来物の衝突位置により各部材に加わる荷重が異なることから、設計飛来物衝突位置の影響を考慮した設計を実施する。

地震に対しては、耐震Cクラスの静的地震力に耐えるとともに、基準地震動 S_s による地震力によって崩壊及び落下せず、原子炉補機冷却海水ポンプ等への波及的影響を与えない設計とする。

竜巻防護ネットのブラケットは、ネットやすり抜け防止用鋼材で受けた設計飛来物による衝撃荷重等が架台を介して伝達されることから、荷重条件に対して上載する架台を支持可能な構造強度を有する設計とする。

3.5.2 構造設計

ネット及び架台で発生した荷重は、循環水ポンプ建屋床面及びブラケットに伝達する構造とする。

ブラケット部の架台で発生した荷重は、ブラケットを介して海水ポンプエリア壁面に伝達する構造とする。

海水ポンプエリア開口部周囲の床面のうち、原子炉補機冷却海水ポンプエリアの南側の一部については、架台を設置するスペースが十分に確保できないため、海水ポンプエリア壁面にブラケットを取付け、ネット及び架台を支持する。

3.6 すり抜け防止用鋼材の構造設計

3.6.1 基本設計

竜巻防護ネットのうち、すり抜け防止用鋼材は、ネット（鋼製枠）間の隙間から設計飛来物の侵入を防ぐために、防護板を設置する。

3.6.2 構造設計

すり抜け防止用鋼材は、設計飛来物である鋼製材（縦 4.2m×横 0.3m×高さ 0.2m）が通過しない構造とする。

竜巻防護ネットの損傷モードを整理した結果を表8に示す。

表8 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (1/2)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針
ネット (金網部)	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	ネットの破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【吸収エネルギー評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、限界吸収エネルギーが作用荷重によるエネルギー以上であることを確認する（電中研報告 ^{※1} による評価）
		ネットがたわむことによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることを確認する（電中研報告 ^{※1} による評価）
ワイヤ ロープ	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	ネットがたわむことによる設計飛来物の防護対象施設への衝突	【たわみ評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、防護対象施設までの離隔距離が作用荷重によるワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量以上であることを確認する
		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】	
		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【破断評価】	ネットに設計飛来物が衝突した場合に、作用する荷重が素材の持つ破断強度以下であることを確認する
ターン バックル シヤックル 接続治具	衝撃荷重	部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないように、ネット（鋼製枠）の鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する
ネット (鋼製枠)		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	
		部材の破断による設計飛来物の防護対象施設への衝突	【貫通評価】 ひずみ量	

※1:竜巻設計飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案(電力中央研究所報告 N13014, 平成26年3月), 電力中央研究所報告書O01「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

表8 竜巻防護ネットの損傷モード整理表(2/2)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	構造強度上の評価方針
すり抜け防止用鋼材	衝撃荷重 竜巻風荷重 自重	防護板を貫通すること による設計飛来物 の防護対象施設への 衝突 架台を貫通すること による設計飛来物 の防護対象施設への衝 突 ネット(金網部)が 破断することによる	【貫通評価】 ひずみ量	衝突箇所に発生する衝撃荷重によって貫通が生じ ないように、終局状態に至るようひずみを生じな いことを確認する
			【貫通評価】 ひずみ量	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所 に発生する衝撃荷重によって貫通が生じないよう に、架台の鋼材が終局状態に至るようひずみを生 じないことを確認する
支持部材	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重	架台に設計飛来物が 衝突すること、破 断・落下し防護対象 施設に衝突	【支持機能評価】 ひずみ量	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝 撃荷重に対し、上載するネットを支持するため、架 台の鋼材が終局状態に至るようひずみを生じな いことを確認する
			【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力 引張応力	竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝 撃荷重に対し、上載するネットを支持するため、ブ ラケットの鋼材が終局状態に至るようひずみを生 じないことを確認する
ブラケット	衝撃荷重 竜巻風荷重 ネット荷重 架台荷重 自重	破断による架台の落 下		
ブラケット アンカーボ ルト				

4. 竜巻防護に対する評価方針

4.1 強度評価

4.1.1 ネット（金網部）

ネット（金網部）の強度評価は「3.2.1 荷重条件」で設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してネットは、設計飛来物を捕捉し原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突させないために、破断が生じない強度を有すること及びたわみが生じても、設計飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等と衝突しないよう原子炉補機冷却海水ポンプ等との離隔が確保できることを確認する。

破断が生じないことの確認として、ネットが設計飛来物のエネルギーを吸収できること及び設計飛来物の衝突箇所において、ネットの破断が生じない強度を有することを評価する。また、防護ネットが設計飛来物を捕捉可能であることを確認するために、設計荷重に対してネットを支持するワイヤロープ、ターンバックル、シャックル及び接続用の治具に破断が生じない強度を有することを評価する。

設計飛来物の衝突位置の影響として、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

(2) 評価対象部位

ネット（金網部）の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

① ネット

ネットには設計竜巻荷重が直接作用するため、評価対象部位とする。

② ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

ネットに作用した荷重は、ワイヤロープを介してターンバックル及びシャックルに作用するため、ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックルを評価対象部位とする。

③ 接続用の治具

接続用の治具及びワイヤロープ固定部には、ワイヤロープを介して伝達された荷重が作用するため、接続用の治具である隅角部固定ボルト、ワイヤロープ固定部を評価対象部位とする。

図9にネット（金網部）の評価対象部位、図10に設計飛来物衝突時の荷重伝達を示す。

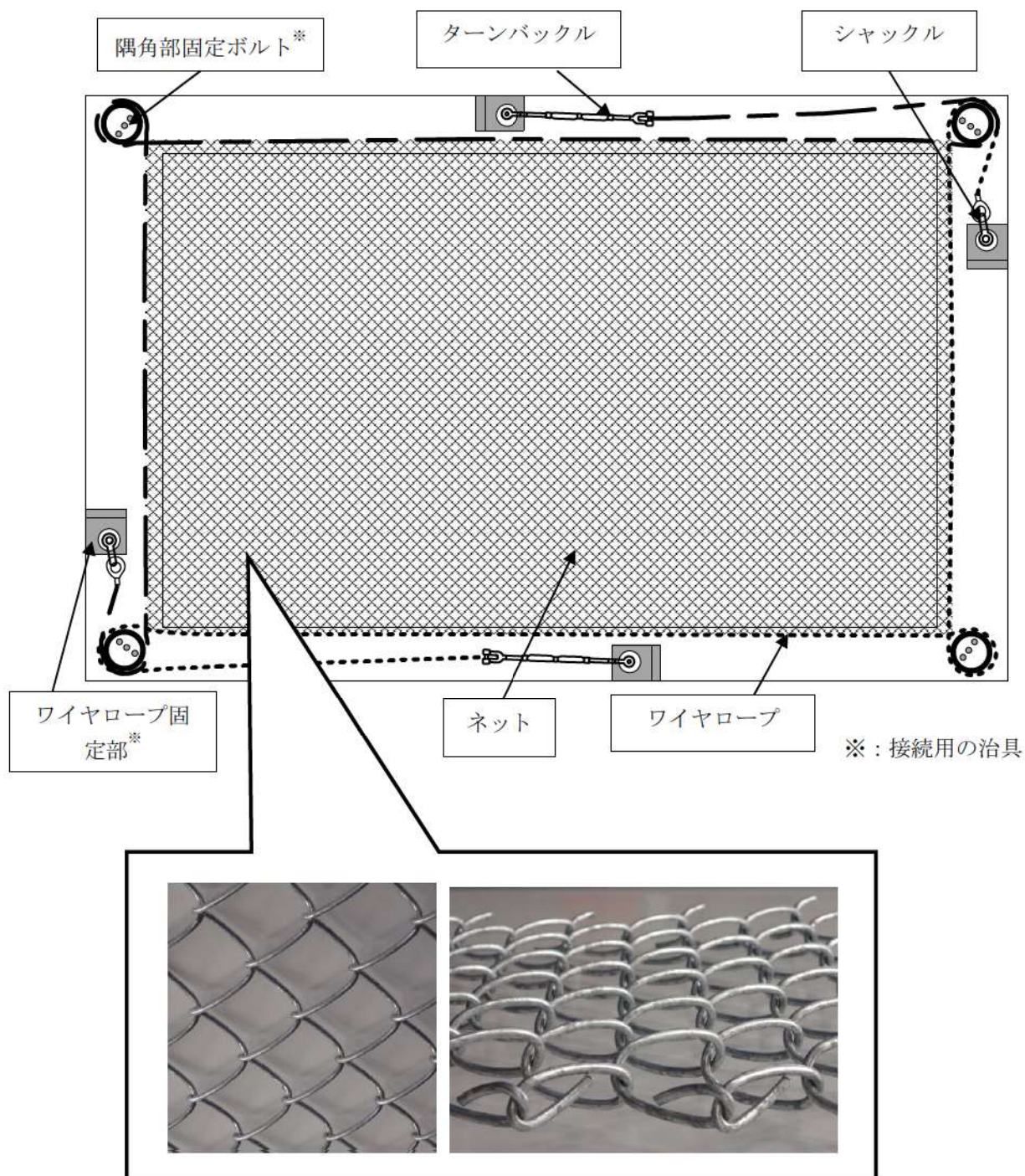
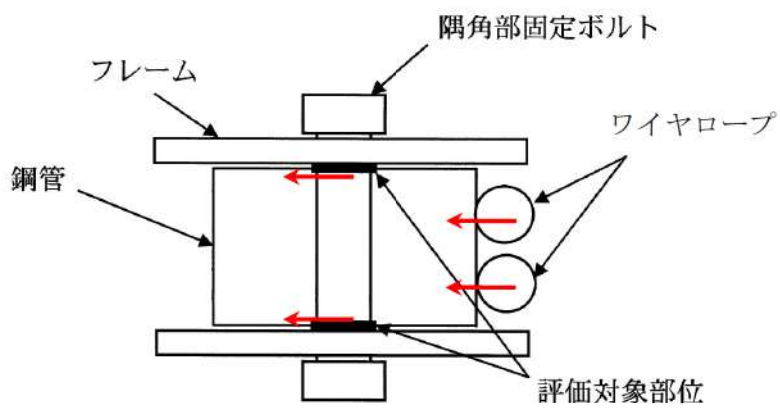
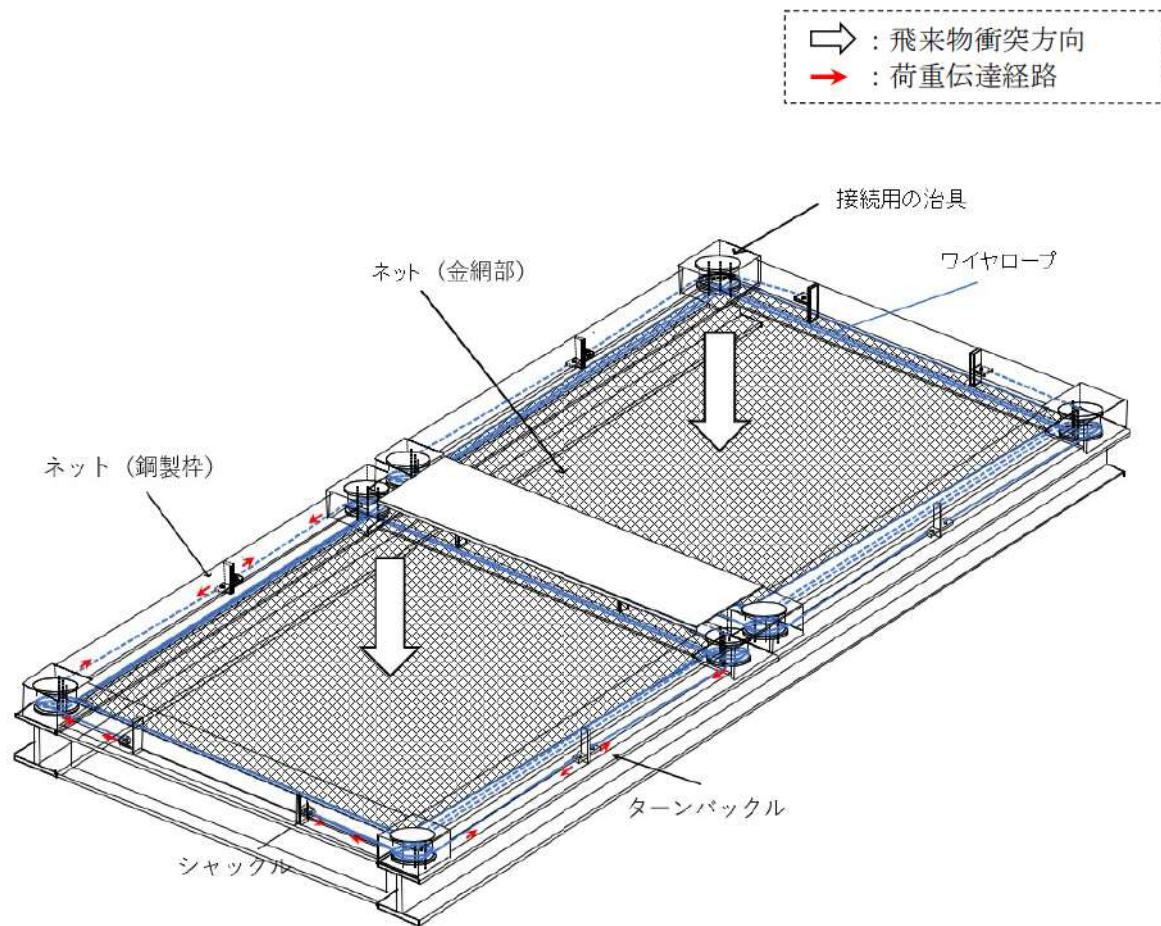


図9 ネット（金網部）の評価対象部位



接続用の治具を構成する隅角固定ボルトの荷重状態

図 10 設計飛来物衝突時の荷重伝達図（ネット（金網部））

(3) 許容限界

① 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用するエネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。

② 破断評価

ネット（金網部）の破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じない強度を有することを確認する。

ワイヤロープは、ネットと一体となって設計飛来物を捕捉するため、ネットと同様に塑性変形を許容することから、破断荷重を許容限界とする。

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、設計飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、破断しないことを確認する。

接続用の治具の破断評価は、計算により算出する応力により接続用の治具を破断しない強度を許容限界とする。

③ たわみ評価

竜巻防護ネット本体は、自重、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、計算により算出する竜巻防護ネット本体の最大たわみ量がネットと原子炉補機冷却海水ポンプ等の離隔距離未満であることを確認するため、ネットと原子炉補機冷却海水ポンプ等の最小離隔距離を許容限界として設定する。

4.1.2 ネット（鋼製棒）

ネット（鋼製棒）の強度評価は、「3.2.1 荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してネット（鋼製棒）は、設計飛来物が貫通せず原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を阻止できること（貫通評価）、また、原子炉補機冷却海水ポンプ等へ波及的影響を与えないよう落下が生じないこと（支持機能評価）を衝突解析により確認する。

評価においては、飛来物の衝突位置により各部材に発生する応力が変わることから、各部材に対し最も条件の厳しい衝突箇所を考慮し評価を実施する。

(2) 評価対象部位

ネット（鋼製棒）の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

4.1.3 架台及びブラケット

架台の強度評価は、「3.2.1 荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対して架台は、設計飛来物が貫通せず原子炉補機冷却海水ポンプ等への到達を阻止できること（貫通評価）、また、原子炉補機冷却海水ポンプ等へ波及的影響を与えないよう落下が生じないこと（支持機能評価）を衝突解析により確認する。

ブラケットは、架台で受けた荷重が伝達されるため、衝突解析によって算出した荷重によって落下が生じないこと（支持機能評価）を確認する。

評価においては、飛来物の衝突位置により各部材に発生する応力が変わることから、各部材に対し最も条件の厳しい衝突箇所を考慮し評価を実施する。

(2) 評価対象部位

支持部材の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、鋼製棒、架台、ブラケットを評価対象として選定する。

また、図11～図13に各衝突方向からの設計飛来物衝突時の荷重伝達の例を示す。

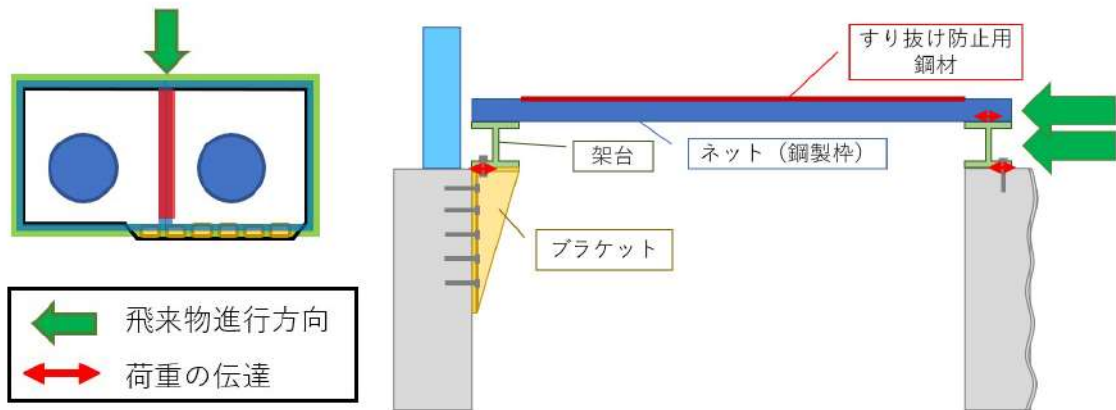


図 11 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向 (北から南) から衝突した場合)

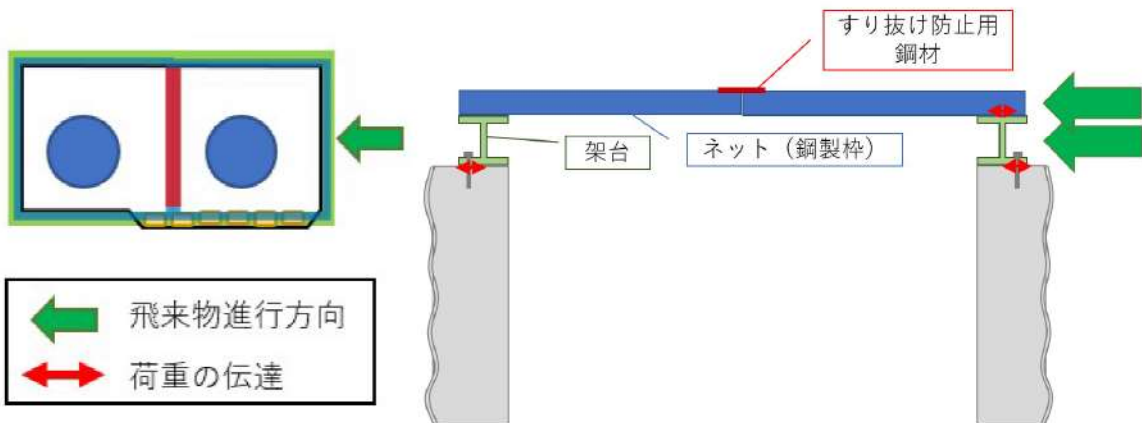


図 12 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向 (東から西) から衝突した場合)

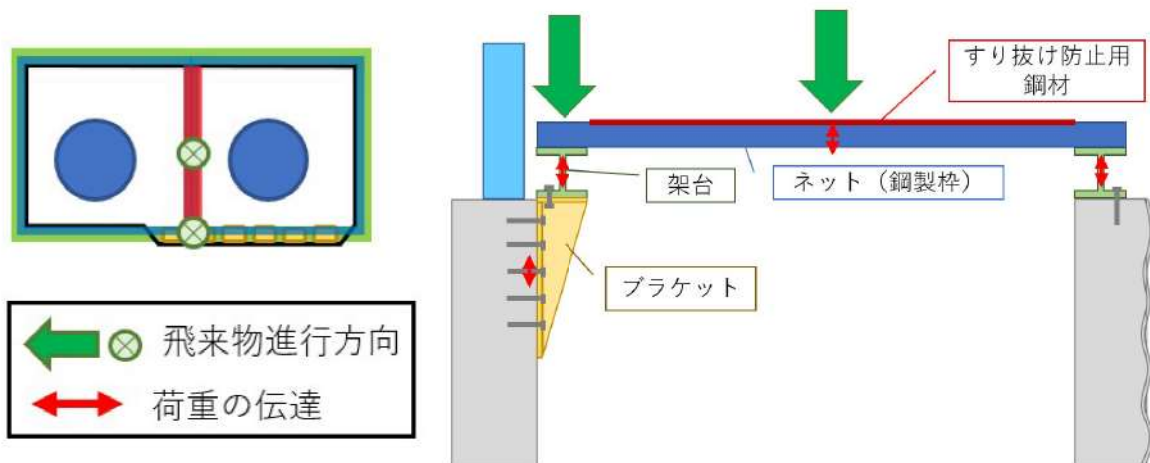


図 13 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(鉛直方向から衝突した場合)

(3) 許容限界

桥架は、評価対象部位に発生する最大ひずみが「NEI07-13」に基づく破断ひずみの範囲内であることを確認する。最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し、全断面に発生しないことにより、貫通及び落下が生じないことを確認する。

(4) 支持部材に対する性能目標と評価方針

(1) ～ (3) を踏まえ、支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針を表 9 に整理する。

表 9 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材	主な機能損傷モード		許容限界
					作用荷重	限界状態	
竜巻防護ネット (支持部材)	<p>支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が原子炉補機冷却海水ポンプ等へ衝突することを防止するため、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及びすり抜け防止鋼材を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落をしない設計とする。</p>	<p>【貫通】 設計飛来物の支持部材への衝突に対して、衝突箇所を貫通させない。</p>	<p>設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないよう、ネット(鋼製枠)の鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。</p>	ネット (鋼製枠)	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット (金網部)) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	(衝突面の) 全断面欠損	<p>破断ひずみ以下。 最大ひずみを超え、破断ひずみを超える箇所を破断箇所を確認し、全断面に発生しないこと</p>
		<p>【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。</p>	<p>竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、鋼製枠の鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。</p>	架台	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット, すり抜け防止鋼材) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する応力が JEAG 4601 の IV _{AS} 以下
				ブラケット 本体	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重 (ネット, すり抜け防止鋼材, 架台) 竜巻風荷重 衝撃荷重 		
				ブラケット アンカー ボルト			

(4) 評価結果

評価結果については詳細設計段階で整理する。

詳細設計段階で、仕様変更等の対応を行うことで、許容値を満足させる方針とする。

4.1.4 すり抜け防止用鋼材

すり抜け防止用鋼材の強度評価は、「3.2.1 荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等の評価方針について確認するものである。

(1) 評価項目

原子炉補機冷却海水ポンプ等が安全機能を損なうことのないことの確認として、設計飛来物が防護板に衝突した場合の貫通に対する評価(以下「貫通評価」という)を実施し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に到達しないことを確認する。

(2) 評価対象部位

すり抜け防止用鋼材は設計飛来物の衝突に対し、原子炉補機冷却海水ポンプ等を防護するための設備であることから評価対象部位とする。

(3) 許容限界

すり抜け防止用鋼材の貫通評価における許容限界は、破断ひずみの範囲内であることを確認する。最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し、全断面に発生しないことにより、貫通及び落下が生じないことを確認する。

5. 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する評価方針

5.1 竜巻以外の自然現象に対する評価

(1) 竜巻以外の自然現象の影響抽出

竜巻防護ネットは、竜巻以外の自然現象によって原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）の影響を表10に示す。

竜巻防護ネットを設置する取水ピットポンプ室（コンクリート壁含む）及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室（コンクリート壁含む）の竜巻防護ネットの耐震評価方針については、設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『設置許可基準規則等への適合状況について（設計基準対象施設等）第4条 地震による損傷の防止』で説明する。

表 10 竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震，津波含む）の影響

事象	確認結果	考慮の 要否
風（台風）	・建屋内に設置するため風（台風）の影響を受けない	—
凍結	・設備構造上，凍結の影響を受けない	—
降水	・構内排水施設により排水することで設備が浸水することはない	—
積雪	・建屋内に設置するため積雪の影響を受けない	—
落雷	・電気設備を持たないことから電气的影響を受けない	—
地滑り	・地滑り地形から離隔距離を確保した位置に設置するため，地滑りの影響を受けない	—
火山の影響	・建屋内に設置するため降下火砕物の荷重の影響を受けない ・腐食に対しては金属材料を用い，亜鉛メッキや外装塗装を実施していることから短期的な影響は小さい ・設備構造上，降下火砕物による閉塞・摩耗・電气的影響を受けない	—
生物学的事象	・設備構造上，生物学的事象の影響を受けない	—
森林火災	・防火帯により，森林から約 300m の離隔がある ・設備構造上，ばい煙による影響を受けない	—
地震	・地震の荷重を考慮する (第 4 条 地震による損傷の防止) 参照	○ (荷重)
津波	・基準津波は津波防護施設及び浸水防止設備により敷地内に到達することはないため，荷重・浸水の影響を受けない (第 5 条 津波による損傷の防止)	—

(2) 設計条件

竜巻以外の自然現象による波及的影響の評価の条件を以下に示す。

a. 荷重条件

(a) 地震荷重

波及的影響の評価は基準地震動 S_s による地震力に対して実施する。

b. 荷重の組合せ

荷重の組合せは「泊発電所 3 号炉外部事象の考慮について」に示す自然現象の組合せの方針に従い，以下のとおりとする。

(a) 地震荷重＋風荷重

地震と風については，ともに最大荷重の継続時間が短く，同時に発生する確率は低い。また，竜巻防護ネットは風荷重の影響が大きいと考えられるような構造や形状の施設でないため，地震荷重と風荷重との組合せは考慮しない。

6. 竜巻随件事象に対する評価

(1) 火災

竜巻随件事象として，建屋外については，発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と竜巻防護ネットの位置関係を踏まえて火災の影響を評価（「6 条（外部火災）」により評価）した上で，竜巻防護ネット

が原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

また、竜巻防護ネットは発火性、引火性のある物質を使用しないため、火災の原因とはならない。

(2) 溢水

建屋外については、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水を想定されるが、竜巻防護ネットは構造上、溢水により機能を損なわないため、溢水により竜巻防護ネットが原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。

また、竜巻防護ネットは液体を内包する構造でないため、溢水の原因とはならない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が想定されるが、竜巻防護ネットは、電源を用いておらず、外部電源喪失の影響を受けないため原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。また、竜巻防護ネットは飛来物化せず、送電網に関する施設等を損傷させることはないから、外部電源喪失の原因とならない。

7. 竜巻防護ネットの維持管理について

竜巻防護ネットは、原子炉補機冷却海水ポンプ等を竜巻による飛来物から防護する機能及び、原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を与えないための設備であることから、設置環境や部材の劣化、故障モード等を踏まえた管理基準を定め、保全計画を策定し、点検を実施することにより、適切に設備の維持管理を実施する。

原子炉補機冷却海水ポンプ等の点検時には、竜巻防護ネットの取外し、取付けを実施することから、接続部の健全性を確認して据付を実施する。

また、予備品の確保等により、部材が損傷した場合であっても、速やかに補修が行えるようにする。

8. 設置許可段階と工認段階における説明内容

設置許可段階では、竜巻防護ネットの構造成立性に係る設計方針を説明した。詳細設計段階では、設置許可断面の設計方針を踏まえて詳細設計を行い、竜巻防護ネットの強度計算結果を説明する。

竜巻防護ネットの吸収エネルギーの評価

1. 竜巻防護ネット

(1) 金網の設置方法及び吸収エネルギーの評価方針

海水ポンプ室の開口部周囲に口状に架台を設置し、その上に防護ネットを設置する。竜巻防護ネットはH形鋼等を用いたフレームに取付け、フレームへの金網の取付け部については、金網の4辺をワイヤロープで支持し、ワイヤの両端をフレームにボルトで締結する構造とする。

金網の吸収エネルギーの評価に当たっては、金網が捕捉可能な飛来物のエネルギーの最大値(限界吸収エネルギー)を算定し、飛来物や風荷重等によりネットに作用するエネルギーが限界吸収エネルギーを超えないことを確認する。

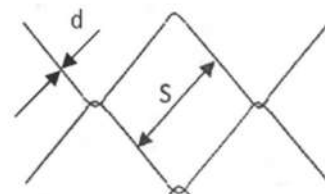
(2) 金網の諸元

H形鋼による鉄骨構造物の上面に海水ポンプエリア上部開口部には主金網として 50mm 目合の高強度金網を 2 枚重ねで設置し、補助金網として 40mm 目合の高強度金網を 1 枚重ねで設置する。

海水ストレートナエリア上部開口部には主金網として 40mm 目合の高強度金網を 2 枚重ねで設置し、補助金網として 40mm 目合の高強度金網を 1 枚重ねで設置する。

本構造により直径 50mm の鋼製パイプ及び鋼製材が竜巻飛来物防護対策設備内部に侵入することを防止する。

- ・名称：高強度金網
- ・材質：JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A)
- ・素線径 d ：4 mm
- ・素線の目合い (網目の大きさ) S ：40mm または 50mm
- ・素線の引張強さ：1400N/mm²
- ・耐火性：材料として鋼材使用により耐火性あり
- ・耐食性：亜鉛メッキ



(3) 防護対象飛来物

防護対象飛来物は、設計飛来物の内、鋼製材と鋼製パイプを想定するが、強度設計に当たっては、最もエネルギーの大きい鋼製材とする。

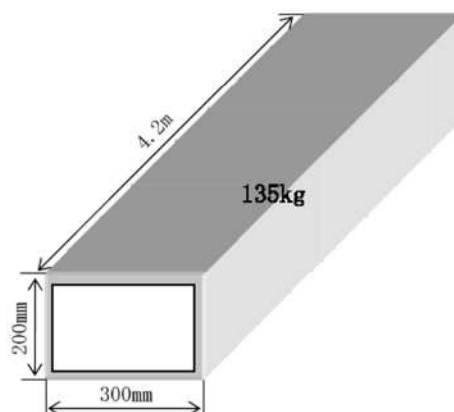
鋼製材の諸元は以下のとおり。

鋼製材

- ・飛来物形状：0.2m × 0.3m × 4.2m
- ・飛来物質量 M ：135kg
- ・衝突速度 水平速度 V_H ：57m/s
鉛直速度 V_V ：38m/s
- ・衝突エネルギー

$$\text{水平方向：} E_H = \frac{1}{2} \times M \times V^2 = 219.4 \text{ kJ}$$

$$\text{鉛直方向：} E_H = \frac{1}{2} \times M \times V^2 = 97.5 \text{ kJ}$$



(4) 金網の強度設計

a. 金網のたわみ量算定

金網の目合い寸法(S)が50mmの場合は、対角距離は71mmとなり、金網1m当たりの目合い数は14個となる。

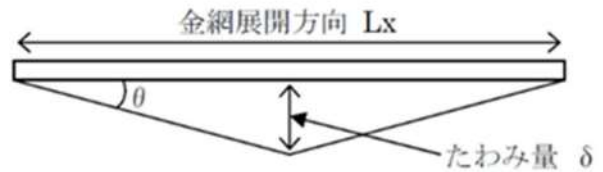
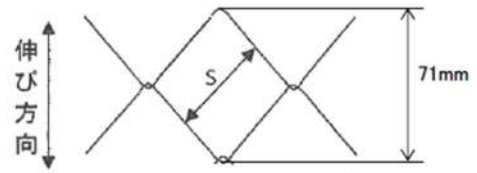
図1に示す1400N級金網の荷重試験の交点/荷重-伸び曲線より、金網の破断荷重は15kN、破断時の1目合い当たりの金網の伸び量は

20mmとなる。このとき、最大たわみ量 δ_{max} は、

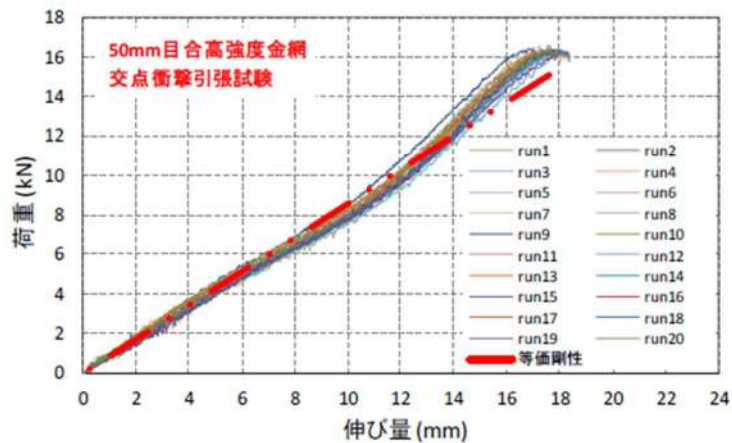
$$\delta_{max} = \frac{Lx}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1}\left(\frac{71}{71+20}\right) = 38.8 \text{ deg}$$

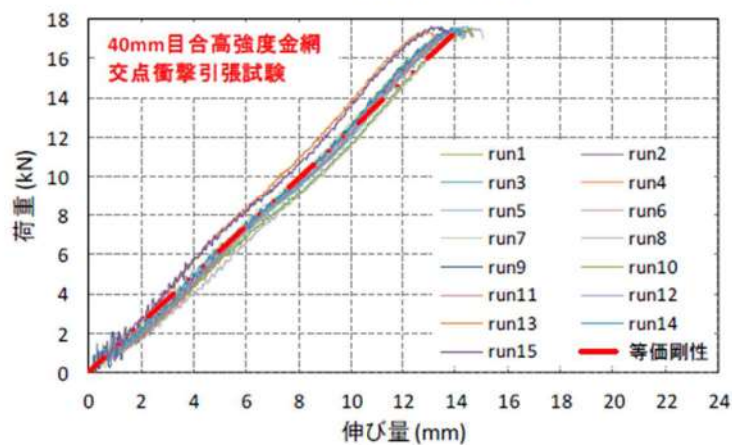
で求められる。



b. 金網の吸収エネルギーの検討



(50mm 目合金網)



(40mm 目合金網)

電中研における引張試験のうち有効な試験となった試験結果の平均値で設定。

図1 金網の荷重-伸び曲線

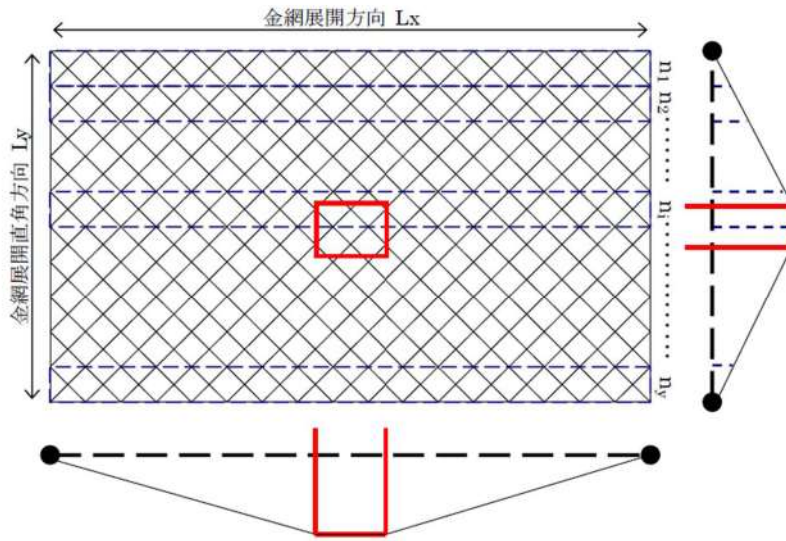


図2 金網の評価モデル

図2に示すように、金網を展開直角方向に1目合いごと [] に で囲った形に帯状に分割し、n1 から ny までの各列が分担するエネルギーを、各列のたわみ量から算定し、それらを積算することにより金網の吸収するエネルギーを評価する。

各列の吸収するエネルギーは、図1の荷重-伸び曲線から、50mm目合いの金網は1目合い毎に等価剛性 858kN/m、40mm目合いの金網は1目合い毎に等価剛性 1239kN/m を持つばねを $N_x(L_x/71\text{mm})$ 個直列につなげた状態と模擬できる。

このとき50mm目合いネット1つの列の剛性(金網展開剛性 K_x)は、
 金網展開剛性 $K_x = 858/N_x$

となる。I番目の列における張力 P_i は、

$$P_i = 2K_x \cdot \left(\frac{X_i}{2}\right) = K_x \cdot X_i$$

となり、従って作用力 F_i は、

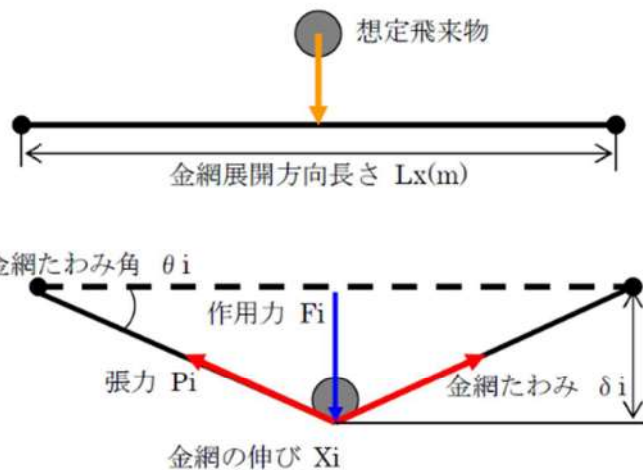
$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot X_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot X_i \cdot (\tan(\theta_i) - \sin(\theta_i)) \\ &= 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}}\right) \end{aligned}$$

となる。

i番目の列における吸収エネルギー E_i は、

$$\begin{aligned} E_i &= \int F_i d\delta_i = \int 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}}\right) d\delta \\ &= 2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x\right) \end{aligned}$$

となり、限界吸収エネルギー E は、各列の吸収エネルギー E_i を第1列から第 n_y 列まで積算することにより求められる。



$$E = \sum_{i=1}^{n_y} E_i$$

金網は2枚重ねで使用する事から、2枚重ねの金網により吸収できるエネルギーは上記を2倍したものとなる。また、防護対象物と金網の離隔距離を金網の最大たわみ量以上確保することにより、金網と防護対象物との接触を防止する。

c. 風による影響の検討

竜巻襲来時には、竜巻防護ネットも風圧力の影響を受けた状態で飛来物を受け止める必要がある。そのため、風速 V_D (=100m/s) の風圧力により防護ネットが受ける影響を以下のとおり評価する。

金網の吸収エネルギーの評価と同様に、金網を展開直角方向に1目合い毎に帯状に分割し、その1つの列に作用する風圧力を考える。分割された1列における金網の素線の投影面積 A は、素線径 d : mm, 素線の目合い(網目の大きさ) S : 50mm であることから、分割された1列に作用する風圧力 P_D は、次の式で求められる。

$$P_D = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2\right) \cdot G \cdot C \cdot A = 62.12Lx \text{ [N/m]}$$

空気密度 $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$

ガスト影響係数 $G = 1.0$

風力係数 $C = 0.9$

$$\text{投影面積 } A = \frac{4}{1000} \cdot \left(4 \cdot \frac{50}{1000}\right) \cdot \frac{1000Lx}{50\sqrt{2}}$$

この風圧力 P_D がすべて金網展開方向 Lx の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式及びネットの吸収エネルギーの式を用いて、1列あたりの風荷重によりネットが受けるエネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が風荷重により受けるエネルギーを算出する。

$$F = P_D = 4Kx \cdot \delta \cdot \left(1 - \frac{Lx}{\sqrt{4\delta^2 + Lx^2}}\right)$$

$$E = 2Kx \cdot \delta^2 - Kx \cdot Lx \left(\sqrt{4\delta^2 + Lx^2} - Lx\right)$$

d. 金網の最大たわみ量及び限界吸収エネルギー算定結果

海水ポンプエリア上部開口部と海水ストレーナエリア上部開口部の防護対策の平面図を図3に示す。竜巻防護ネットの寸法と最大たわみ量及び限界吸収エネルギーは、以下のとおり。

表1 竜巻防護ネットのたわみ量と限界吸収エネルギー

ネット	海水ポンプエリア 上部開口部		海水ストレーナエリア上部 開口部	
	A トレン	B トレン	海側	山側
展開方向	5.02[m]	5.01[m]	4.440[m]	4.435[m]
直角方向	4.635[m]	4.635[m]	2.62[m]	2.62[m]
限界吸収エネルギー	324 [kJ]	327 [kJ]	252[kJ]	251[kJ]
自重と風荷重によるエネルギー	9.4[kJ]	9.2[kJ]	4.1[kJ]	4.1[kJ]
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 38m/s)	98 [kJ]			
作用する全エネルギー	107.4[kJ]	107.2[kJ]	102.1[kJ]	102.1[kJ]
限界たわみ量	1.88[m]	1.87[m]	1.65[m]	1.65[m]
最小離隔距離	3.5[m]	3.5[m]	4.6[m]	4.6[m]

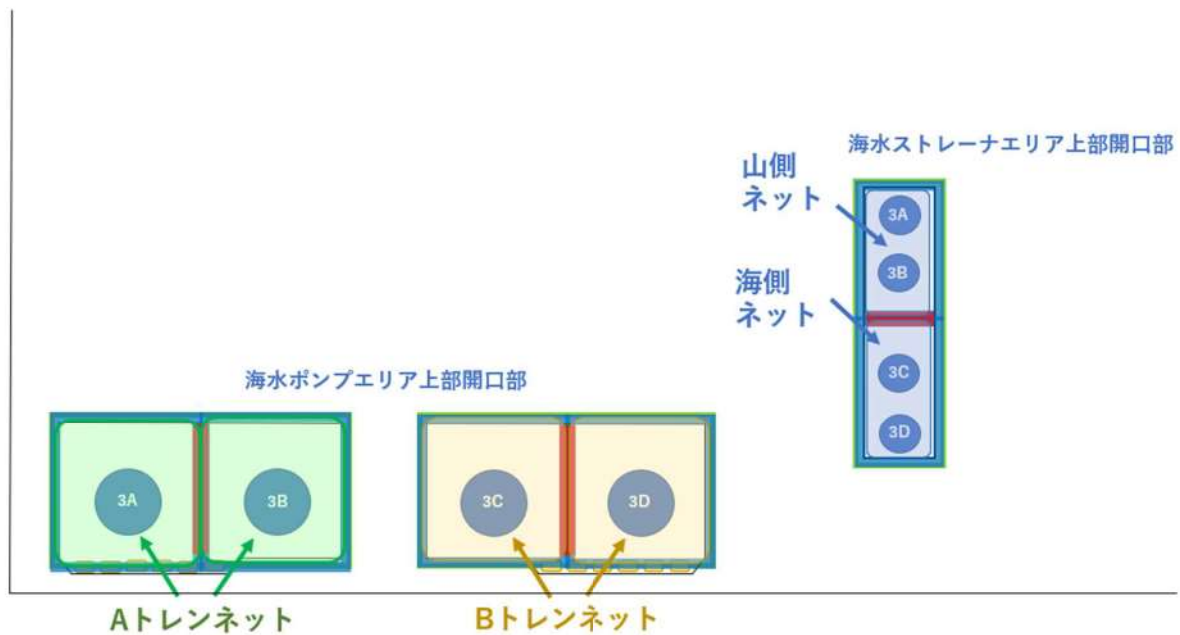


図3 竜巻防護ネット 平面図

電中研の金網強度評価試験結果

1. 試験方法

竜巻飛来物から外部事象防護対象施設を防護するためのネットに使用する金網について、図1に示す装置を用いて重錘を防護ネットに自由落下させて防護ネットの吸収エネルギーの確認を行った。

試験は1 m×1 mの金網による予備試験と、より実機形状に近い4 m×3 mの金網2枚を展開方向が直角になるように重ねた試験体による大型自由落下試験を実施した。

予備試験は、防護ネットの候補材選定も兼ねて実施し、1 m×1 mの防護ネットにおいて要求される吸収エネルギー(12kJ~13kJ)を、試験装置の最大落下高さ約40mからの自由落下で模擬するため、φ210mm、質量37.8kgの鉄球を用いて実施した。

大型自由落下試験においては、4 m×3 mの金網2枚で算定される吸収エネルギー(約250kJ)を20m程度の自由落下で模擬するため、φ500mm、質量1500kgの重錘を用いて実施した。

想定飛来物である、鋼製材、鋼製パイプが防護ネットに衝突した際には、飛来物の衝突面がネットに包み込まれ防護ネットによりエネルギーが吸収されると同時に、飛来物側もネットへの衝突の衝撃で変形しエネルギーの一部を吸収することとなるが、本試験ではネットに包み込まれる部分が球状の錘を用いて実施することにより飛来物側に変形が生じないことから、飛来物のエネルギーをすべて防護ネットで吸収させてネットの性能を確認している。

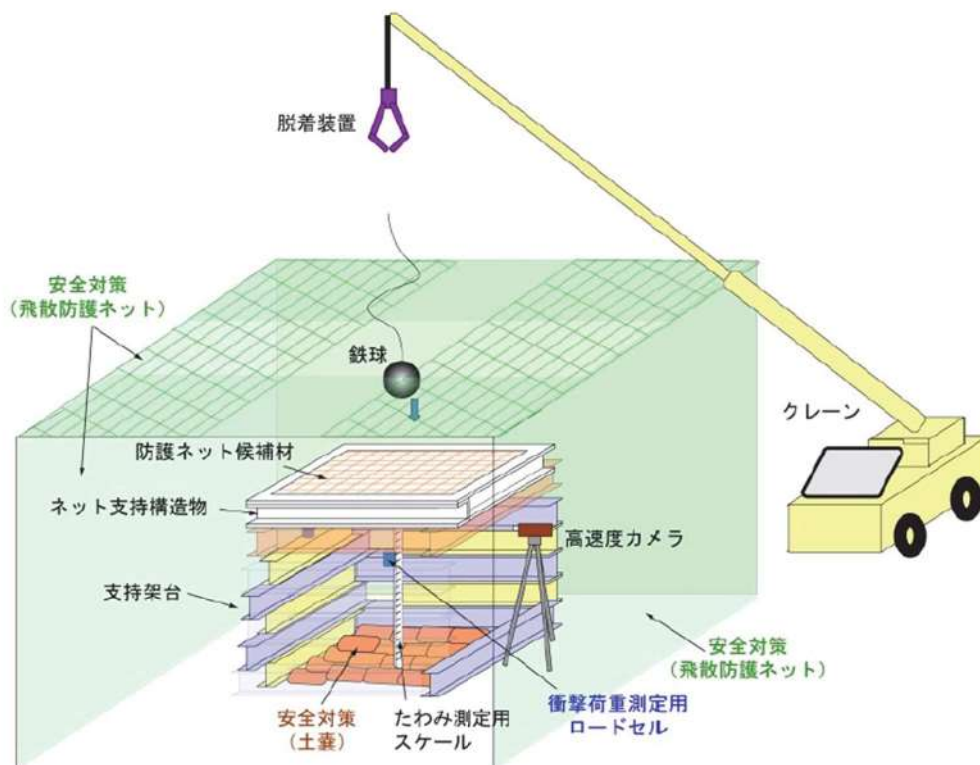


図1 自由落下試験装置

2. 予備試験条件

- ・金網緒元：名称：高強度金網
 材料：JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A)
 素線径 d : 4 mm
 素線の目合い (網目の大きさ) S : 50mm
 素線の引張強さ : 1,400N/mm²
 寸法 : 1 m × 1 m
 ワイヤ支持条件 : 固定支持 (緩衝装置なし) , 可動支持 (緩衝装置なし)
- ・重錘緒元：形状 : ϕ 210mm 鉄球
 質量 : 37.8kg
 落下高さ (エネルギー) : 21m (7.8kJ) ~ 41m (15.2kJ)

3. 予備試験結果及び吸収エネルギー評価式との比較

予備試験結果と限界吸収エネルギー評価式との比較を図2に示す。限界吸収エネルギーの算定値は12.1kJとなる。試験結果では、固定支持の条件では12.6kJまで貫通しないことが確認され、可動支持の条件では15.2kJまで貫通しないことが確認されたことから、限界吸収エネルギーの評価方法は妥当であると考えられる。

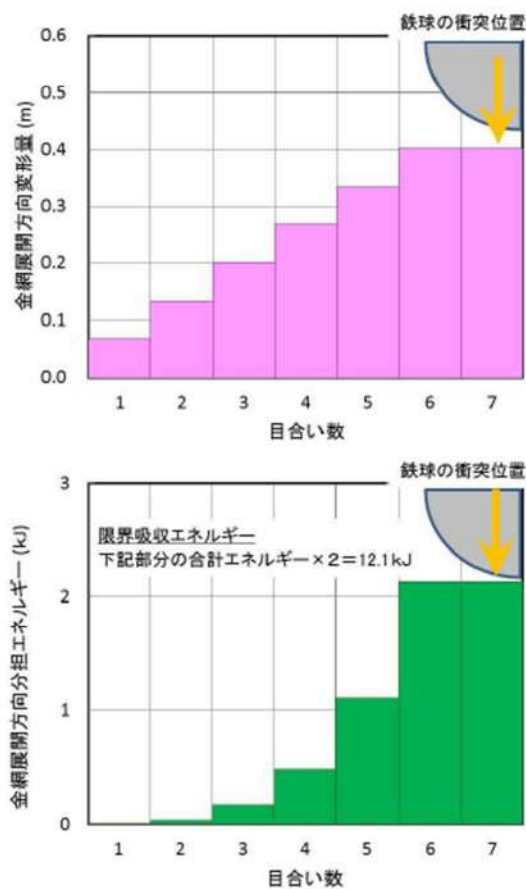


図2 予備試験結果と吸収エネルギー評価式との比較

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

4. 大型自由落下試験条件

- ・金網緒元：名称：高強度金網

 - 材料：JIS G3506 硬鋼線材 (SWRH62A)

 - 素線径 d : 4 mm

 - 素線の目合い (網目の大きさ) S : 50mm

 - 素線の引張強さ : 1,400N/mm²

 - 寸法 : 4 m × 3 m 及び 3 m × 4 m の 2 枚重ね

 - ワイヤ支持条件 : 可動支持 (緩衝装置あり)

- ・重錘緒元：形状：φ500mm 円柱 (先端半球)

 - 質量 : 1500kg

 - 落下高さ (エネルギー) : 15.4m (252kJ) ~ 17m (279kJ)

5. 大型自由落下試験結果及び吸収エネルギー評価式との比較

図3に4m×3mの金網の限界吸収エネルギー算定の模式図を、図4に3m×4mの金網の限界吸収エネルギー算定の模式図を、図5に大型自由落下試験結果を示す。

4m×3mの金網の限界吸収エネルギーは112.6kJ、3m×4mの金網の限界吸収エネルギー103.7kJとなり、これらの金網を重ね合わせて設置したときの限界吸収エネルギーは216.3kJとなる。大型試験では、参考を示す緩衝材を4体設置して実施しており、この緩衝材による吸収エネルギーが37.6kJとなるので、限界吸収エネルギーはこれらを合計した253.9kJと算定される。試験では、257kJまで貫通しないことが確認されたことから、限界吸収エネルギーの評価方法は妥当であると考えられる。

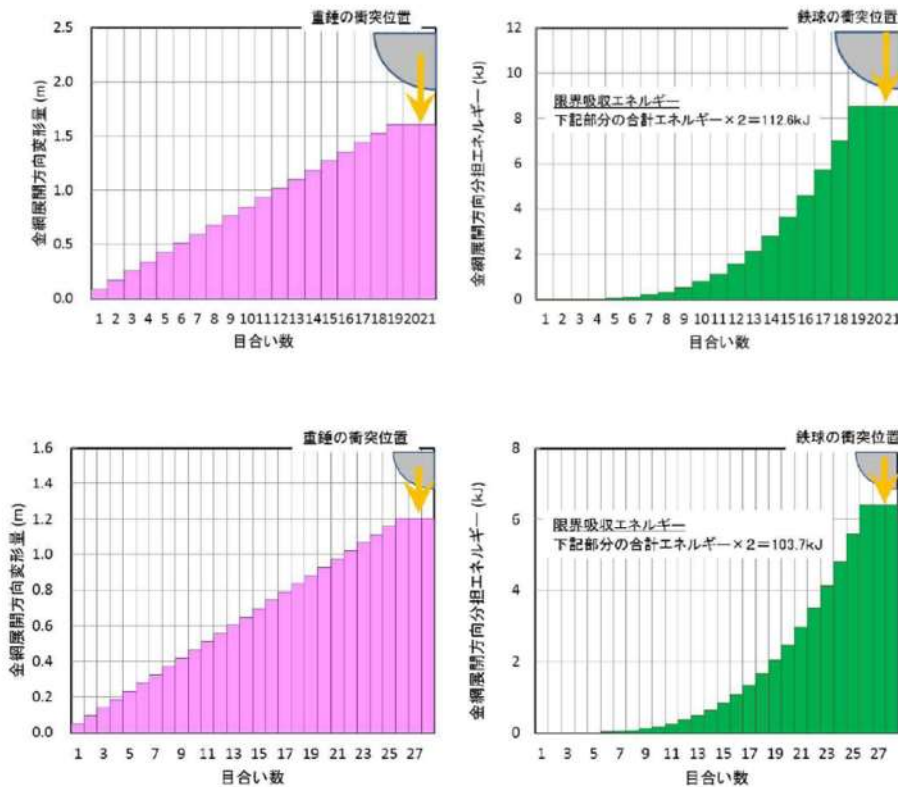


図4 3m×4m金網の限界吸収エネルギー算定模式図

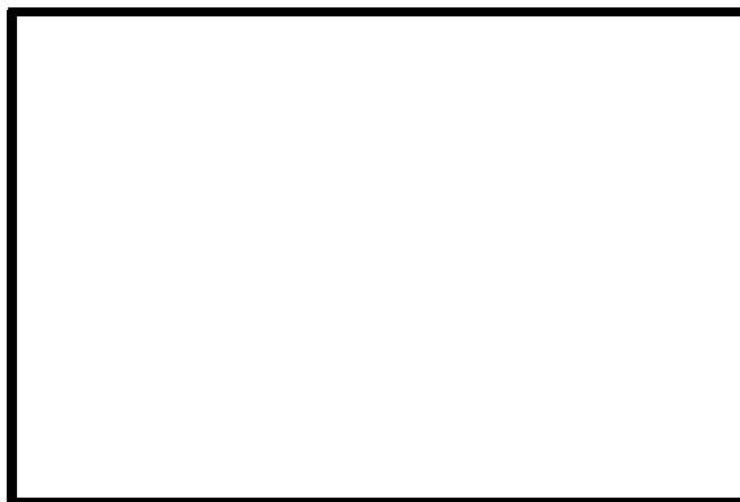


図5 大型自由落下試験結果

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

6. まとめ

1 m×1 mの高強度金網を用いて実施した予備試験，及び3 m×4 mの高強度金網を用いて実施した大型自由落下試験の錘の落下エネルギー (E_{Drop}) と，金網の限界吸収エネルギーの評価式を用いて算定した金網の吸収エネルギー (E_{Design}) との比較を図6に示す。

$E_{\text{Design}} > E_{\text{Drop}}$ の領域においては，予備試験，大型自由落下試験のいずれの試験においてもネットの貫通はなく錘を捕捉できていることから，金網の限界エネルギーの評価式は妥当であると考えられる。



図6 E_{Design} と E_{Drop} の比較結果

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

緩衝材の原理と吸収エネルギー

1. 緩衝材の構造及び設置方法

図1に示すように、金網を固定するフレームの4隅に緩衝材を設置し、金網を固定するワイヤを緩衝材に沿わせて設置することにより、緩衝材内部の部材の塑性変形によりエネルギーを吸収する。

緩衝材1体当たり 約 9.4kJ の吸収エネルギーを有しており、4体で 約 37.6kJ のエネルギーを吸収することが出来る。図2に金網、ワイヤロープ及び緩衝材の取り付けイメージ図を示す。

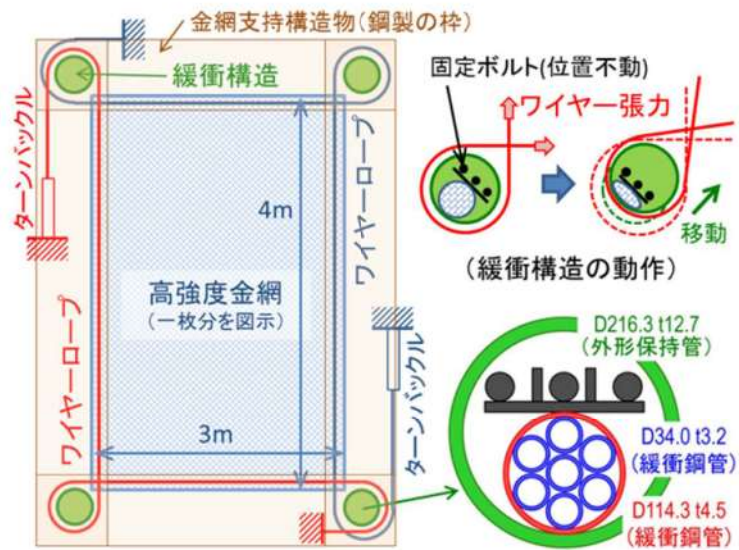


図1 緩衝材の構造及び設置方法



図2 金網、ワイヤロープ及び緩衝材の取り付けイメージ図

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

2. 緩衝材による地震時の影響

緩衝材を設置することにより、飛来物衝突時の金網の吸収エネルギーに余裕を与えることができるが、地震時に金網に作用する地震力により緩衝材が塑性変形すると、金網を固定しているワイヤにたるみが生じ、金網が大きく揺れることにより原子炉補機冷却海水ポンプ等に影響を及ぼす可能性がある。

緩衝材が塑性変形し動作したとき外形保持管は斜め方向に 70mm 移動するため、保守的に金網展開方向、金網展開直角方向の各々について、ワイヤ支持間隔が両側で 70mm ずつ短くなったものとして金網のたわみ量を評価した。金網展開方向長さ 5.01m、金網展開直角方向長さ 4.635 m の金網について、地震時に緩衝材が塑性変形しワイヤにたるみが生じたときの金網展開方向のたわみ量は 0.42m、展開直角方向のたわみ量は 0.40m となり、保守的にこれらのたわみ量を足し合わると 0.82m となる。防護ネットと原子炉補機冷却海水ポンプ等との離隔距離は約 2.6 m あるため、地震時に緩衝材が動作してワイヤにたるみが生じ金網が大きく揺れる状態になったとしても原子炉補機冷却海水ポンプ等に影響を与える恐れはない。

なお、地震等による緩衝材の塑性変形が確認された場合には、緩衝材の取替えを実施する。

飛来物のオフセット衝突時の影響評価

1. 展開方向オフセット衝突時の飛来物の挙動を検討する仮定

オフセット衝突による影響検討においては、衝突時の飛来物と高強度金網の挙動を以下のように仮定する。

- 1) 高強度金網展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- 2) 衝突後の飛来物と金網は衝突点で一体となって挙動する。
- 3) 最大変形時の金網全長は破断時展開長とする。

以上の仮定から、破断時の金網の全長は飛来物の衝突位置に因らず、破断時展開長で一定となり、最大変形時の衝突点 P' の軌跡は楕円形状となる。

以下の設定条件におけるオフセットの影響を試算する。

- ・ 金網諸元：50mm 目合い，素線径 4mm，破断強度 1400N/mm² 級
- ・ 破断ひずみ：0.283
- ・ 展開長：4000mm
- ・ 破断時展開長さ 513mm

2. 展開方向オフセット衝突時の吸収エネルギー評価

金網の中央部から展開方向にずれた位置に飛来物が衝突した場合に、金網の最大変形時の飛来物の衝突点の軌跡は楕円状となると考えられる。金網の展開方向長さ 4 m のときの例を図 1 に示す。

展開方向長さ 4 m の金網の中央を原点にして、金網固定点を座標 (-2000, 0)，(2000, 0) としたときの、Y 軸方向に飛来した飛来物により金網が最大変形したときの飛来物停止位置 P' の軌跡このときの点 P' の軌跡は楕円となり、次の式で表される。

$$\text{点 P' の軌跡} \quad \frac{x^2}{2566^2} + \frac{y^2}{1607^2} = 1$$

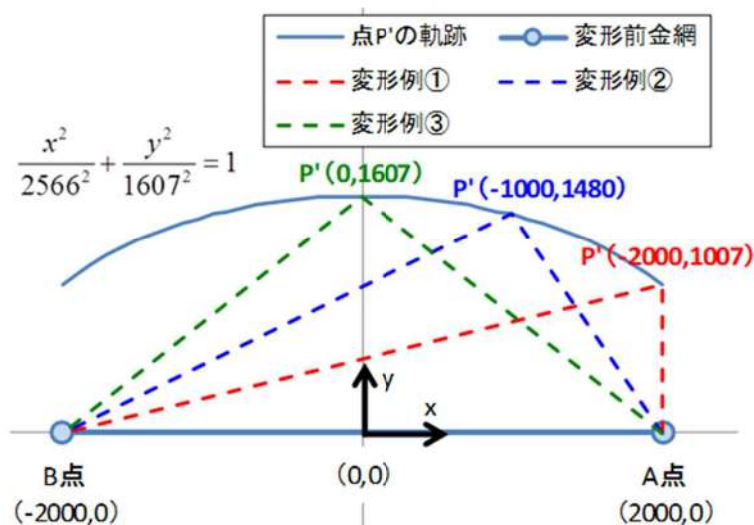


図 1 展開方向長さ 4m の金網における衝突点の軌跡

図1において、y軸方向に進行する飛来物がオフセット位置で金網に衝突し、金網がたわみ始めると、衝突位置左右の金網のx軸方向張力の差分により飛来物は金網の中心離れる方向に横方向の力を受け、図2のように飛来物は金網の中心から外れる方向に向かい、図1で示した金網が最大変形した楕円軌道上で停止する。4mの展開方向長さの金網の場合、中央に衝突したときにはy軸方向の最大たわみは1.6mであるが、オフセット長1.2mの場合には最大たわみは1.0mとなる。

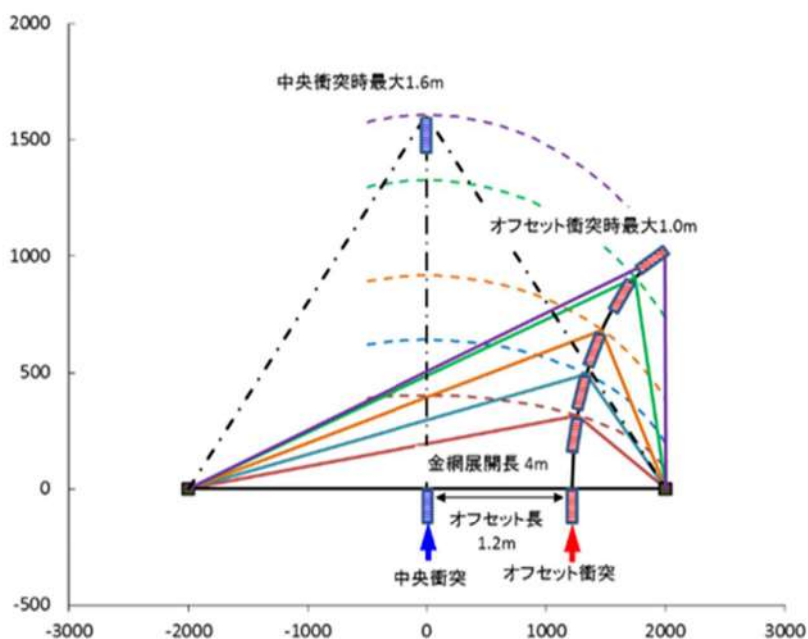


図2 オフセット衝突した飛来物の軌跡

飛来物がオフセット位置に衝突した場合、飛来物のエネルギーは、垂直方向と水平方向に分解され、その各々が金網の吸収エネルギーに変換されることとなる。オフセット衝突時の水平方向寄与分、垂直方向寄与分の各々についての金網の吸収エネルギーを4mの金網について算定し、たわみ量を横軸にとりグラフ化したものを図3に示す。

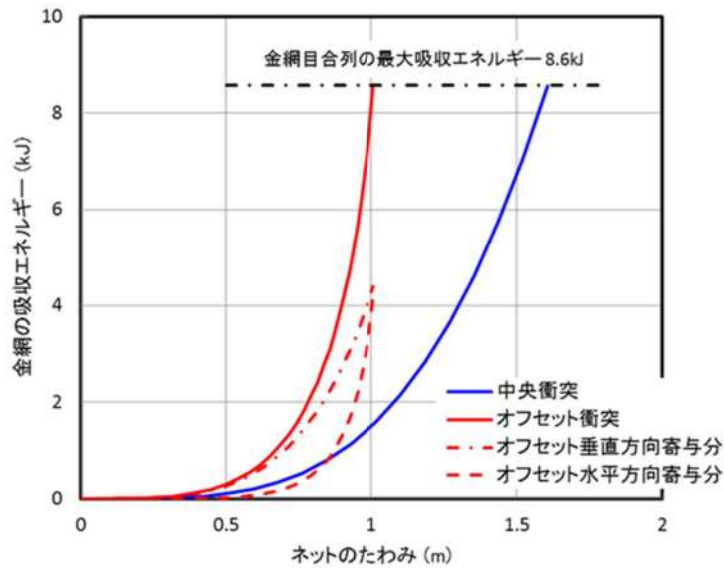


図3 オフセット衝突時の吸収エネルギー

図3から、飛来物が展開方向にオフセット位置に衝突した場合には、最大たわみ量はオフセット位置から短い側の金網の最大伸び量に制限されるが、金網の最大吸収エネルギーは、飛来物が垂直方向に金網を引っ張ることによるエネルギーと、水平方向に引っ張ることによるエネルギーとの合計となり、その値は中央部に衝突した場合の吸収エネルギーと等価になると考えられる。

3. 展開直角方向オフセット衝突時の吸収エネルギー評価

飛来物が金網展開直角方向にオフセットして衝突した場合の金網の吸収エネルギーへの影響について検討した。

検討は、金網展開方向長さ4 m、展開直角方向長さ3 mの金網について、図4に示すように金網中央に衝突した場合(①)をベースとして、展開直角方向端部(②)展開直角方向1/4オフセット(③)の3ケースを比較することで行った。

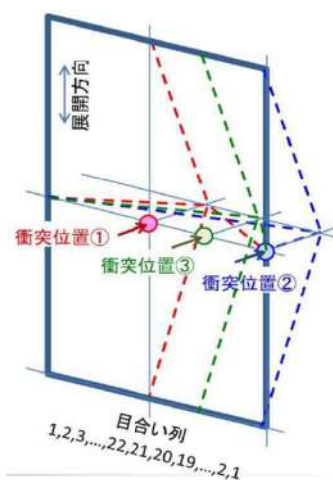
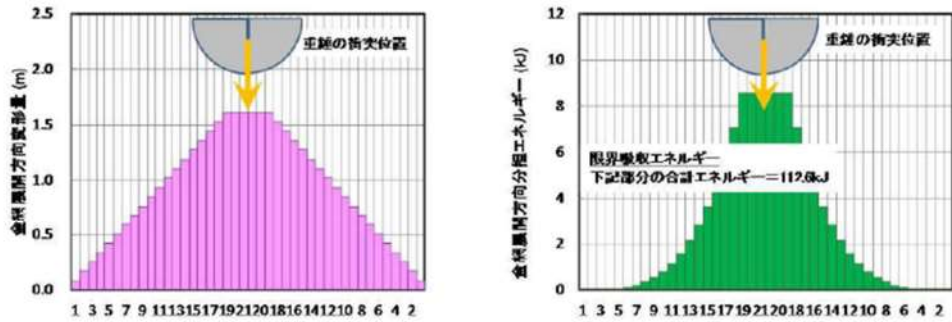
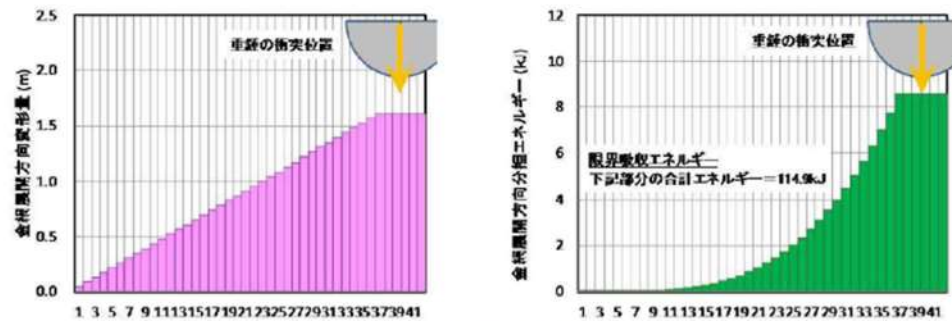


図4 金網展開直角方向オフセットの検討ケース

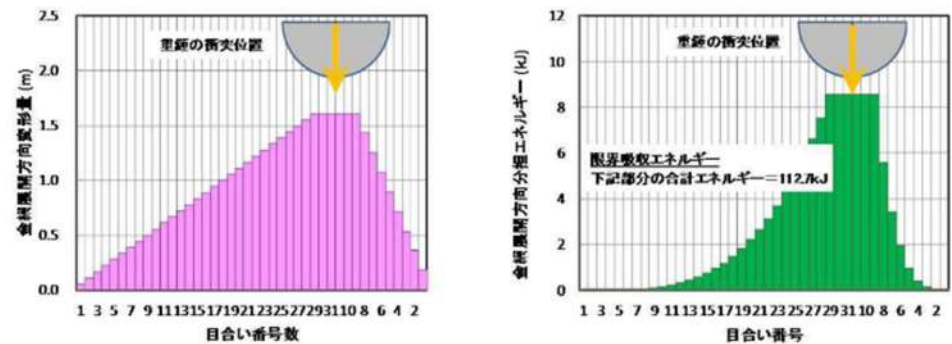
各ケースにおける金網の限界吸収エネルギーの算定結果を以下に示す。



衝突位置①（中央）



衝突位置②（端部）



衝突位置③（1/4 オフセット）

各衝突位置における金網の限界吸収エネルギーの算定の結果、僅かではあるが中央に衝突した場合より端部に衝突した場合のほうが限界吸収エネルギーは大きくなる結果となった。これは中央からオフセットしたことで、衝突位置からオフセットとは反対側の金網の固定位置（図5の赤く塗った部分）までの距離が長くなり、飛来物の衝突により金網が大きく変形する範囲が増えるため吸収エネルギーが大きくなったものと考えられる。したがって、展開直角方向のオフセットに関しては、金網の中央部が最も保守的な限界吸収エネルギーの評価値となる。

衝突位置	限界吸収エネルギー（1枚分）
①中央	112.6kJ
②端部	114.9kJ
③1/4 オフセット	112.7kJ

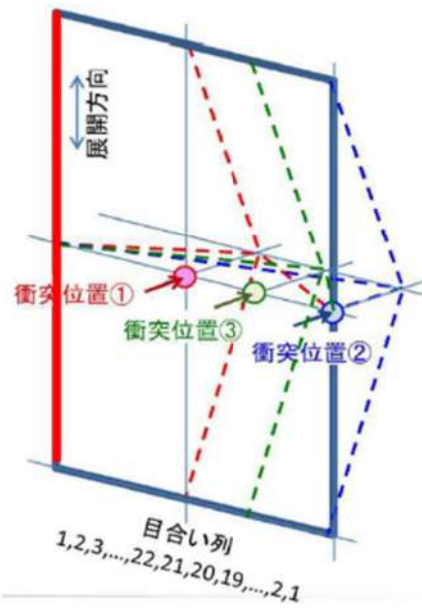


図5 衝突位置と金網固定位置の関係

飛来物衝突部における金網の局部貫通評価

竜巻防護ネット（以下、防護ネットと言う）に飛来物が衝突した際に、飛来物により金網に局部貫通が生じないことを次の手順で確認した。

- ① 飛来物衝突による衝突荷重の算定
- ② 衝突部の金網から素線一本あたりの荷重を算出
- ③ 素線一本あたりの荷重が破断荷重以下であることを確認

① 飛来物衝突による衝突荷重の算定

鋼製材が 4 m × 3 m の防護ネットに衝突したときの衝撃荷重を次のように算定した。

金網の吸収エネルギーの評価式と同様にネットをバネが直列につながったものとモデル化し、飛来物が防護ネットに衝突する際の速度を、飛来物の水平速度 57m/s を切り上げて 60m/s、飛来物の質量を m とすると、衝突後に飛来物に作用する衝撃荷重 F 、時間 t 秒後の飛来物の速度 v 及び変位量 d は以下の式で表される。

$$F = Qt$$

$$v = -\frac{1}{m} \int Qt = -\frac{Qt^2}{2m} + 60$$

$$d = \int \left(-\frac{Qt^2}{2m} + 60 \right) dt = -\frac{Qt^3}{6m} + 60t$$

ここで、最大変異 d_{max} に到達したときの飛来物の速度 $v=0$ であるから、

$$-\frac{Qt^2}{2m} + 60 = 0$$

より

$$Qt^2 = 120m$$

$$d_{max} = -\frac{Qt^3}{6m} + 60t = -\frac{120mt}{6m} + 60t = -20t + 60t = 40t$$

したがって

$$t = \frac{d_{max}}{40} \quad F = Qt = \frac{120m}{t}$$

となる

鋼製材の質量 $m = 135 \text{ kg}$ 、

4 m × 3 m の金網における最大たわみ量

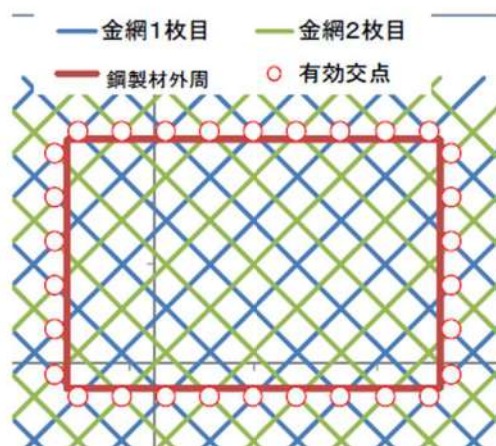
$$d_{max} = \frac{4}{2} \tan(38.8^\circ) = 1.608 \text{ [m]}$$

衝突時間： $t = 0.040 \text{ [sec]}$ ， 衝撃荷重： $F = 405 \text{ [kN]}$

② 衝突部の金網から素線一本あたりの荷重を算出

鋼製材の寸法は $0.2\text{m} \times 0.3\text{m} \times 4.2\text{m}$ 、防護ネットは目合い長さ 50mm の金網を目合いが交互になるように2枚重ねて設置することから、右の図のように鋼製材が防護ネットに衝突したときの鋼製材外周近傍の金網交点は30点となるので、衝撃荷重を受け止める金網の素線本数は、30本となる。

従って、素線1本あたりの荷重は、 13.5kN となる。



③ 素線一本あたりの荷重が破断荷重度以下であることを確認

防護ネットに使用する金網の素線の破断荷重は、荷重試験の交点/荷重-伸び曲線より 15kN であるので、素線1本あたりの荷重 < 破断荷重となり、鋼製材による金網の局所的な貫通は発生しない。

網目より小さい飛来物の対策

飛来物は飛散防止対策を行うことから飛来の可能性は低いですが、設計飛来物のうち鋼製パイプについては、工事等の足場材として使用されており、飛散の可能性を否定しきれない。鋼製パイプは直径 50mm であるため、50mm 目合いの網目をすり抜ける可能性がある。そのため、40mm 目合い寸法の金網を設置し、鋼製パイプが竜巻飛来物防護対策設備内部に侵入することを防止する。

また、極小飛来物の設計飛来物として考えている砂利（0.04m×0.04m×0.04m）が竜巻防護施設に衝突してもその衝突時間は非常に短いため、設備に有意な応力は生じないことを確認していることから、設計飛来物より小さい砂利が衝突しても外部事象防護対象施設に影響は与えない。

竜巻防護ネットの点検、管理方法について

竜巻防護ネットは、ネットの1目合いにおける荷重－伸び曲線の試験結果を直線で近似し、ネットを1目合い毎のバネが連結したものと仮定し吸収エネルギーの評価を実施している。このため、たわみ等によるネットの大きな変形、ネットの傷、腐食があると、飛来物の衝突のエネルギーを吸収できなくなるおそれがある。このため、防護ネットの点検、管理方法について以下に検討した。

1. 防護ネットの劣化要因

ネットの飛来物捕捉性能を低下させるような劣化として、ネットの変形による吸収エネルギーの低下と、素線の傷、腐食による素線強度の低下が考えられる。

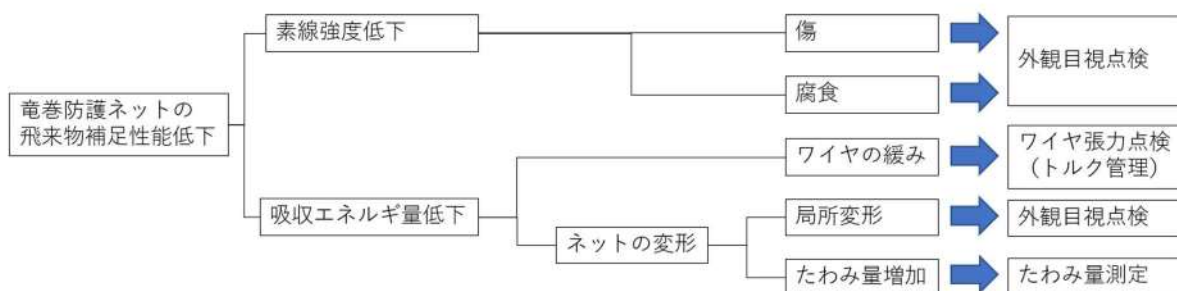
このうちのネットの変形に関しては、強風により異物が当たる等の要因で、ネットの一部に力が加わることによる局所的な変形と、ネットを固定しているワイヤの緩み、ネット自身の経年劣化によるたわみの増加が考えられる。

2. 防護ネットの点検、保守方法

素線の傷、腐食及び局所的な変形に対する点検として、定期的を目視によるネットの外観点検を実施し、素線の凹み傷や断線、腐食及び変形が見られた場合にはネットの取替えを検討する。

さらに、地震、火災によってもネットに傷、局所的な変形が生じる可能性がある。そのため、地震、火災のあとには損傷等、各部の異常の有無を点検し、素線の凹み傷や断線、局所的な変形等の異常があった場合には取替えを検討する。

ネットのたわみの増加に関しては、その要因としてネットを固定しているワイヤの緩み、ネット自身の経年劣化が考えられることから、定期的、防護ネットを固定しているワイヤの張力の点検、ネットのたわみ量の測定を実施し、管理基準を逸脱した場合にはワイヤの再緊張やネットの取替えを検討する。



3. 管理基準の検討

(1) ワイヤ張力の管理基準

ワイヤの張力に関しては、ネット設置時にワイヤロープの張力調整金具（ターンバックル）の締付けトルクをメーカー標準管理値の 20～25N・m で管理して設置することから、点検時においても管理基準値を 20～25 N・m で管理する。



ターンバックルの例

(2) ネットたわみ量の管理基準

a. 通常時にネットに作用する荷重

通常時においてネットには自重が作用することから、水平に張られたネットには自重によるたわみが発生する。

水平に張られたネットの自重によるたわみは、管理基準の検討においてネットの吸収エネルギーを低下させる要因として考慮する。

b. 竜巻襲来時にネットに作用する荷重

竜巻襲来時にネットに作用する荷重としては、竜巻の風速による荷重と飛来物の衝突による荷重が考えられる。

竜巻の風速による荷重によってネットがたわむことにより、ネットの吸収エネルギーの低下が考えられることから、風荷重によるたわみは、管理基準の検討においてネットの吸収エネルギーを低下させる要因として考慮する。

飛来物の衝突による荷重に関しては、発電所内の仮置き資材等について、できる限り発電所外での保管もしくは屋内での保管を実施すると共に、発電所内において屋外での保管が必要なものについては飛来物とならないように固縛を実施し、竜巻襲来時において、できる限り飛来物が発生しないようにすることとしている。このため、発電所に竜巻が襲来し、飛来物が防護ネットに2つ以上衝突する確率は極めて低いと考えられるが、管理基準の検討においては、水平に張られたネットについては、1つの飛来物がネットに衝突しネット上に残った状態で、2つ目の飛来物が衝突することを考慮する。

以上より、水平に張られたネットについては、自重、竜巻襲来時の風荷重、1つ目の飛来物の衝突荷重及び重量と2つ目の飛来物の衝突荷重の合計のエネルギーに相当するたわみ量を、ネットの最大たわみ量から差し引いた値を管理限界たわみ量とする。

ネットのたわみ量の管理は、ネットを設置した時点の初期たわみ量を測定し、初期たわみ量からの増分がネットの管理限界たわみ量を超えないように適切な管理基準を定めて管理する計画である。

表1 竜巻防護ネットの管理限界たわみ量の評価結果

ネット	ネット寸法 (m)		限界たわみ量 (m)	限界吸収エネルギー (kJ)	①風荷重によるエネルギー (kJ)	②自重によるエネルギー (kJ)	③衝突エネルギー [鉛直] (kJ)	④飛来物重量に相当するエネルギー (kJ)	⑤合計 ①+②+③+④ (kJ)	⑤に相当するたわみ量 (m)	管理限界たわみ量 (m)
	展開方向	× 直角方向									
海水ポンプエリア (Aトレン)	5.020	× 4.635	1.88	324	8.9	0.5	98×2	0.01	205.41	1.390	0.49
海水ポンプエリア (Bトレン)	5.010	× 4.635	1.87	327	8.8	0.4		0.01	205.21	1.388	0.48
海水ストレーナーエリア (海側)	4.440	× 2.620	1.65	252	3.9	0.2		0.01	200.11	1.334	0.31
海水ストレーナーエリア (山側)	4.435	× 2.620	1.65	251	3.9	0.2		0.01	200.11	1.335	0.32

解析コードについて

「竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価」及び「竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価」に当たっては、以下の解析コードを用いているため、次ページ以降に解析コードの概要及び検証と妥当性確認の内容を記す。

表 1 使用した解析コード

使用目的	解析コード名
(1) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価	竜巻ハザード評価プログラム
(2) 竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価	TOMBOS

(1) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の評価

項目	コード名	竜巻ハザード評価プログラム
開発機関		一般財団法人 電力中央研究所
開発時期		2014 年
使用したバージョン		Ver. 1.2 選定理由：解析時の最新バージョン
使用目的		竜巻最大風速ハザード曲線作成
コードの概要		<p>一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>所定の地域における竜巻の発生数、竜巻風速、被害長さ・幅の確率分布を解析できるとともに、発電所等の構造物が所定の風速以上の竜巻に遭遇する確率等のハザード評価が実施できる。</p>
検証及び妥当性確認の内容		<p>竜巻ハザード評価プログラムは、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の算定に使用している。</p> <p>【検証の内容】 本解析コードの検証の内容は次の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・統計量や確率分布について、他機関の算定例と同等の数値や分布形が得られることでコードの検証を行っている。 ・ハザード曲線について、理論解と同等の分布形が得られること、及び他機関が算定したハザード曲線と同傾向の曲線が得られることでコードの検証を行っている。 <p>【妥当性確認】 本解析コードは、竜巻最大風速のハザード曲線の算定を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。また、竜巻最大風速 110m/s 程度の範囲において算定結果が妥当であることを確認している。以上より、本計算機コードを用いることは妥当である。</p>
その他（工認実績等）		<p>既工認での使用実績はない。</p> <p>なお、最新バージョンまでに解析に影響のある変更がないことを確認している。</p>

計算機コードの概要及び検証と妥当性確認の内容説明

竜巻ハザード評価プログラム

1. 一般事項

本書は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されている計算機コード「竜巻ハザード評価プログラム」の概要である。

竜巻ハザード評価プログラムは、竜巻最大風速のハザード曲線を算定することを目的として、今回初めて使用する解析コードである。

2. 本計算機コードの特徴

- (1) 気象庁「竜巻等の突風データベース」を基に、所定の地域における竜巻の発生数、竜巻風速、被害長さ・幅の確率分布を解析できるとともに、気象庁のデータを統合して疑似データを作成し、ハザード評価に用いることができる。なお、竜巻については、竜巻の観測数のデータ数が少ないこと、観測体制が年代により変遷していること、また竜巻の直接的な観測が現状困難であるため竜巻後の被害状況を調査・分析して観測結果としていることや観測の内容（Fスケール、被害長さ、被害幅、移動方向）が部分的に揃っていないことを考慮して、保守的な取扱いを行っている。
- (2) 構造物寸法等を与えることで、その構造物が所定の風速以上の竜巻に遭遇する確率等のハザード評価が実施できる。

3. 理論式

3. 1 統計解析

発生数、竜巻風速、被害長さ、被害幅の平均値 μ 、標準偏差 σ 、共分散 s 、相関係数 ρ は、次式により求める。

$$\begin{aligned}\mu_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i & \sigma_x &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2} = \sqrt{s_{xx}} \\ s_{xy} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) & \rho_{xy} &= \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx} \times s_{yy}}}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、竜巻の観測数の少なさと、観測体制が年代により変遷していることを考慮して、観測データを基に疑似的な51.5年間のデータを作成しているが、疑似データの作成に当たっては、確率分布の再生性を利用している。即ち、独立な2つの確率変数 X, Y があった場合、確率変数の和 $X+Y$ はそれぞれのパラメータ（例えば平均値や分散）の和をパラメータに持つ同型の分布形に従うことを利用する。ポアソン分布、ポリヤ分布、正規分布ではこの再生性が成り立つ。

$$P(\mu_x, \sigma_x^2), P(\mu_y, \sigma_y^2) \Rightarrow P(\mu_x + \mu_y, \sigma_x^2 + \sigma_y^2)$$

なお、疑似データの作成に当たっては、Fスケール不明竜巻を次のとおり取り扱い保守性を高

めている。陸上で発生した竜巻及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上でのFスケール不明竜巻は、被害が少ないF0竜巻と見なしている。一方、Fスケール不明の海上竜巻（水上で発生しその後上陸しなかった竜巻）については、その竜巻のスケールを推定することは困難である。そこで、「海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である」という考え方にもとづいて各Fスケールに配分することで、例えば、F3竜巻等規模が大きな竜巻が観測数より多くなる取扱いとしている。

また、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅・長さの情報がない竜巻には、被害幅・長さを有する竜巻の観測値を与えているが、その際は、被害幅・長さが大きいほうから優先的に用いることで、被害幅・長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに、被害幅・長さ0のデータについては計算に用いない取扱いとしている。

次に、竜巻特性のそれぞれの確率分布は次式により求める。

(1) 発生数の確率分布

$$\text{ポアソン分布} : P_T(N) = \frac{(\mu T)^N}{N!} \exp(-\mu T) \quad (2)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_T(N) = \frac{(\mu T)^N}{N!} (1 + \beta \mu T)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (3)$$

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\mu} - 1 \right) \times \frac{1}{\mu}$$

ここに、Nは竜巻の年発生数、 μ は竜巻の年平均発生数、Tは年数、 σ は竜巻の年発生数の標準偏差である。今回は、東京工芸大学委託成果等に基づき、ポリヤ分布を採用している。

(2) 竜巻風速、竜巻被害長さ、竜巻被害幅の確率分布

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下「ガイド」という。）やガイドに参照されている上記の東京工芸大学委託成果に従い、対数正規分布を用いる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln}^2}} \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここに、 μ_{\ln} 、 σ_{\ln} は $\ln(x)$ の平均値と標準偏差であり、変数xの平均値 μ や標準偏差 σ とは以下の関係にある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln \left(\left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 + 1 \right) \quad (5)$$

$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{\ln}^2}{2} \quad (6)$$

3. 2 ハザードの評価

(1) 被害面積の期待値

1 個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ の期待値は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
 &+ S \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned} \tag{7}$$

ここに、 w は竜巻の被害幅、 W は風速が V_0 以上となる被害幅、

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{8}$$

V_{\min} は被害が発生する最小風速 (=25m/s) , l は被害長さ、 α は竜巻の移動方向、 $H(\alpha)$ と $G(\alpha)$ は竜巻の被害幅や長さ方向への竜巻影響エリア (あるいは構造物) の投影長さ、 S は竜巻影響エリアの面積である。

竜巻影響エリアを直径 D_0 の円形とした場合、 $H(\alpha)$ や $G(\alpha)$ は竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \tag{9}$$

さらに、 α と V, W, l の相関係数は $-0.09 \sim 0.01$ の範囲内にあり、ほとんど相関が認められないと言う参考文献1の研究成果を考慮すると、 $DA(V_0)$ の期待値は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
 &+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned} \tag{10}$$

ここに、2変量・3変量の対数正規分布は次式で表される。

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \quad (11)$$

$$f(x,y,z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{vmatrix}^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \times \exp\left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x & \ln(y)-\mu_y & \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x \\ \ln(y)-\mu_y \\ \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix}\right] \quad (12)$$

(2) 遭遇確率 (ハザード曲線)

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 V_0 以上の竜巻風速に遭遇する確率は、竜巻の発生分布に応じて次式で表される。

$$\text{ポアソン分布} : P_{V_0,T} = 1 - \exp[-\mu R(V_0)T] \quad (13)$$

$$\text{ポリヤ分布} : P_{V_0,T} = 1 - [1 + \beta\mu R(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (14)$$

ここに、 $R(V_0)$ は竜巻影響エリアが1つの竜巻に遭遇し、そのときの竜巻風速が V_0 以上となる確率であり、竜巻検討地域の面積を A_0 とすると、次式で表される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (15)$$

(3) 被害面積期待値の数値積分

式(10)の数値積分に際しては、合成台形則を用いる。合成台形則は、関数 $f(x)$ を区間 $[a, b]$ を m 個の小区間に等分し、小区間ごとに面積の台形近似を行う。

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{2} \left(f(a) + f(b) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(x_j) \right) - \frac{(b-a)}{12} h^2 f''(\mu) \quad (16)$$

$$h = \frac{(b-a)}{m} \quad (17)$$

$$x_j = a + jh$$

式(10)の幅・長さの積分については、有限な範囲で打ち切らざるを得ないため、誤差に注意しながら、既往最大値及び相関係数も勘案して、 $3\sim 4\sigma_{ln}$ を目安に積分範囲を設定する。

なお、風速については、F4竜巻(93~116m/s)を考慮して、120m/sを積分上限としている。ただし、風速110m/s以上ではハザード曲線の傾向が変化する場合があることから、概ね110m/s程度がハザード評価の適用範囲と考えられる。

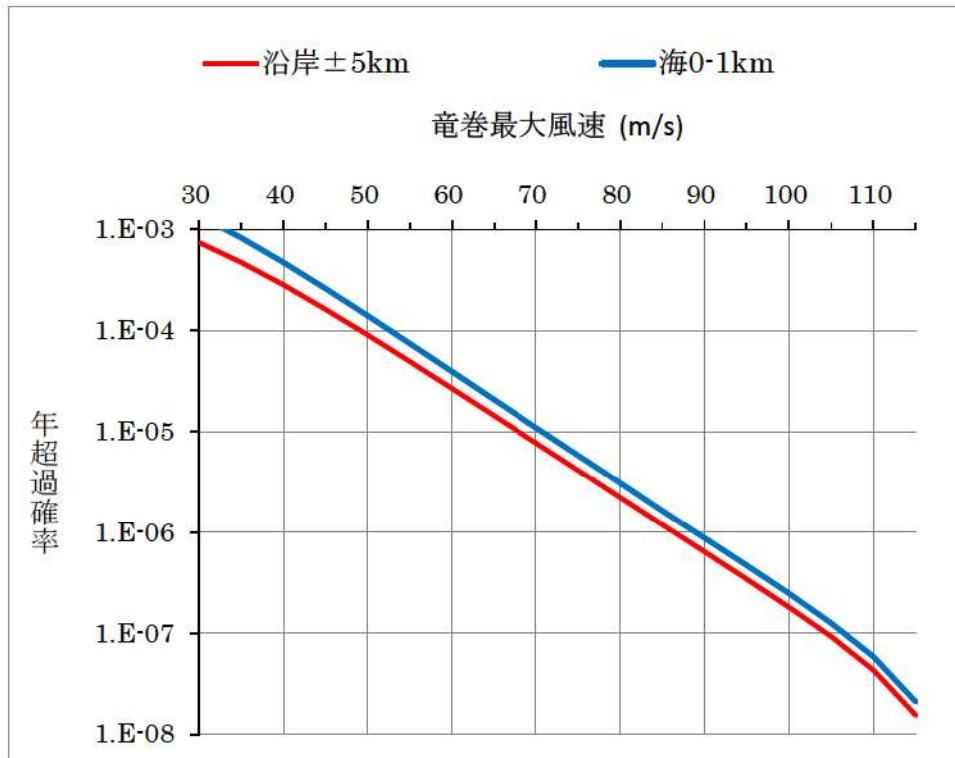


図1 竜巻最大風速のハザード曲線 (泊)

(参考) 誤差に関する考察

今回の評価において、被害長さは $3.71\sigma_{ln}$ を積分範囲に設定している。被害長さの積分範囲を $4\sigma_{ln}$ とした場合、被害面積の期待値は約1.8%大きくなる。仮に $4.5\sigma_{ln}$ とした場合でも、被害面積の期待値は約3.1%大きくなる程度であり、 $3.71\sigma_{ln}$ とすることで概ねカバーできていることが分かる。

この被害面積の期待値の変動が、竜巻風速のハザード曲線に与える影響(感度)を分析した。その結果、被害面積の期待値が仮に2%変わったとしても、ハザード(風速)は0.2m/s変動する程度であり、求めている風速値に対する影響はごく小さいと考えられる。

なお、竜巻最大風速のハザード曲線算定に関する保守性については、疑似データ作成におけるFスケール不明竜巻の取扱いにより、例えばF2スケールの竜巻の発生数について、観測実績のおよそ3.5倍に見積もっている。

また、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅・長さの情報がない竜巻には、被害幅・長さを有する竜巻の観測値を与えているが、その際は、被害幅・長さが大きいほうから優先的に用いることで、被害幅・長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに、被害幅・長さ0のデータについては計算に用いない等、保守性を高めた評価としている。

4. 解析フローチャート

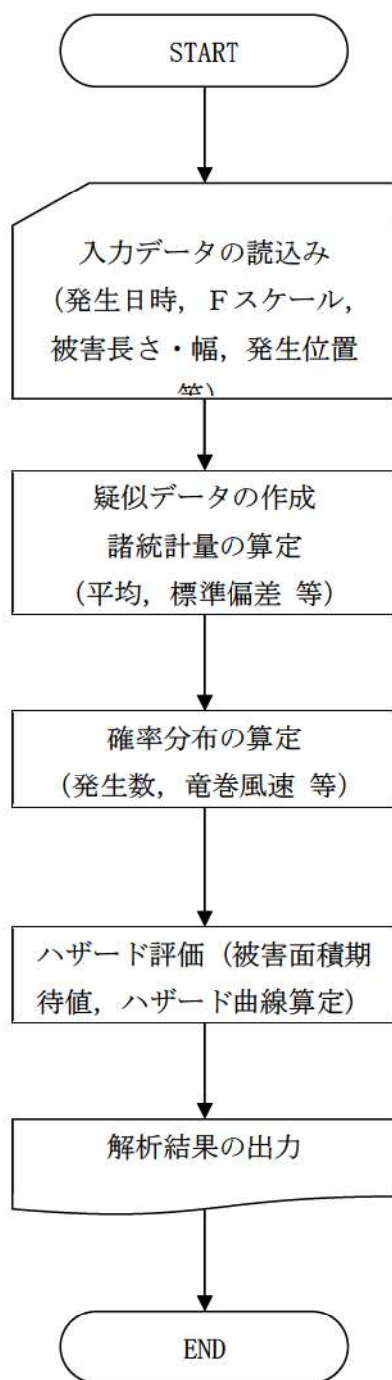


図2 解析フローチャート

5. コード検証

5. 1 統計解析

(1) 諸統計量

竜巻最大風速のハザード曲線の算定に当っては、式(11)、(12)に示したように、竜巻風速、被害長さ、被害幅それぞれの平均値と標準偏差、及び竜巻風速と被害長さ、竜巻風速と被害幅、被害長さ と被害幅の相関係数が必要となる。そこで、本解析コードにおいて、これらの統計量が正しく算定されることを下記のとおり確認する。

参考文献2（豊川・柳井編著「医学・保健学の例題による統計学」現代数学社）には、実験用ハツカネズミに与えた催眠剤と睡眠時間の関係として、図3のデータが示されている。

このデータをサンプルとして、本解析コードによる平均値、共分散、相関係数を求め、参考文献2の結果と比較した結果を表2に示す。本解析コードの結果は、文献の結果と一致することを確認した。

個体	催眠剤 ($\mu\text{g}/\text{体重g}$)	睡眠時間 (hrs)
A	1	1
B	2	6
C	5	3
D	7	7
E	8	10
F	11	6
G	12	10
H	12	7
I	13	9
J	15	15

表 4・1 催眠剤と睡眠時間

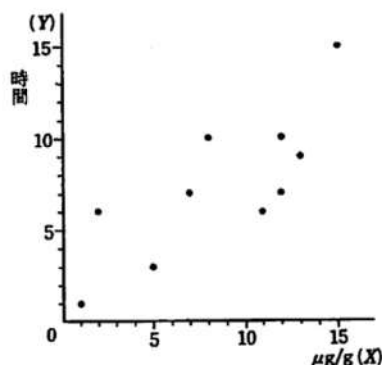


図 4・1 催眠剤投与量と睡眠時間の散布図

図 3 参考文献 2 における睡眠剤投与量と睡眠時間の関係

表2 統計処理の検証結果

統計量	参考文献2		本解析コード	
	催眠剤 ($\mu\text{g}/\text{体重g}$)	睡眠時間 (hrs)	催眠剤 ($\mu\text{g}/\text{体重g}$)	睡眠時間 (hrs)
平均値	8.6	7.4	8.60	7.40
分散	22.93	15.38	22.933	15.378
共分散	14.73		14.733	
相関係数	0.785		0.7846	

(2) 確率分布

参考文献2には、ある都市の1年間(365日)の交通事故死亡者の分布(架空の例)を、ポアソン分布とポリヤ分布(文献では、ポリア型の負の二項分布と記載)に当てはめた例が示されているため、これをサンプルデータとして計算コードの検証を行った(表3参照)。なお、前述のとおり竜巻影響評価ではポリヤ分布を採用しているが、参考文献2にはポアソン分布のデータも記載されているため、ポリヤ分布と合わせてポアソン分布の検証も行う。

表3に示す実測数の平均値2.989と分散3.759(参考文献2に記載)を用いて、ポリヤ分布(式(3))及びポアソン分布(式(2))を本解析コードで求めた。結果を表4及び表5に示す。また、参考文献2に示されたグラフを図4、本解析コードで求めたグラフを図5に示す。表4と表5及び図4と図5の比較より、両者は概ね一致していることが分かる。

表3 ある都市の交通事故死亡者数の分布(参考文献2の表5.3より)

死亡者数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9以上	計
実測数	27	61	77	71	54	35	20	11	6	3	365
ポアソン分布	18.4	54.9	82.1	81.8	61.1	36.5	18.2	7.8	2.9	1.3	365
ポリア型 負の2項分布	25.5	60.7	78.4	72.8	54.4	34.8	19.7	10.2	4.8	3.7	365

表4 ポリヤ分布の検証結果

上表掲載	死亡者数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9以上	計
	実測数		27	61	77	71	54	35	20	11	6	3
ポリア(①)		25.5	60.7	78.4	72.8	54.4	34.8	19.7	10.2	4.8	3.7	365
本解析コード(②)		25.54	60.71	78.36	72.79	54.43	34.79	19.72	10.16	4.84	3.66	365
差(②/①)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00

表5 ポアソン分布の検証結果

上表掲載	死亡者数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9以上	計
	実測数		27	61	77	71	54	35	20	11	6	3
ポアソン(①)		18.4	54.9	82.1	81.8	61.1	36.5	18.2	7.8	2.9	1.3	365
本解析コード(②)		18.37	54.92	82.07	81.77	61.11	36.53	18.20	7.77	2.90	1.36	365
差(②/①)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.00

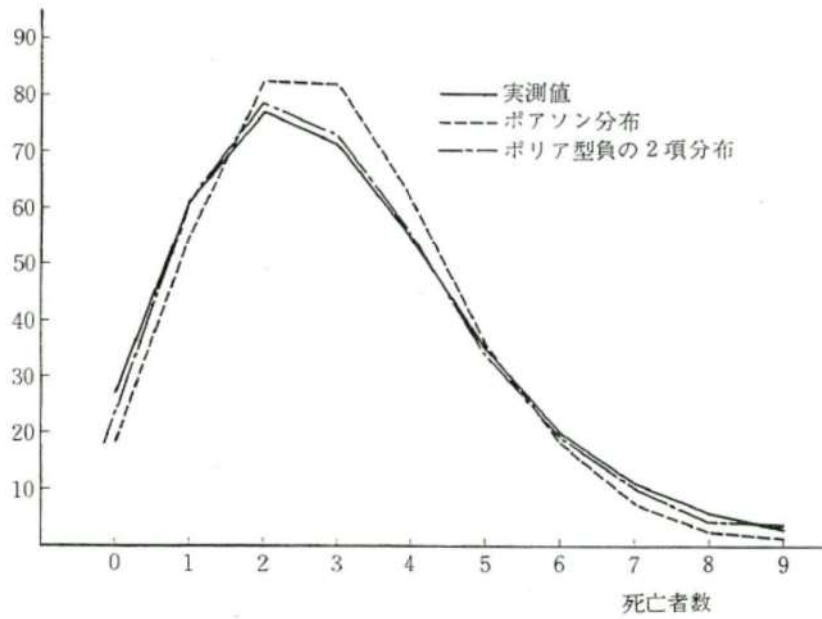


図4 分布形 (参考文献2)

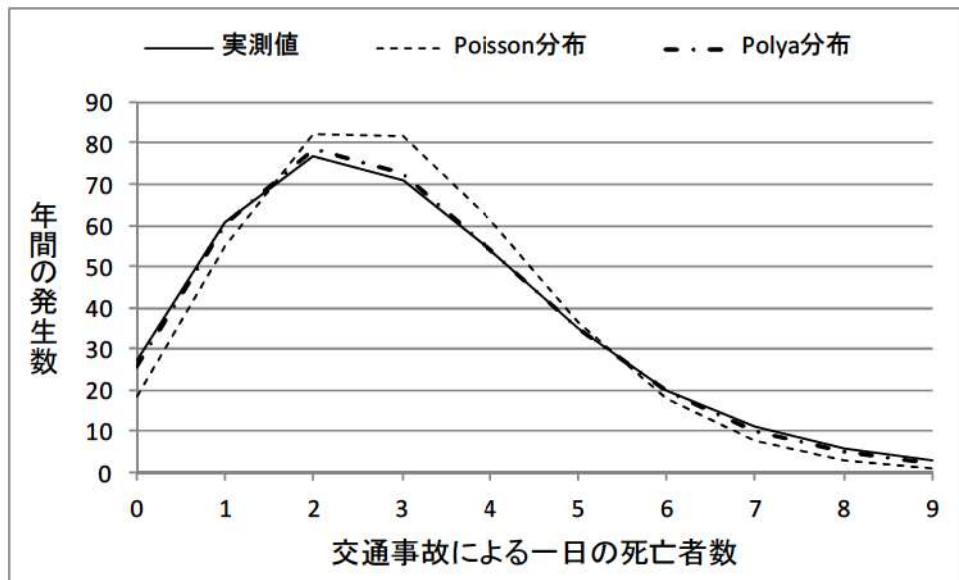


図5 分布形 (本解析コード)

5. 2ハザード評価

(1) 簡略化した条件での検証

竜巻風速、被害幅、被害長さ、及び移動方向はそれぞれ無相関だと仮定し、理論解と本解析コードの計算結果を比較する。

この場合、竜巻被害面積の期待値 $E[DA(V_0)]$ は、式(10a)のように近似できる。

$$E[DA(V_0)] \approx (1-F(V_0)) \times [W \bar{w} \bar{l} + D_0 \bar{l} + W \bar{w} D_0 + (D_0^2 \pi / 4)] \quad (10a)$$

ここに、 $(1-F(V_0))$ は風速の超過確率、 \bar{w} 、 \bar{l} は平均被害域幅及び平均被害域長さ、 W' は幅補正に関する項 $(= (V_{\min}/V_0)^{1/1.6})$ である。なお、 $F(V_0)$ は対数正規分布で表されるため、次式のとおりとなる。

$$F(V_0) = \int_0^{V_0} f(v) dv = \int_0^{V_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \frac{1}{v} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(v) - \mu_v}{\sigma_v}\right)^2\right] dv \quad (10b)$$

日本海側の海岸線から海側・陸側各5km範囲で発生した竜巻を対象として、式(10a)の近似式から被害面積期待値を求めた結果と、本解析コードにおいて無相関として数値積分を実施した結果を図6に示す。なお、図6の実線で示した式(10a)の近似は、竜巻風速を1m/s間隔で離散的に求めた面積期待値を結んだものである。この図より、両者は概ね一致していることが分かる。

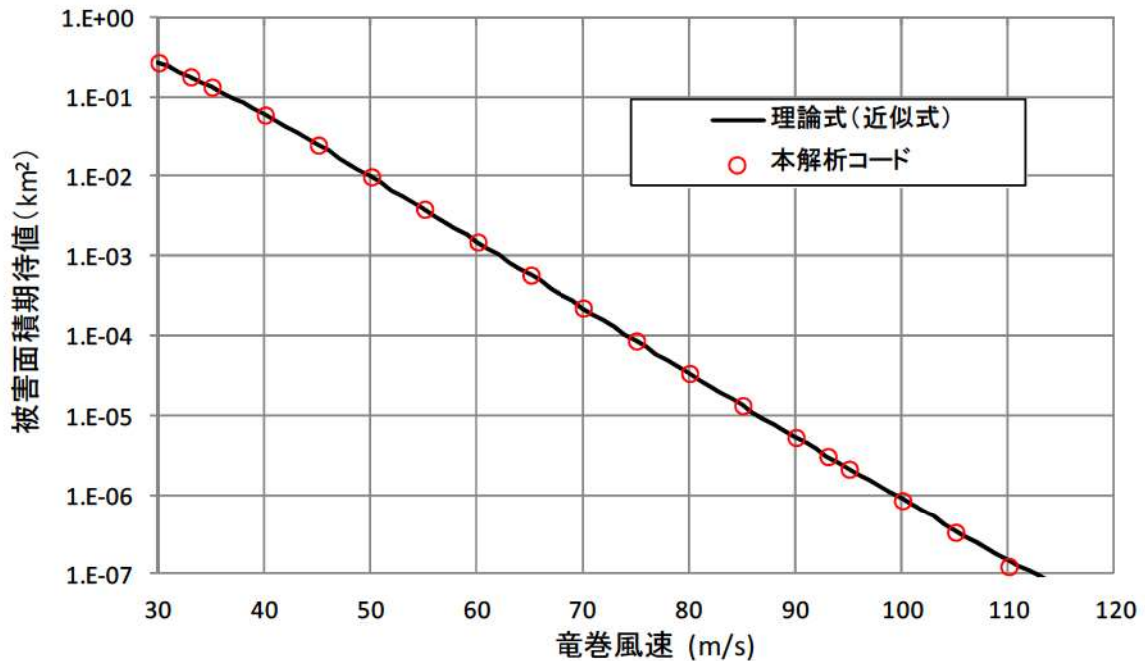


図6 被害面積の期待値の比較

(2) ハザード曲線

参考文献1では、全国のデータ（1961年1月～2009年12月）を用いて海岸からの距離別のハザード曲線を算定しており、その結果が同報告書の図2.1.2.14-15（92頁）に掲載されている。なお、ポリヤ分布を採用して計算を行っている。

本検証では、海岸から1 km以内の陸地（CASE-A）と海岸から5 km以上離れた陸地（CASE-B）の2ケースについて検証計算を行った。なお、参考文献1では、式(8)の V_{min} の値が不明であるため、ここでは25.0m/sを用いる。

参考文献1では、竜巻の移動方向に関して4～5次のフーリエ級数で近似するのが妥当（p. 47）と指摘すると共に、i)北東の頻度が高い、ii)海岸からの距離による違いは見られない（p. 89）、と述べられているだけで、具体的な数値の記載は無い。本検証では、移動方向と風速・幅・長さ等との相関はほとんど無いことから、方向は一樣だと仮定した。

発電所施設の規模は、参考文献1の表2.1.2.1（p. 65）（表6参照）に記載されているが、具体的な設定方法に関する記述は見当らない。そこで同表を参考に、建屋の総面積（約11万 m^2 ）程度となる一辺333mの正方形構造物とした（参考文献1では、原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換機建屋はそれぞれ4棟、コントロール建屋は2棟としている）。

なお、参考文献1では、風速積分範囲を116.2m/sまでとして後に示す図5-5を求めている。一方、本解析コードでは120m/sまでを積分範囲としている。

これらのハザード計算に関する条件を表7に示す。

表6 施設の寸法（参考文献1）

表 2.1.2.1 竜巻リスクの計算に用いた代表的な原子力発電所の主要施設の寸法

	平面寸法 (m)			平面寸法 (m)	
	南北	東西		南北	東西
原子炉建屋	80	79	活性炭式希ガス・ホール ドアップ装置建屋	39	38
タービン建屋	109	66	500kV 超高压開閉所	105	126
コントロール建屋	39	66	事務本館	48	108
サービス建屋	25	73	事務本館（厚生棟）	17	83
海水熱交換器建屋	97	40	事務本館（情報棟）	18	49
排気筒	49	49	高放射性固体廃棄物貯 蔵庫設備建屋	40	27
固体廃棄物貯蔵庫	29	120	使用済燃料輸送容器保 管設備建屋	56	19
廃棄物処理建屋	104	41			

表7 ハザード計算に関する条件

項目	CASE-A		CASE-B		備考	
	参考文献	本コード	参考文献	本コード		
元データ	気象庁「竜巻等の突風データベース」					
期間	1962年1月～2009年12月					
年発生数 (個)	平均	11.0	11.0	7.6	7.6	
	標準偏差	7.3	7.3	2.6	2.6	
風速 (m/s)	平均	31.5	31.5	33.7	33.7	
	標準偏差	10.4	10.4	12.1	12.1	
被害長さ (km)	平均	2.83	2.83	4.61	4.61	
	標準偏差	4.39	4.39	5.49	5.49	
被害幅 (m)	平均	101.8	101.8	161.8	161.8	
	標準偏差	158.8	158.8	205.5	205.5	
相関係数	風速と被害長さ	0.323	0.323	0.268	0.268	
	風速と被害幅	0.183	0.183	0.223	0.223	
	被害長さ と被害幅	0.471	0.471	0.363	0.363	
確率分布	発生数	ポリヤ	ポリヤ	ポリヤ	ポリヤ	
	風速	対数正規	対数正規	対数正規	対数正規	
	被害長さ	対数正規	対数正規	対数正規	対数正規	
	被害幅	対数正規	対数正規	対数正規	対数正規	
竜巻検討地域面積(km ²)	17,185.3	17,185.3	316,267.2	316,267.2		
移動方向	不明	一様	不明	一様	※	
施設規模	不明	333m四方 の 正方形	不明	333m四方 の正 方形	※	
V_{\min} (m/s)	不明	25	不明	25	※	
積分範囲	風速	116.2m/s	120m/s	116.2m/s	120m/s	※
	被害長さ	不明	60km	不明	60km	
	被害幅	不明	6km	不明	6km	

参考文献1に示された結果を図7に、検証ケース CASE-A、-Bの結果を図8に示す。また、表8に年超過確率 10^{-5} に相当する風速値を整理した。図7、8及び表8より、参考文献1の詳細な計算条件には不明な点もあることを考慮すると、ハザード曲線の傾向は概ね一致している。

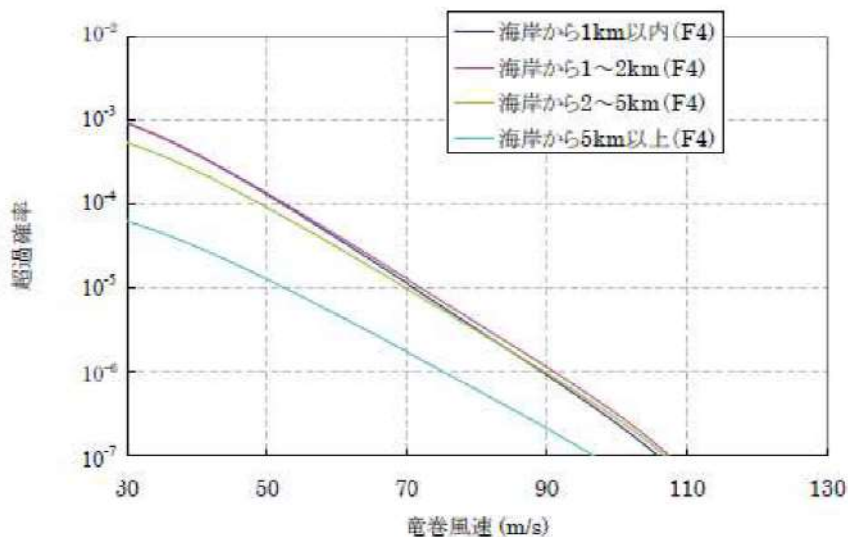


図7 ハザード算定結果 (参考文献1)

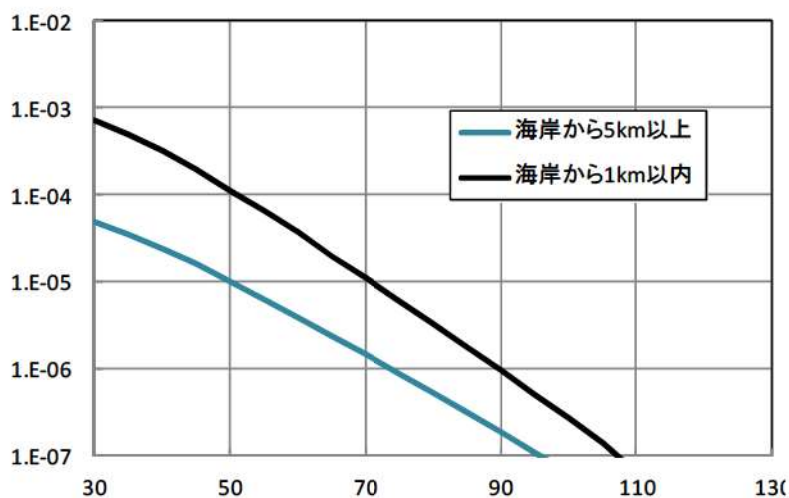


図8 ハザード算定結果 (本解析コード)

表8 検証結果の比較

ケース		年超過確率 10^{-5} 相当風速		差 (②/①)
		①参考文献1	②本解析コード	
CASE-A	海岸から1km以内	70.9m/s	70.7m/s	0.997
CASE-B	海岸から5km以上	52.0m/s	50.1m/s	0.963

ただし、表7に示すとおり、計算条件の一部は不明であることから、検証結果の妥当性について考察する。

まず、移動方向については、例えば移動方向と竜巻風速に相関があるとすると、ある特定の方向から移動してくる竜巻は強い（風速が大きい）傾向にあるということになるが、実際には参考文献1に記載のとおり、移動方向との相関は見受けられない。したがって、移動方向の取扱いの差異がハザードに与える影響はほとんど無いと考えられる。

次に、ハザードへの寄与という観点で、竜巻パラメータの評価を行う。移動方向を考慮しない場合の被害面積の期待値の算定式が、上述した式(10)であり再掲する。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] = & \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 & + D_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw \\
 & + (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^{\infty} f(V) dV
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\text{第1項} : \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl$$

$$\text{第2項} : D_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} l f(V, l) dV dl$$

$$\text{第3項} : D_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw$$

$$\text{第4項} : (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^{\infty} f(V) dV$$

として、泊発電所の竜巻影響評価における、被害面積期待値の算定結果を図9に示す。この図より、例えば、竜巻風速70m/sのところを見ると、第1～4項に対応する面積がそれぞれ、 $1.01 \times 10^{-4} \text{km}^2$ 、 $9.87 \times 10^{-3} \text{km}^2$ 、 $1.37 \times 10^{-4} \text{km}^2$ 、 $1.60 \times 10^{-3} \text{km}^2$ 、第1～4項を足し合わせて $1.26 \times 10^{-2} \text{km}^2$ 、となっており、第1項が支配的な要因であることがわかる。

これは、第1項と第2項には被害長さに関係していることに起因している。被害長さはkm単位

の数値であり、第3項及び第4項に関係する被害幅や施設規模等100m単位の数値とオーダーが異なるため、寄与度に差が生じている。したがって、表7において条件の整合が確認できない V_{min} （被害幅のパラメータの一つ）や施設規模の差異がハザードに与える影響は小さいと考えられる。

以上より、風速と被害長さに関する条件は合致していることから、ハザード計算は一定の再現性は有していると考えられる。

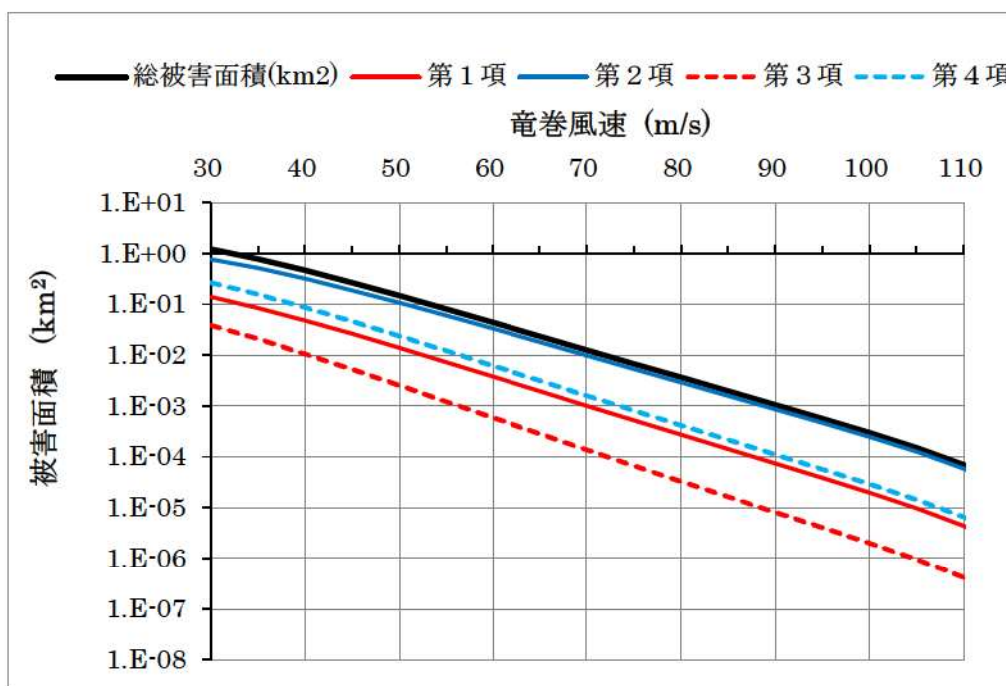


図9 被害面積期待値（海岸線から陸側海側それぞれ5 kmを対象としたケース）

（参考）当社竜巻影響評価に基づく V_{min} と施設規模の影響度について

V_{min} と施設規模の影響度について、当社の竜巻影響評価を基に評価すると、泊発電所の竜巻影響評価では、 V_{min} を25m/sにて検討しているが、 V_{min} を17m/sとした場合に例えば、海岸線から陸側海側それぞれ5 kmを対象としたケースでは、ハザード曲線の 10^{-5} 相当風速は、67.7m/s ($V_{min}=17$ m/sの場合)、67.9m/s ($V_{min}=25$ m/sの場合)であり、 V_{min} の8m/sの差異がハザードでは0.2m/s程度の影響を与えている。

施設規模の影響については、泊発電所は $D_0=920$ mで評価を行っているが上記と同様に例えば $D_0=940$ mとした場合、海岸線から陸側海側それぞれ5 kmを対象としたケースのハザード曲線の 10^{-5} 相当風速と比較すると、67.9m/s ($D_0=920$ mの場合)、68.1m/s ($D_0=940$ mの場合)であり、 D_0 の20mの差異がハザードでは0.2m/s程度の影響を与えている。

V_{min} と施設規模の差異を定量的に評価することは困難であるものの、これらの評価結果から類推すると、 10^{-5} 相当風速で数m/s程度の差異が生じる可能性があると考えられる。

6. 妥当性確認

「竜巻ハザード評価プログラム」は、竜巻最大風速のハザード曲線を算定するために使用している。

本解析コードは、竜巻最大風速のハザード曲線の算定を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。また、竜巻最大風速110m/s程度の範囲においては算定結果が妥当であることを確認している。以上より、本計算機コードを用いることは妥当である。

参考文献

- (1) 東京工芸大学(2011)：平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究
- (2) 豊川裕之・柳井晴夫編著：医学・保健学の例題による統計学，現代数学社，1982

(2) 竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価

項目	コード名 TONBOS
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver.3 選定理由：解析時の最新バージョン
使用目的	竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価
コードの概要	<p>一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>空気中の物体が受ける抗力による運動を計算することで、竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を解析することができる解析コードであり、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等の算出が実施できる。</p> <p>仮定する風速場は、鉛直方向には構造が変化しないランキン渦としている。</p>
検証及び妥当性確認の内容	<p>TONBOSは、竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用している。</p> <p>【検証の内容】</p> <p>本解析コードの検証の内容は次の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Simiu & Scanlan[※]による解析結果と同じ条件下で、竜巻風速場での飛来物軌跡の解析を実施し、概ね一致した結果を得ていることから、本解析コードの妥当性を確認した。 <p>※：E. Simiu & R.H. Scanlan: Wind Effect on Structures, Wiley, 1977</p> <p>【妥当性確認】</p> <p>TONBOSを、竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用することは、次のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。 ・ 評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。
その他（工認実績等）	<p>既工認での実績はない。</p> <p>なお、最新バージョンまで算出に影響のある変更がないことを確認している。</p>

計算機コードの概要及び検証と妥当性確認の内容説明

TONBOS

目 次

1. 概要	添付資料3.14-23
2. 本計算機コードの特徴	添付資料3.14-23
3. 解析手法	添付資料3.14-24
3. 1 基礎方程式	添付資料3.14-24
3. 2 飛来物運動方程式の時間積分法	添付資料3.14-25
3. 3 評価条件	添付資料3.14-27
3. 4 適用範囲	添付資料3.14-28
4. 解析フローチャート	添付資料3.14-29
5. コードの検証	添付資料3.14-29
5. 1 移動する竜巻での検証	添付資料3.14-30
5. 2 国内最大級相当条件での比較	添付資料3.14-31
5. 3 飛散距離及び飛散高さについて	添付資料3.14-32
6. 妥当性確認	添付資料3.14-32
7. その他	添付資料3.14-34
7. 1 飛来物の速度及び飛散距離等の評価について	添付資料3.14-34
8. 参考文献	添付資料3.14-36
9. 付録	添付資料3.14-37

1. 概要

本資料は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されている計算機コード「TONBOS」の概要である。

TONBOSは、新規制基準で新たに評価を要することとなった竜巻影響評価のうち、飛来物の速度及び飛散距離等を算出することを目的として使用する解析コードである。

本解析は、新規制基準で新たに評価を要することとなった竜巻影響評価のうち、飛来物の速度及び飛散距離等の評価を行うものであり、竜巻による風速場は鉛直方向には構造が変化しないランキン渦が移動するものとして定め、飛来物を質点系モデルとして、飛来物が（流体）抗力と重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことが可能な計算機コードを適用したものである。

2. 本計算機コードの特徴

TONBOS は、竜巻による風速場は鉛直方向には構造が変化しないランキン渦が移動するものとして定め、飛来物を質点系モデルとして、飛来物が（流体）抗力と重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことにより、飛来物の速度、飛散距離及び飛散高さ等を算定する計算機コードである。

3. 解析手法

3. 1 基礎方程式

(a) 竜巻の風速場

竜巻の風速場は x 軸方向に一定速度 V_{tr} で移動するランキン渦でモデル化する。ランキン渦の接線風速（周方向風速） V_θ ，径方向（中心方向）風速 V_r ，上昇風速 V_z は E. Simiu and M. Cordes⁽¹⁾ と同様に以下の式で定義する（図1）。

$$V_r = af(r) \quad (1a)$$

$$V_\theta = bf(r) \quad (1b)$$

$$V_z = cf(r) \quad (1c)$$

ただし、 $a=1/\sqrt{5}$ ， $b=2/\sqrt{5}$ ， $c=4/3\sqrt{5}$ と定義し、周方向風速 V_θ と径方向風速 V_r を合成した渦の水平速度 $f(r)=(V_\theta^2 + V_r^2)^{1/2}$ は、以下の式で定義される。

$$f(r) = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m & \text{if } 0 \leq r \leq R_m \\ \frac{R_m}{r} V_m & \text{if } R_m \leq r \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 r は渦中心からの距離、 R_m は最大風速半径（渦の水平風速が最大となる半径）、 V_m は渦の最大水平風速である。

時刻 $t=0$ で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は飛来物の影響を受けないと仮定すると、時刻 t における竜巻の風速場 V_w の各風速成分 (u, v, w) は式(1a)-(1c)、(2)等から以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{f(r)}{r} \begin{pmatrix} -a(x - V_{tr}t) - by \\ -ay + b(x - V_{tr}t) \\ cr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、渦中心からの距離 r は以下で与えられる。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr}t)^2 + y^2} \quad (4)$$

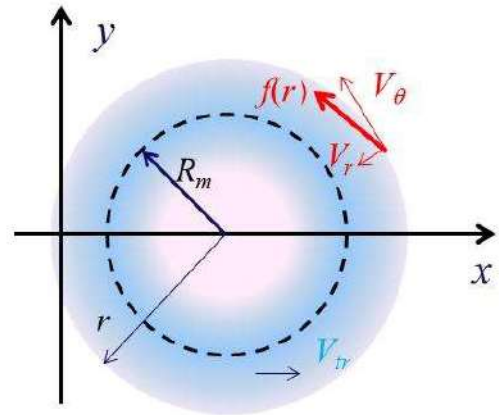


図1 移動ランキン渦モデル

なお、静止する観測者からみた最大風速 V_D は、以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_{tr} \quad (5)$$

(b) 飛来物の運動

飛来物の運動は、既往研究⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）と重力のみが外力として作用すると仮定する。この場合の飛来物の運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} \quad (6)$$

ここで、各変数は以下で定義する。

\mathbf{V}_M : 飛来物の速度ベクトル

\mathbf{V}_w : 風速ベクトル（ランキン渦風速と移動速度の和）

ρ : 空気密度

C_D : 飛来物の平均抗力係数

A : 飛来物の代表見附面積

m : 飛来物の質量

g : 重力加速度

\mathbf{k} : 鉛直上向き単位ベクトル

3. 2 飛来物運動方程式の時間積分法

時刻 t における竜巻の風速場 $\mathbf{V}_w = (u, v, w)$ は式(3)で与えられるので、式(6)を時間積分することによって、飛来物の速度と位置の時刻歴を求めることができる。

線形加速度法では、時刻 τ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度が線形に変化するものと仮定する。つまり、式(6)において、以下の式が成立する。

$$\frac{d\mathbf{V}_M(t)}{dt} = -\mathbf{A}(\tau) \frac{t - \tau - \Delta\tau}{\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{t - \tau}{\Delta\tau} \quad (7)$$

ここで、ベクトル $\mathbf{A}(\tau)$ は式(6)の右辺を表す。

式(7)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M(t) = & \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \\ & - \mathbf{A}(\tau) \frac{(t-\tau-\Delta\tau)^2}{2\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau) \frac{(t-\tau)^2}{2\Delta\tau} \end{aligned} \quad (8)$$

さらに、式(8)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(t) = & \mathbf{X}_M(\tau) - \mathbf{A}(\tau) \frac{(\Delta\tau)^2}{6} \\ & + \left[\mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \right] (t-\tau) \\ & - \mathbf{A}(\tau) \frac{(t-\tau-\Delta\tau)^3}{6\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau+\Delta\tau) \frac{(t-\tau)^3}{6\Delta\tau} \end{aligned} \quad (9)$$

したがって、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における速度と位置は以下で与えられる。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \frac{\Delta\tau}{2} [\mathbf{A}(\tau) + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = & \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau \\ & + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau^2}{3} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{\Delta\tau^2}{6} \end{aligned} \quad (11)$$

式(10),(11)の右辺は以下の時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度 $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を含んでいる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) = & k \left| \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) \right| \\ & \times \left\{ \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) \right\} - \mathbf{gk} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $k = \rho C_D A / 2m$ を表す。

このため、非線形式(12)では竜巻風速場も未知であるので、これも同時に連成させる必要がある。これらの方程式をNewton-Raphson法で求解し、時間積分を実施する。

時刻 $\tau + \Delta\tau$ において飛来物速度 $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ とその位置 $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = (X_M, Y_M, Z_M)$ を求めるために満足すべき式は、式(10),(11),(12)及び以下の竜巻の風速場のモデル方程式である。

$$\mathbf{V}_w = \frac{f(r_M)}{r_M} \begin{pmatrix} -a\{x_M - V_r(\tau + \Delta\tau)\} - by_M \\ -ay_M + b\{x_M - V_r(\tau + \Delta\tau)\} \\ cr_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$r_M = \sqrt{\{x_M - (\tau + \Delta\tau)V_r\}^2 + y_M^2} \quad (14)$$

3. 3 評価条件

以下の初期条件を設定する。

- 竜巻風速場 (図3.1)

竜巻の最大水平風速 (V_m) が85m/sとなる風速場を設定する。

竜巻移動速度 (V_{tr}) は15m/sとする。

最大風速半径 (R_m) は30mとする。

高さ40mに51×51ケの物体を配置する。

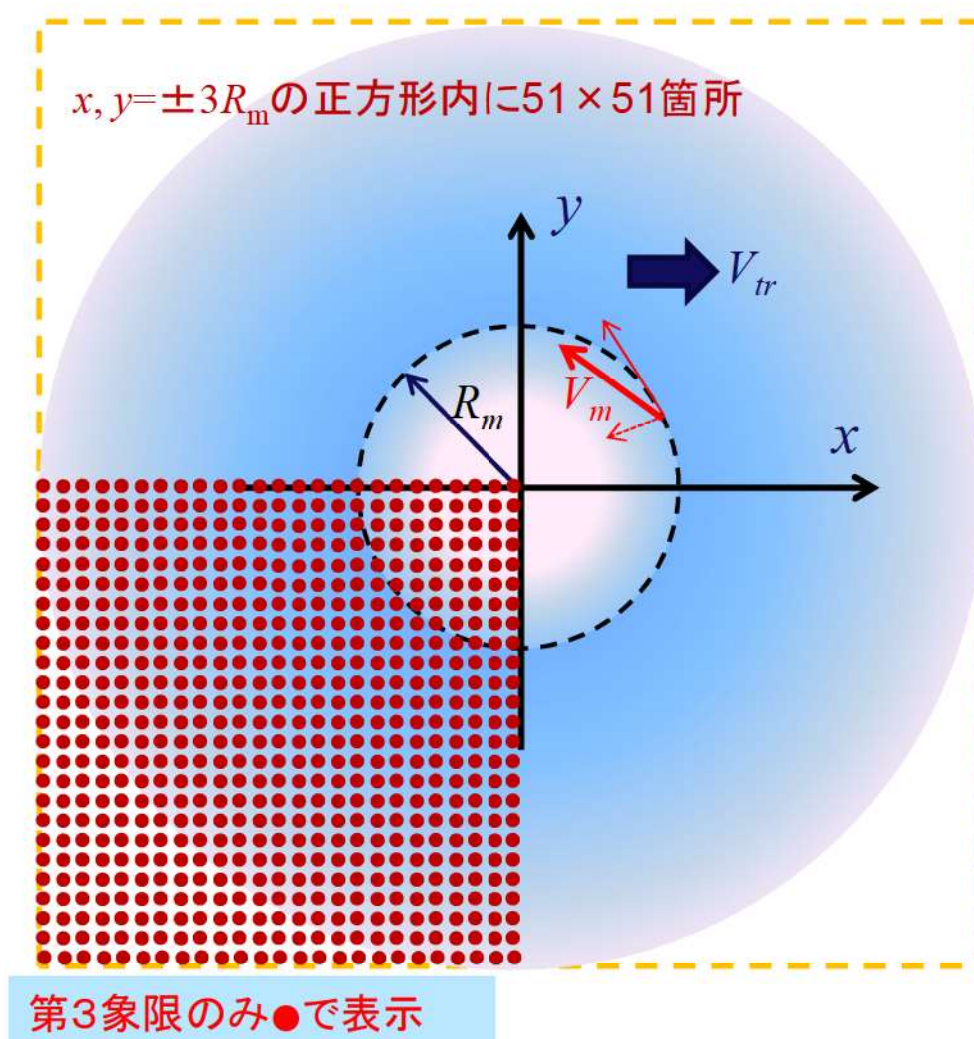


図3.1 竜巻の風速場及び初期物体位置

・飛散距離及び飛散高さ

図3.2に示すとおり、飛散距離は初期位置からの距離とし、飛来物が地表面に落ちた場合は、それ以上移動しないものとする。飛散高さは40m以上の位置に上がる場合は40mからの相対高さとし、40mより上がらない場合は0mとする。

2,601ヶ (51×51) の算出結果のうち、飛来物の速度及び飛散距離の最大値を解析結果として採用する。

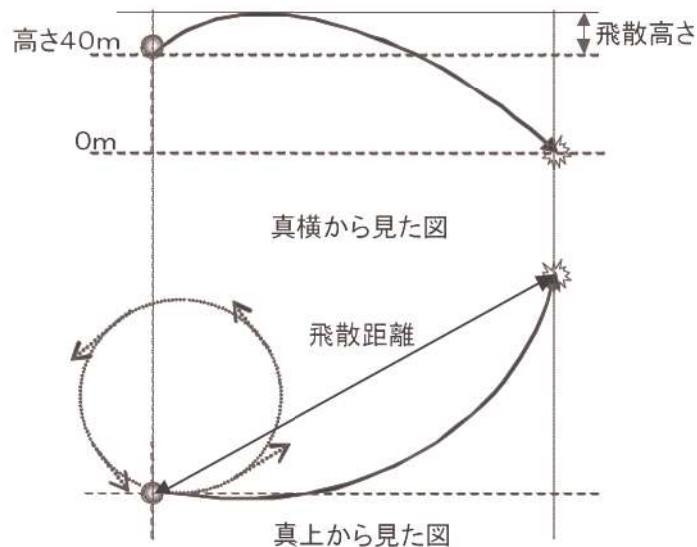


図3.2 飛散距離及び飛散高さ

3. 4 適用範囲

解析は以下の条件で実施することとする。

- ・最大風速：150m/sを原則とする。
- ・最大水平風速：本解析では最大風速との比を0.85とする。(これに限定する必要はない。)
- ・竜巻中心の移動速度：本解析では最大風速の比を0.15とする。(これに限定する必要はない。)
- ・最大風速半径：本解析では30mとする。(これに限定する必要はない。)
- ・空力パラメータ：制限はない。
- ・解析時間刻み：0.01秒以下
- ・重力加速度：9.8m/s²
- ・空気密度：1.22kg/m³

4. 解析フローチャート

図4.1に解析フローチャートを示す。

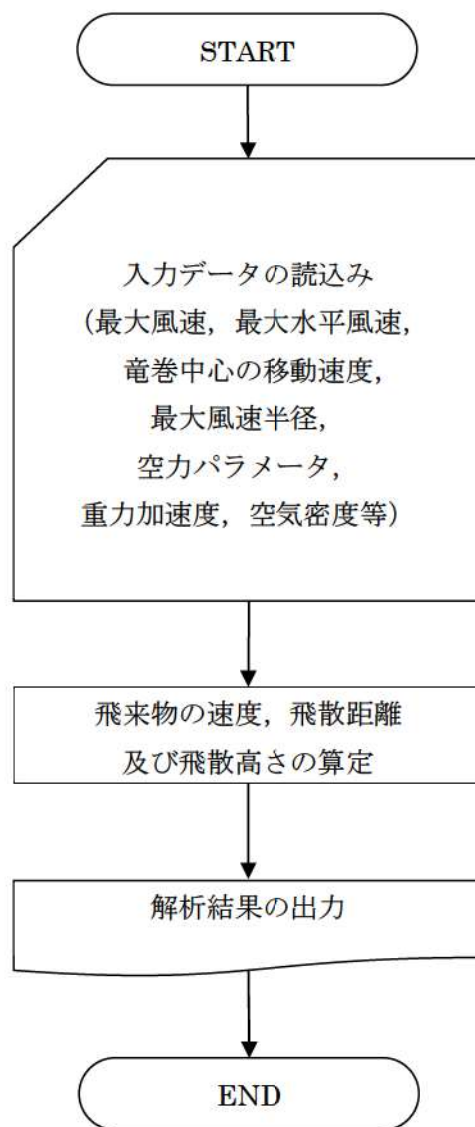


図4.1 解析フローチャート

5. コードの検証

5. 1 移動する竜巻での検証

Simiu and Scanlan⁽²⁾は、初速ゼロの飛来物が座標($R_m, 0, 40$)[単位：m]に位置するものとして飛来物の運動を計算し、飛来物が地上に落下するまでに達した最大の水平速度を「飛来物最大水平速度」と定義して数値解析結果を得ている。そこで、これと同様に表5.1に示す3種類の竜巻条件 (Tornado Type-I, -II, -III) を与えて、TONBOSによって「飛来物最大水平速度」 V_{hmax} を求めた。

なお、表5.1の各条件は文献(2)のTable 3.5.1(p.127)に記載されている値を[mph]から[m/s]へ、[ft]から[m]に換算したものである。

物体特性値 $C_D A/m$ については、文献(2)のTable 16.3.1 (p.565)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.0033, 0.0040, 0.0043, 0.0052, 0.0070, 0.0270[m^2/kg]$) 及びTable 16.3.2 (p.567, Tornado Type-I)のケース(a)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.001, 0.01[m^2/kg]$) を選定して検証した。なお、全ケースで時間ステップ $\Delta\tau$ を0.01[s]に設定した。また、空気密度 ρ は $1.226[kg/m^3]$ 、重力加速度 g は $9.8[m/s^2]$ とした。

図5.1に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する「飛来物最大水平速度」 V_{hmax} を文献(2)の結果と比較して示す。本数値解析の V_{hmax} の結果は文献(2)よりもやや大きい傾向^{*}にある。評価においては保守側となる。

表5.1 3種類の竜巻条件 (Tornado Type-I, -II, -III)

竜巻条件	最大水平風速 V_m [m/s]	竜巻中心の移動速度 V_{tr} [m/s]	最大風速半径 R_m [m/s]
Tornado Type-I	129.6	31.3	45.7
Tornado Type-II	107.3	26.8	45.7
Tornado Type-III	84.9	22.4	45.7

※：数値解析法の違いによる相違と考えられる。

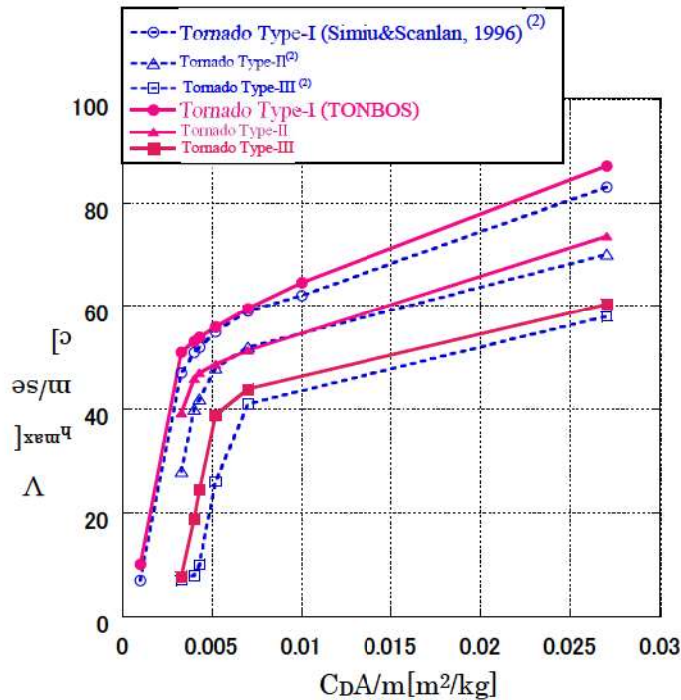


図5.1 Simiu&Scanlanとの比較

5. 2 国内最大級相当条件での比較

『東京工芸大学，“平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度)「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」”，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究 成果報告書，平成 23 年 2 月．(以下，「文献(4)」という。)』のp.237に示されている竜巻条件に相当する計算条件(表5.2)をTONBOSに与えて，「飛来物最大水平速度」 V_h^{\max} を求めた。文献(4)の竜巻風速場の生成方法は文献(3)と同様にLES解析結果に基づくものであるが，高さ40[m]のx, y方向に $\pm 3R_m$ の正方形の25×25箇所から飛来物を複数回，放出して V_h^{\max} を求めている。TONBOSでも，同様の位置から飛来物を放出して V_h^{\max} を計算した。図5.2に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する V_h^{\max} を文献(4)の結果と比較して示す。物体特性 $C_D A/m$ が小さい条件では，文献(4)の V_h^{\max} は本数値解析の V_h^{\max} の結果よりも小さい傾向にあるが，物体特性 $C_D A/m$ が大きい条件では逆の傾向となる。しかしながら，両者は良く整合することが分かる。

物体特性 $C_D A/m$ の大小によって V_h^{\max} の相対的な大小が逆転する理由としては， $C_D A/m$ が小さい場合は，LES解析の風速場の上昇速度がランキン渦に比べ小さく，水平方向に十分加速される前に早く落下するが， $C_D A/m$ が大きい場合は，物体が飛散しやすいため気流中の滞在時間が長くなり，LES解析の風速場の乱れの影響を受けて大きな飛来物速度とな

るためと考えられる。

表5.2 竜巻条件

最大接線風速 [m/s]	竜巻移動速度 V_{tr} [m/s]	最大風速半径 R_m [m/s]
84	16	30

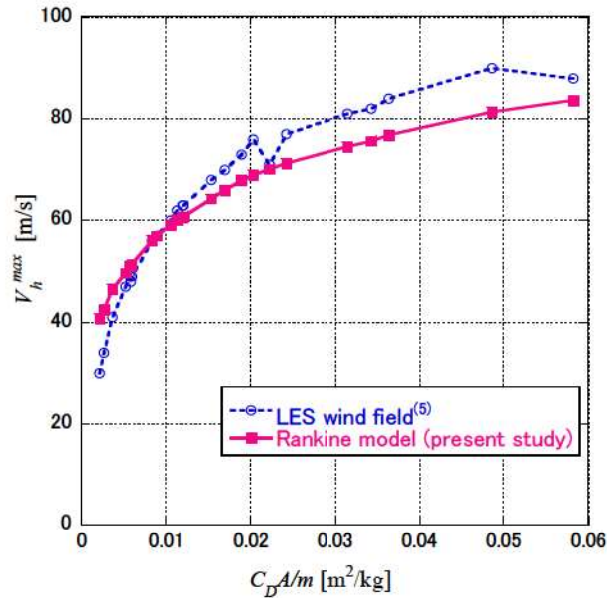


図5.2 文献(4)との比較

(備考) 「日本流体力学会年会，江口譲，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸：移動ランキン渦モデルによる竜巻飛来物の速度の評価，2013.」より抜粋。

5. 3 飛散距離及び飛散高さについて

飛散距離及び飛散高さについては，米国の解析結果では示されていないが，飛来物速度を積分することによりそれぞれの位置（飛散距離及び飛散高さ）が算出できる。飛来物速度が5.1及び5.2項で妥当であると検証していることから，飛散距離及び飛散高さについても妥当であると考えられる。

6. 妥当性確認

TONBOSを竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価に使用することは次のとおり妥当である。

- ・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の速度，飛散距離及び飛散高さの評価を目的に開発されたコードであり，使用目的が合致している。
- ・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

7. その他

7. 1 飛来物の速度及び飛散距離等の評価について

TONBOSを用いた解析により、空力パラメータと飛来物が地上に落下するまでに達した最大の水平速度 V_{h-max} 、最大飛散距離（x-y平面での初期位置と落下位置の距離で最大のもの）、最大高さ（全飛来物のうちで上昇量が最大のもの）の相関を算出している。（図7.1～7.2(a),(b)）

この相関を用いて発電所構内にある物品の飛来物の速度及び飛散距離等の評価を実施している。

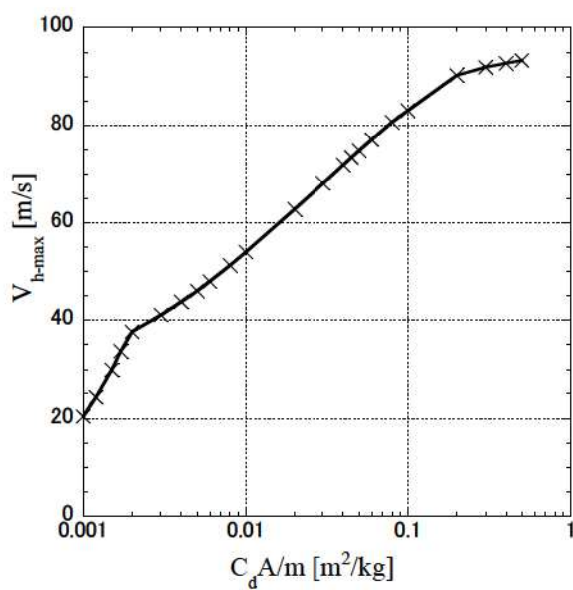
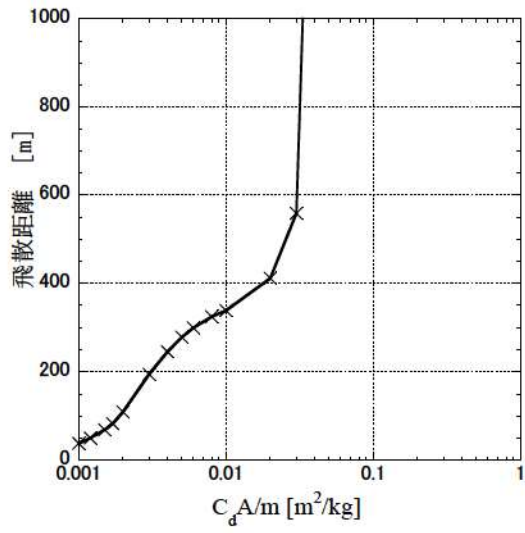
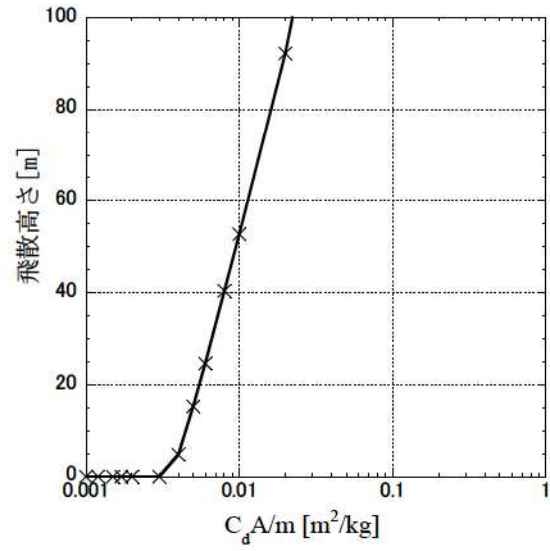


図7.1 100m/s竜巻条件での飛来物最大水平速度



(a)最大飛散距離



(b)最大飛散高さ

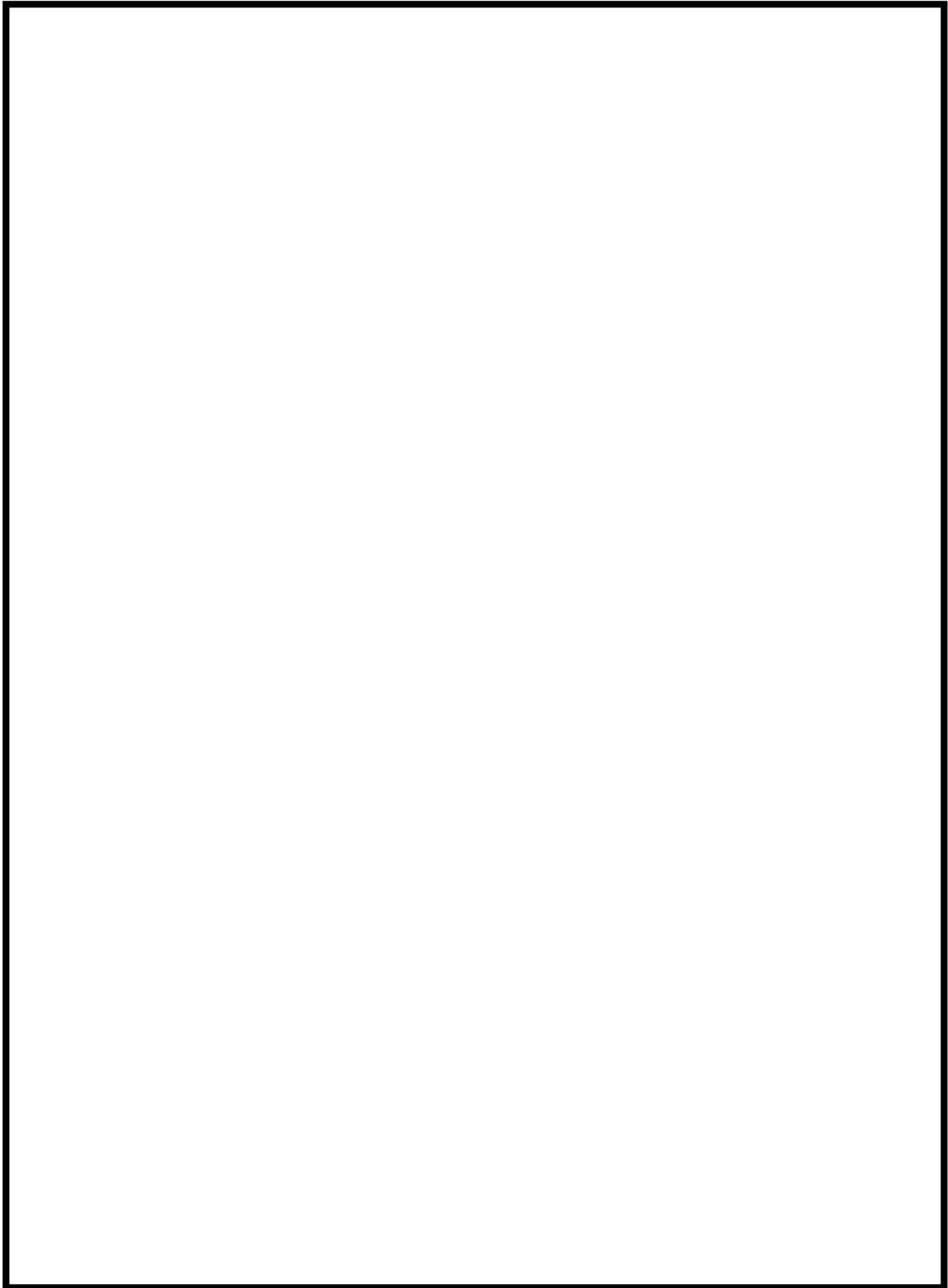
図7.2 100m/s竜巻条件でのx-y平面上での最大飛散距離と最大飛散高さ


8. 参考文献

- (1) Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976.
- (2) Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, August 1996.
- (3) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (4) 東京工芸大学, “平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究”, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究 成果報告書, 平成 23 年 2 月.
- (5) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (6) 丸山敬, “数值的に生成された竜巻状の渦の性質”, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 平成22年6月.


9. 付録

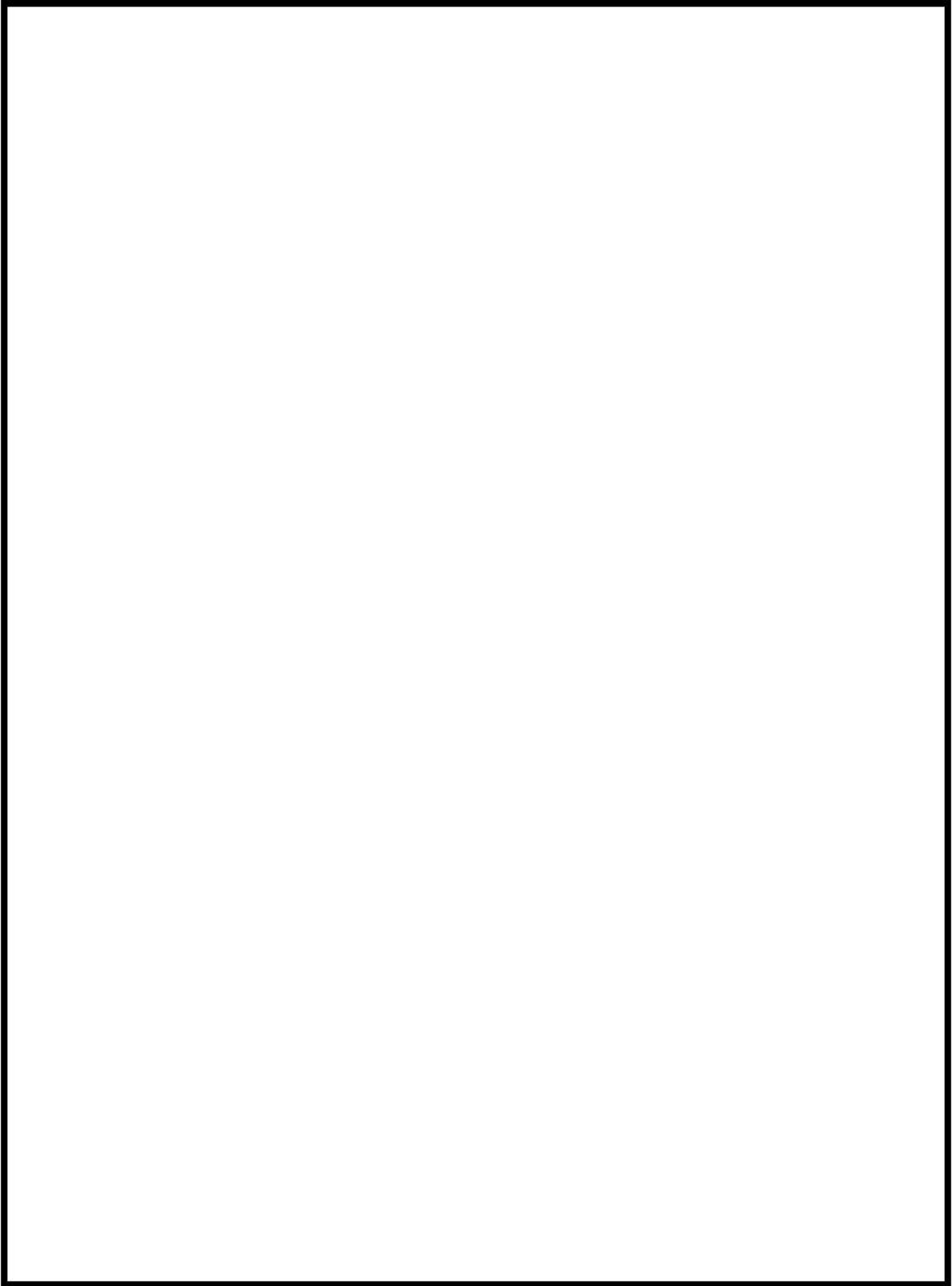
- (付録1) E. Simiu & R.H. Scanlan: Wind Effects on Structures, Wiley, 1977, (3rd. Edition 1996).
- (付録2) 東京工芸大学, “平成21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成22 年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究”, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 平成23 年2 月
- (付録3) 日本流体力学会年会, 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸: 移動ランキン渦モデルによる飛来物の速度の評価, 2013




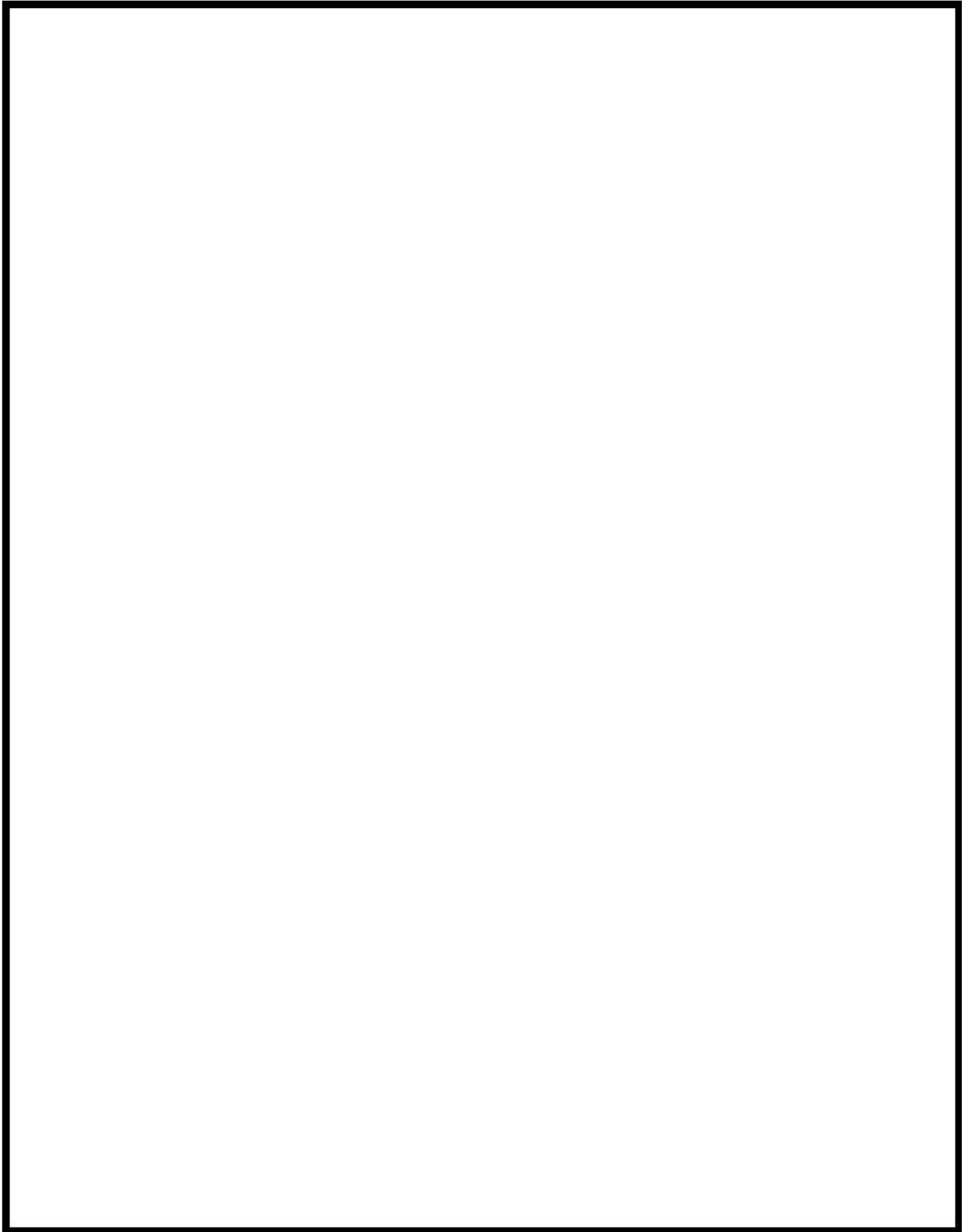
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




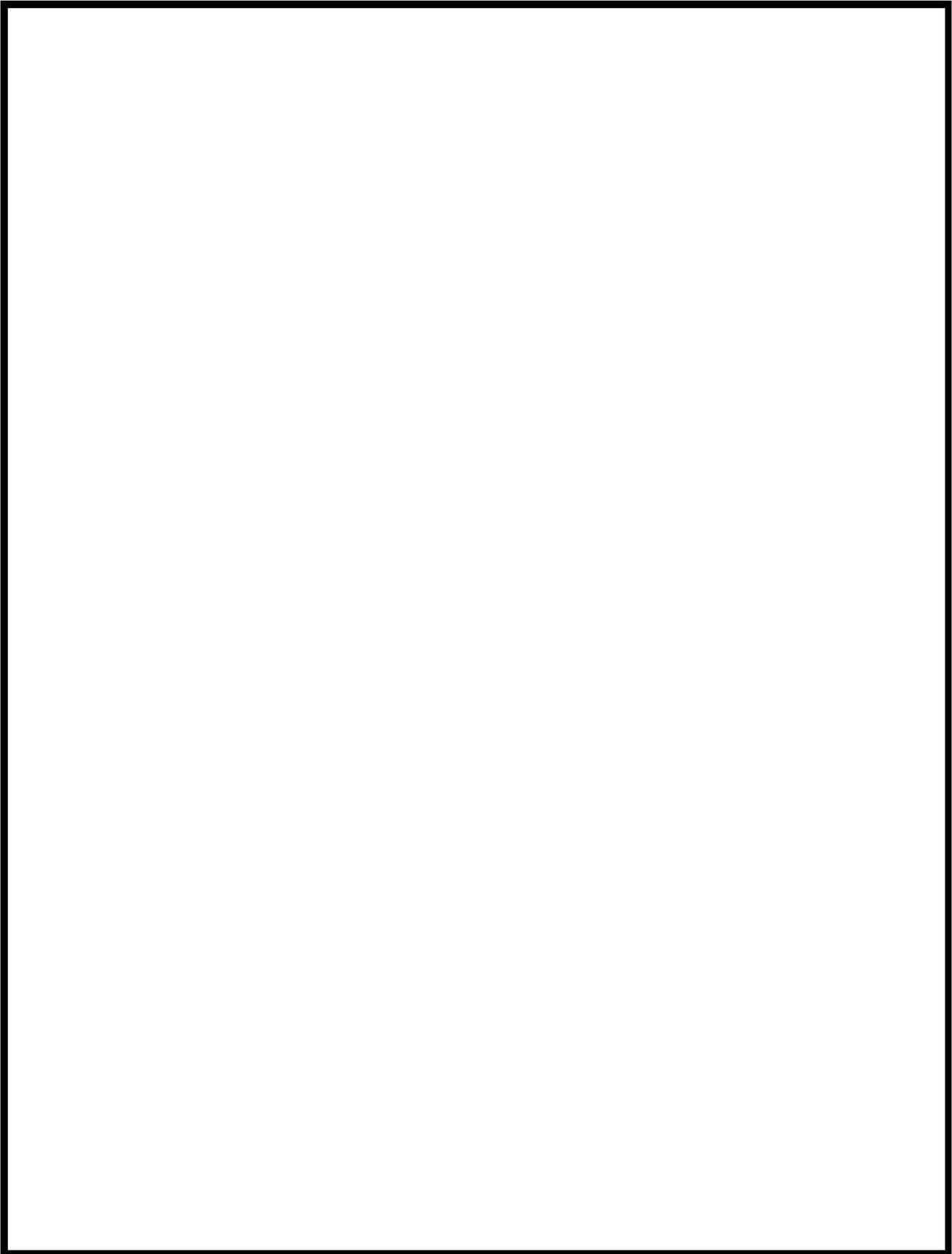
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




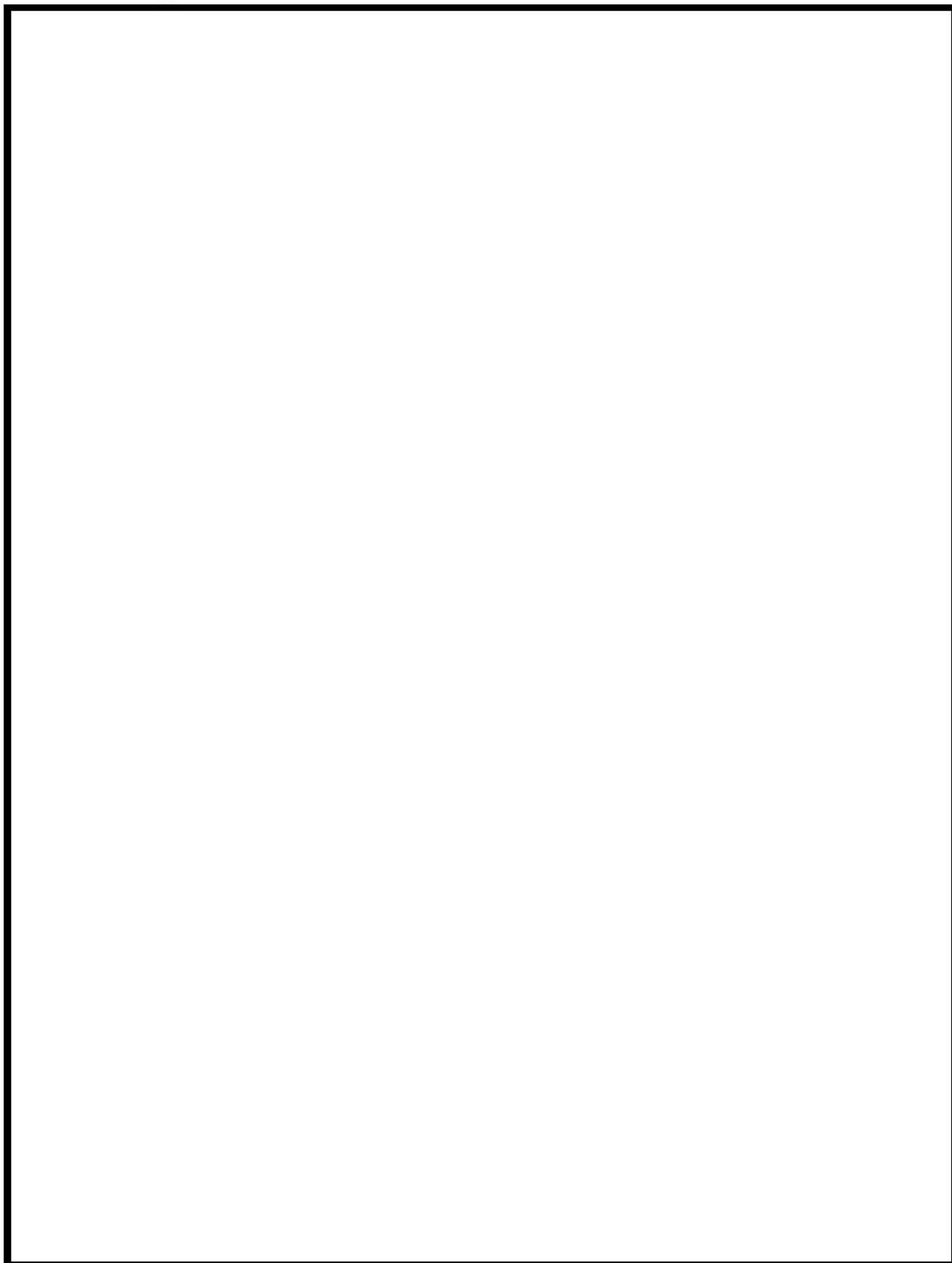
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




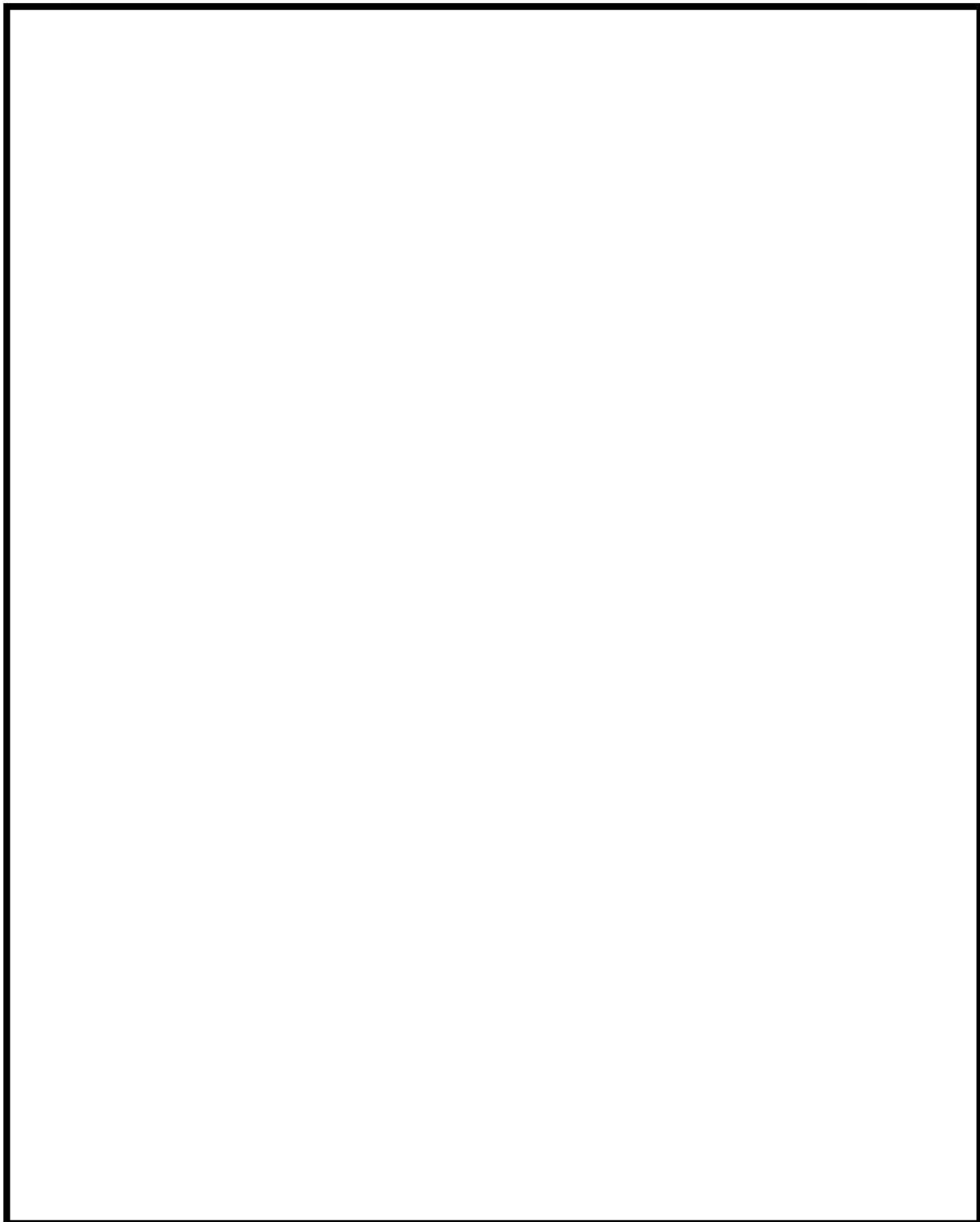
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




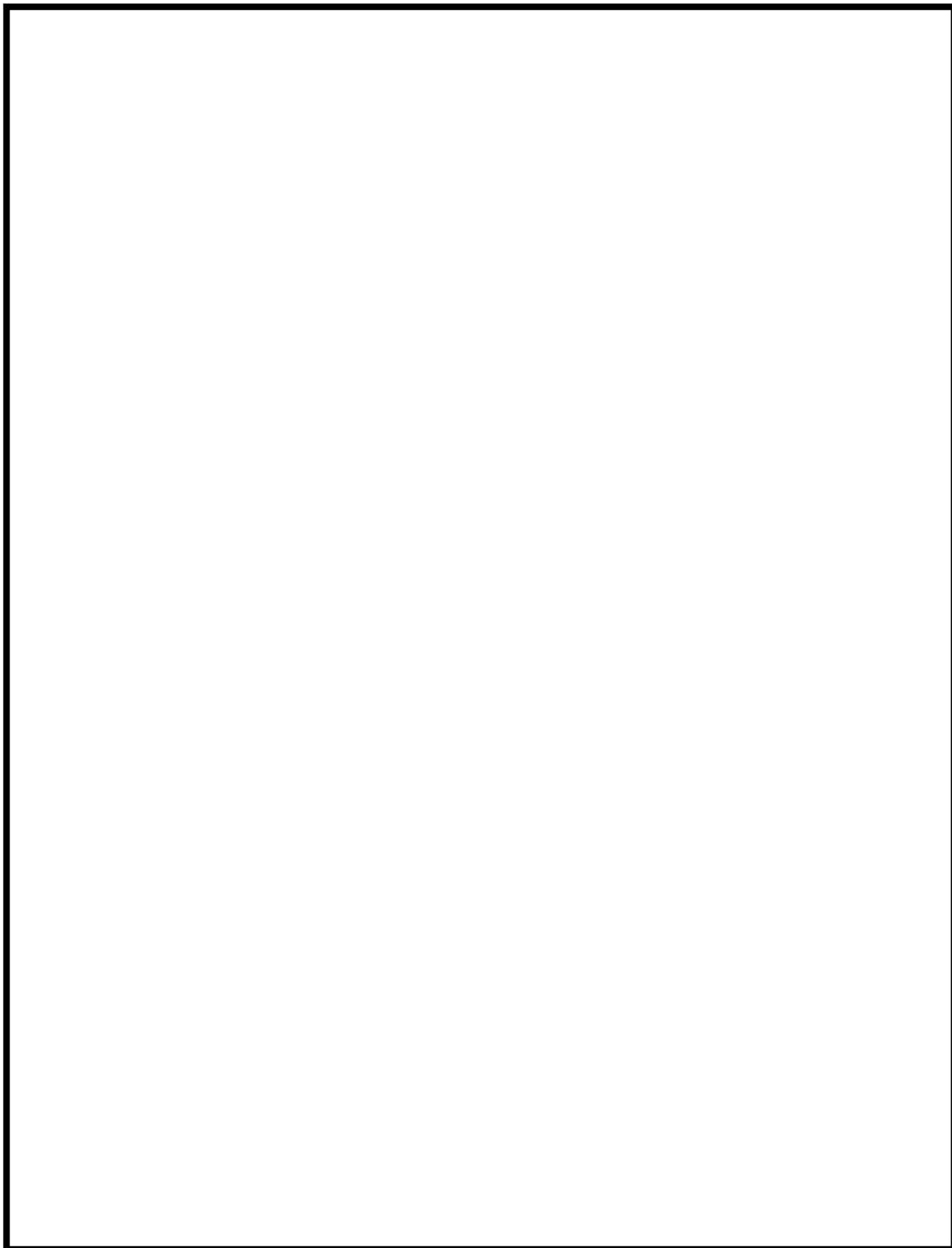
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




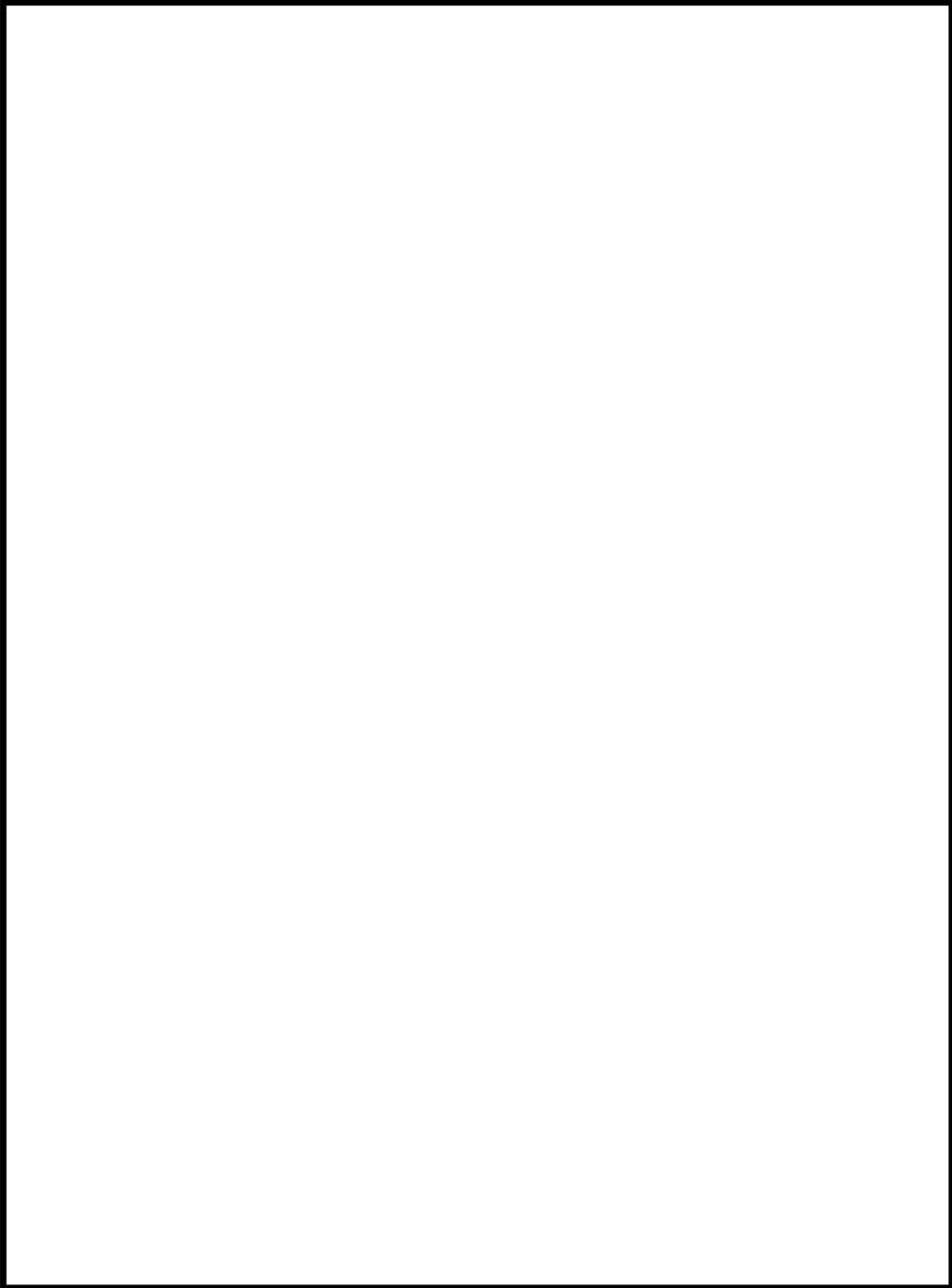
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




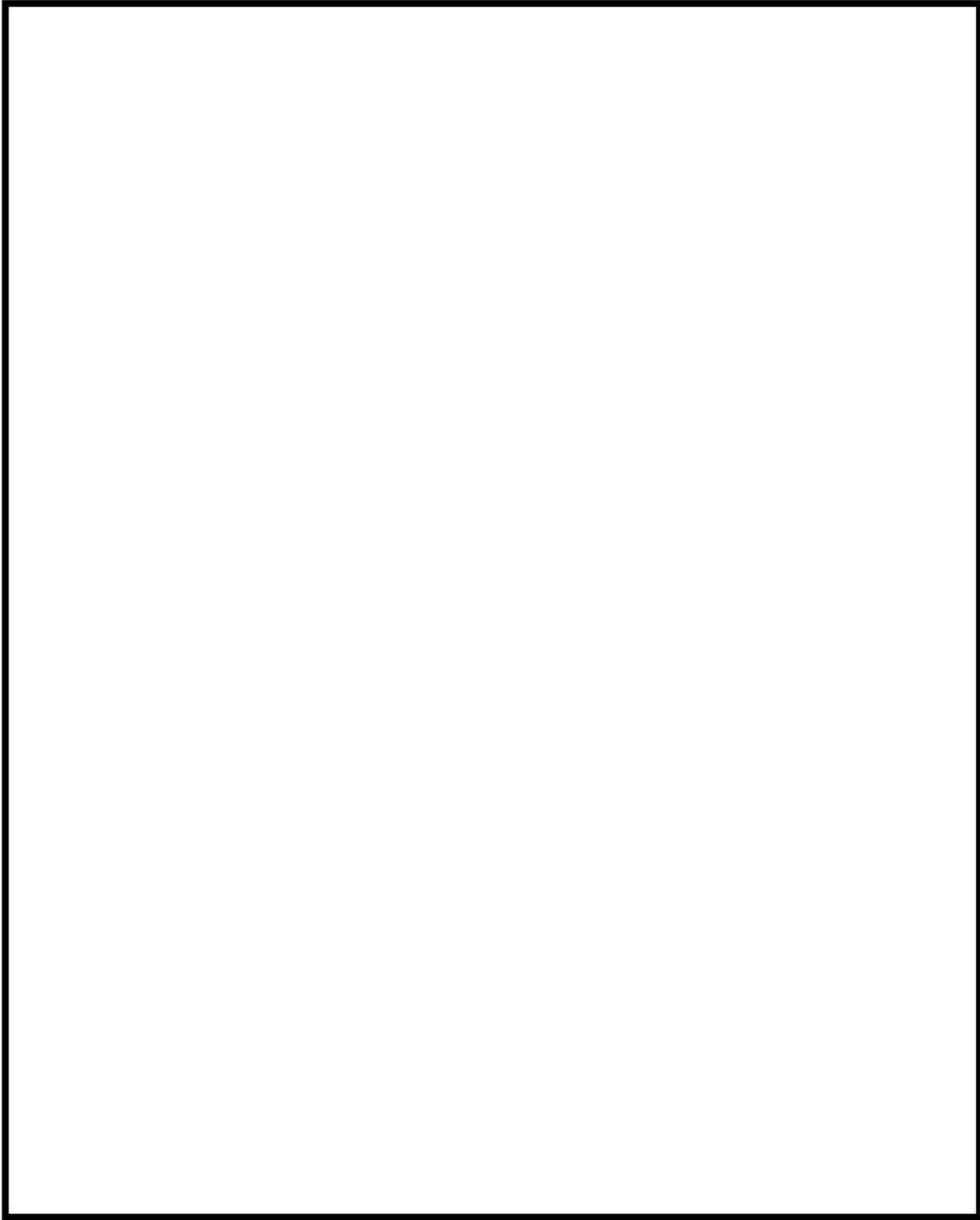
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

(付録2)

平成21～22年度原子力安全基盤調査研究

(平成22年度)

竜巻による原子力施設への影響に関する
調査研究

平成23年2月

東京工芸大学

2.2.3 竜巻等による飛散物

(1) 飛散物の衝撃速度に関する研究のレビュー

1) はじめに

竜巻中の飛散物の速度に関する研究は種々あるが、建物の壁を貫通するなど、高速の飛散物の速度をビデオ映像などの実際の飛散の様子から求めたものはほとんどない。いずれも被害の状況からの推定値であったり、飛散物を球や平板などの単純な形状と仮定した上で運動方程式をたて、物体が受ける空気力をモデル化して計算で求められたものである。その場合、飛散物の速度は物体の形状、重さ、物体の飛散開始位置（地面からの高さ、竜巻の渦に対する相対的な位置）、初期速度、また、竜巻の渦の移動速度や竜巻中の気流性状の違いによって様々に変化する。文献[1]の第16章3節には、これらについて過去の研究結果や観測結果を調べ、竜巻中の飛散物の速度の算出方法やその結果がよくまとめられているので、以下にその和訳を示す（一部省略、改変を行っている）。

2) 竜巻による飛散物の飛散速度、距離の導出方法

竜巻による空気力の作用のもとで移動する物体の速度を推定する際には、以下の点について幾つかの仮定を用いる。

- ・物体の空気力特性に関して。
- ・気流場の詳細な性状に関して。
- ・地面からの高さや竜巻中心からの物体の初期位置、および、物体の初期速度に関して。

原子力発電施設の設計に際して一般的に飛散物となる可能性のある物体は、木の厚板や綱棒、綱管、ポールや自動車などである。以下では、竜巻による飛散物の運動を数値シミュレーションに基づいて解く場合の問題に関する研究をレビューする。

3) 運動方程式と空気力学的モデル化

物体の運動は、通常3つの運動量の釣り合い式と3つのモーメントの釣り合い式を解くことによって記述することができる。非流線型物体（ブラフボディ）の場合、これらの6つの式を記述する際に主に問題となるのは、空気力をどのように与えればよいか判らないことである。

静的な条件下で物体に作用する空気力やモーメントを、風洞実験で平均風向に対して十分細かく風向を変えて測定することは可能である。そのような測定結果に基づき、風向角による空気力やモーメントの変化と対応する空気力係数が得られる。そして、翼理論で用いられるよく知られた方法に従って、空気力やモーメントを計算することができる。たとえば、一様流中で速度 V と風向角 α が一定で、翼が時間変化する鉛直方向の動きを $h(t)$ と

すれば、揚力係数は

$$C_L = \frac{dC_L}{d\alpha} \left(\alpha + \frac{1}{V} \frac{dh}{dt} \right) \quad (2.2.3.1)$$

と表される。空気力とモーメントを計算するこの方法は、対象となる物体の動きが小さいときに有効であると考えられるが、物体が拘束されずに気流中で運動するときにも、この方法が有効であることを示しておく必要がある。

飛散物を6自由度の剛体として空気力学的に記述するモデルとして満足できるものがないため、通常、次式で示される抗力に基づいた質点として飛散物を記述する方法がとられる。

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) \quad (2.2.3.2)$$

ここで、 ρ は空気密度、 \mathbf{V}_w は風速、 \mathbf{V}_M は飛散物の速度、 A は適切に選ばれた面積、 C_D は対応する抗力係数である。これは飛散物が運動している間、(1)相対的な速度ベクトル $\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M$ に対して、一定か、ほぼ一定な姿勢を保つこと、あるいは、(2)抗力 D の表現の中で、大きな誤差を伴わないで、 $C_D A$ の値としてある平均値が使えるような tumbling (回転しながら落下する) 運動をするときに適切なモデルとなる。竜巻の気流中にある非流線型物体では以下を仮定することは残念ながらほとんど無理であるが、空気力が常に物体の重心に正確に作用するか重心に対してゼロでない空力モーメントによって引き起こされる物体の回転が、物体一流体系に備わっている空気力によって抑制されるならば、流れに対して一定の姿勢を保つことが保証される。したがって、そのような力が作用するかどうかの問題となる。種々の文献をみると、この疑問に対する研究はこれまで徹底的にはなされていない。しかし、簡単な実験によると、ブラフボディの場合、空力的な減衰力は不安定化の効果をもっていることがうかがえ、文献[2]の風洞実験でもこの傾向が確かめられている。したがって、竜巻によって生じる可能性のある飛散物は tumbling 運動をするとみなしてよいであろう。

式(2.2.3.2)が成り立ち、tumbling 運動をしているときに平均的に流れ直角方向の力がないとすると、飛散物の運動は3自由度系となり以下の関係に支配される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} \quad (2.2.3.3)$$

ここで、 g は重力加速度、 \mathbf{k} は鉛直方向の単位ベクトル、 m は飛散物の質量である。流れ場と初期条件を与えると式(2.2.3.3)により物体の運動はパラメータ $C_D A/m$ のみに依存する。tumbling 運動をしている物体に対してはこのパラメータの値は、原理的に実験で決定することができるが、残念ながらこれに関して現在のところ使える情報はあまりない。文

献[3]には音速 0.5 から 3.5 の気流中の tumbling 運動に関する情報が含まれている。文献[3]のデータは文献[4]で、より低い亜音速領域に外挿されている。それによると、ランダムに tumbling 運動をしている立方体に対して $C_D A$ の値は、ほぼ、“確率的に取りうる可能性のある全ての姿勢に対する投影面積と、対応する静的な抗力係数の積の平均値に等しい”と仮定できる（文献 4）。実験的な情報がこれ以上ないので、 $C_D A$ の実効的な値が次式のように表されるとしてもよいであろう。

$$C_D A = c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3) \quad (2.2.3.4)$$

$C_D A = c(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)$ ここで、 $C_{Di} A_i$ ($i=1,2,3$) は物体の主軸がベクトル $\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M$ に平行なときに各軸方向の投影面積と対応する静的な抗力係数の積、 c は係数で、厚板、ロッド、パイプ、ポールに対する値としては 0.50、自動車に対しては 0.33 の値をとるとしているが、棒、パイプ、ポールなどの円筒形物体に対する $c=0.50$ は明らかに小さい。

4) 計算結果

竜巻による飛散物の軌跡と速度を計算し描画する計算プログラムが文献 5) に述べられている。このプログラムは竜巻の風速場のモデルとレイノルズ数の関数として変化する抗力係数を組み込んだサブルーチンを含んでいる。入力文は関連するパラメータと飛散物の運動の初期条件を含んでいる。

式(2.2.3.3)において \mathbf{V}_M と \mathbf{V}_w は絶対座標系で与える。風速 \mathbf{V}_w は通常 2 つの速度の和として与えられる。第 1 は、定常的な竜巻の渦による風速で円筒座標系で表される。第 2 は、基準となる絶対座標系に対する竜巻の渦の移動速度である。絶対座標系において \mathbf{V}_w を記述する変換は文献[5]で導かれており、計算プログラムに含まれている。

表 2.2.3.1 (文献[6]と表 2.2.3.2 に与えられたパラメータを使って、図 2.2.3.1 に示されるアメリカ合衆国における年間超過確率 10^{-7} に相当する竜巻強さの領域分け I, II, III (文献 6) に対応する、タイプ I, II, III (表 1 参照) の竜巻に対して、飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} が計算され、図 2.2.3.2 にパラメータ $C_D A/m$ の関数として与えられている。

表 2.2.3.1 設計基準竜巻の特性 (文献[9]より)

領域	最大風速m/s (mph)	移動速度 m/s (mph)	最大回転風 速 m/s (mph)	最大回転風 速半径m (ft)	気圧下降mb (psi)	気圧下降率 mb/s (psi/s)
I	103 (230)	21 (46)	82 (184)	45.7 (150)	83 (1.2)	37 (0.5)
II	89 (200)	18 (40)	72 (160)	45.7 (150)	63 (0.9)	25 (0.4)
III	72 (160)	14 (32)	57 (128)	45.7 (150)	40 (0.6)	13 (0.2)

表 2.2.3.2 選ばれた飛散物の特性と最大水平速度

	大きさ	重さ (lb/ft)	重さ (kg/m)	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}	C_{DA}/w (ft ² /lb)	C_{DA}/m (m ² /kg)	V_{Hmax} 竜巻タイプ		
									Type I	Type II	Type III
1 木の棒	3 $\frac{1}{2}$ " × 1 $\frac{1}{2}$ " × 12' (0.092 m × 0.289 m × 3.66m)	8.2 to 11 (e.g. 9.6)	12.2 to 16.3 (e.g. 14.3)	2.0	2.0	2.0	0.132	0.0270	272 ft/s (83 m/s)	230 ft/s (70 m/s)	190 ft/s (58 m/s)
2 鉄パイプ	6.625" (diam) × 15' length (0.168 m × 4.58 m)	18.97	28.18	0.7	2.0	0.7	0.0212	0.0043	171 ft/s (52 m/s)	138 ft/s (42 m/s)	33 ft/s (10 m/s)
3 自動車	16.4' × 6.6' × 4.3' (5 m × 2 m × 1.3m)	4000 lb (total wt)	1810 kg (total mass)	2.0	2.0	2.0	0.0343	0.0070	193 ft/s (59 m/s)	170 ft/s (52 m/s)	134 ft/s (41 m/s)
4 鋼棒	1" (diam) × 3' (length) (0.0254 m × 0.915 m)	2.67	4.0	1.2	2.0	1.2	0.0190	0.0040	167 ft/s (51 m/s)	131 ft/s (40 m/s)	26 ft/s (8 m/s)
5 鉄パイプ	13.5" (diam) × 35' (length) (0.343 m × 10.68 m)	27.5-36.5 (e.g. 32)	40.8-54.2 (e.g. 47.5)	0.7	2.0	0.7	0.0254	0.0052	180 ft/s (55 m/s)	157 ft/s (48 m/s)	85 ft/s (26 m/s)
6 鉄パイプ	12.75" (diam) × 15' (length) (0.32 m × 4.58 m)	49.56	73.6	0.7	2.0	0.7	0.016	0.0033	154 ft/s (47 m/s)	92 ft/s (28 m/s)	23 ft/s (7 m/s)

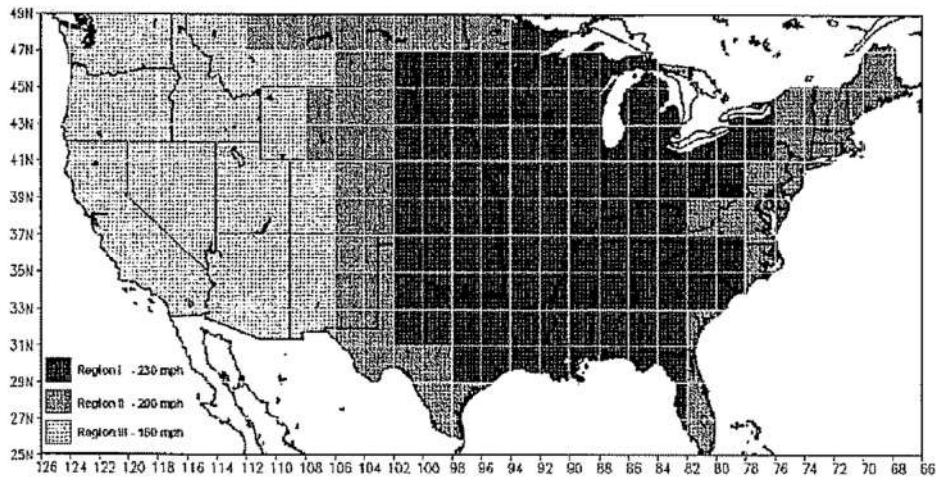


図 2.2.3.1 文献[6]よりアメリカ合衆国における年間超過確率 10^{-7} に相当する竜巻強さの領域に相当する 3 つの風速の分布を示す。横軸は経度(西経 66~126 度), 縦軸は緯度(北緯 25~49 度)

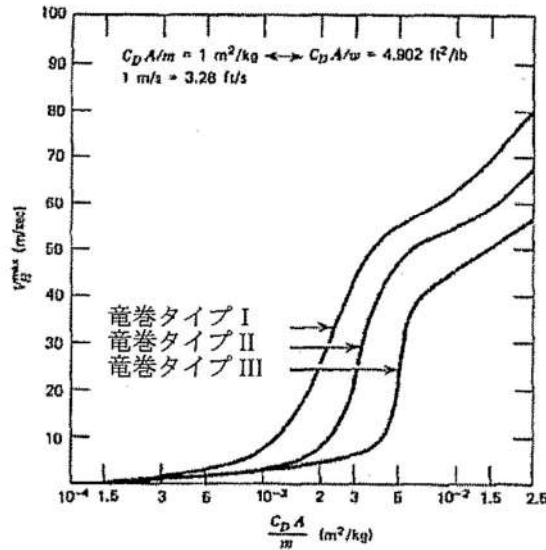


図 2.2.3.2 種々の竜巻のタイプに対して $C_D A/m$ の関数として与えられた飛散物の最大水平速度の変化.

これらの計算では以下の仮定が使われている.

- ・ 竜巻の接線方向風速 V_t は式(2.2.3.5)と(2.2.3.6)で記述される.

$$V_t = \frac{r}{R_m} V_m \quad (0 \leq r \leq R_m) \quad (2.2.3.5)$$

$$V_t = \frac{R_m}{r} V_m \quad (R_m < r < \infty) \quad (2.2.3.6)$$

- ・ 径方向風速 V_r と鉛直方向風速 V_z は次のように与える[文献 7]

$$V_r = 0.50 V_t \quad (2.2.3.7)$$

$$V_z = 0.67 V_t \quad (2.2.3.8)$$

- ・ 径方向成分は図 2.2.3.3 のように渦の中心方向を正とし鉛直方向成分は上方を正とする.
- ・ 竜巻の渦の移動速度 V_v は図 2.2.3.3 のように x 軸の正方向にとる.
- ・ 時刻 $t=0$ における初期条件は $x(0) = R_m$, $y(0) = 0$, $z(0) = 40\text{m}$, $V_{Mx}(0) = V_{My}(0) = V_{Mz}(0) = 0$ ここで, x, y, z は飛散物の重心を通る座標軸で, V_{Mx}, V_{My}, V_{Mz} はそれぞれ x, y, z 軸に沿う飛散物の速度である. $t=0$ における竜巻の中心は座標軸の原点にある. タイプ I の竜巻中で $C_D A/m=0.1$ の飛散物で計算された軌跡の水平投影図を図 2.2.3.4 に示す. 表 2.2.3.2 には選ばれた飛散物の推定される特性を挙げてある. また, 図 2.2.3.2 から得られた対応する水平速度 V_{Hmax} も示す.

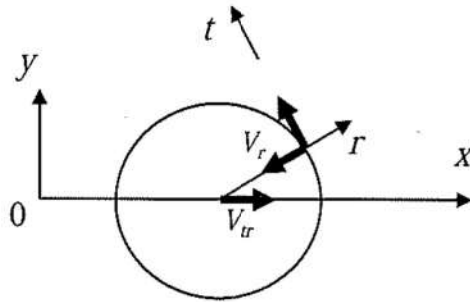


図 2.2.3.3 竜巻の風速の水平成分

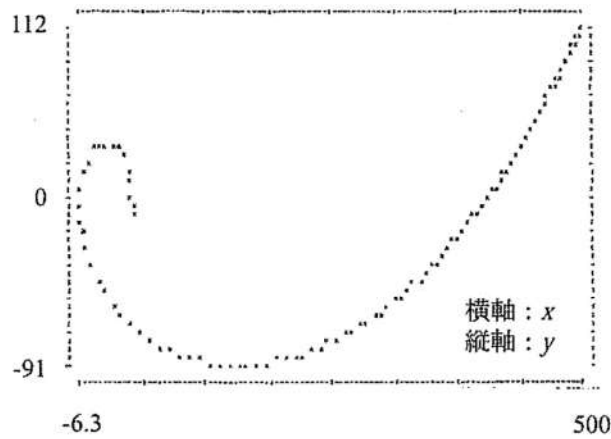


図 2.2.3.4 計算された飛散物の軌跡の水平投影図 (軸の表示は m)

5) 飛散物の最大水平速度の感度解析

運動モデルには不確実性が含まれるので、表に示された推定値の範囲で飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} の感度を調べることは興味のあることである。以下で考察する各ケースにおいて、全ての仮定は図 2.2.3.2 の竜巻のタイプ I に対して用いられたものと同じである。

(a) 初期条件 $x(0)$ と $y(0)$

$C_D A/m=0.001$ と $C_D A/m=0.1$ で初期条件 $x(0)$, $y(0)$ に対して得られた結果を 3 種類、表 2.2.3.3 に示す。表中の矢印は接線方向と竜巻の移動方向の風速の方向を示す。 V_H^{max} の計算された最大値に対応する初期位置は $C_D A/m$ により変化し、 $C_D A/m=0.001$ では位置(c), $C_D A/m=0.1$ では位置(b)となる。

表 2.2.3.3 種々の初期条件 $x(0), y(0)$ に対する飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} (m/s)

		$x(0)$	$y(0)$	$C_D A/m$	
		(m)	(m)	$= 0.001$	$= 0.01$
(a)		46	0	7	62
(b)		23	0	15	89
(c)		0	-46	51	67

(b) 初期高さ $x(0)$

計算によると、パラメータ $C_D A/m$ が図 2.2.3.2 の中央の S 型曲線に対応している場合には V_{Hmax} は初期高さが低くなるとともに小さくなる。しかし、飛散物が相対的に軽くてパラメータ $C_D A/m$ が左側の S 型曲線に対応している場合には V_{Hmax} は $x(0)$ には依存しない。

(c) 飛散物の初期速度

たとえば、爆発などによって飛散物が流の中に取り込まれた場合、初期速度がゼロという仮定は成り立たなくなる。他の条件が全て同じ場合、初期速度がゼロに対応した計算結果よりも初期速度がゼロでない場合が速くなることはない。表 2.2.3.4 に $V_{My}(0)=0, V_{Mz}(0)=0$ として、 $V_{Mx}(0)=0, 10, 20\text{m/s}$ の場合の結果を示す。これによると、 $C_D A/m=0.001$ では $V_{Mx}(0)=10\text{m/s}$ の方が $V_{Mx}(0)=10\text{m/s}$ の場合よりも V_{Hmax} は速くなっている。

(d) 竜巻の渦の移動速度 V_r

初期位置 $x(0), y(0)$ に対して、竜巻の渦の移動速度 V_r が減少するにつれて V_{Hmax} は増加したり減少したりする。たとえば、 $x(0)=46\text{m}, y(0)=0, C_D A/m=0.001$ の場合 $V_r=0$ ならば $V_{Hmax}=25\text{m/s}$ となり、表 2.2.3.3 にある $V_{Hmax}=7\text{m/s}$ (このとき $V_r=31\text{m/s}$) よりも速くなる。しかし、 $x(0)=0, y(0)=-46\text{m}, C_D A/m=0.001$ の場合 $V_{Hmax}=25\text{m/s}$ となり、表 2.2.3.3 にある $V_{Hmax}=51\text{m/s}$ よりも遅くなる。

表 2.2.3.4 種々の初期速度に対する飛散物の最大水平速度 V_{Hmax} (m/s)

		$x(0)$	$y(0)$	$C_D A/m = 0.001$			$C_D A/m = 0.01$		
				$V_{Mx}(0)$			$V_{Mx}(0)$		
				0	10	20	0	10	20
(a)		46	0	8	9	20	62	58	53
(b)		0	-23	35	45	35	63	59	59

(e) 渦の流のモデル

文献[8]と文献[9]に提案されている渦のモデルは、ここで使った半径 R_m が一定となるモデルとは異なっており、基本的に地面からの高さとともに直線的に半径 R_m は増加すると

仮定している。もし、このモデルが使われるならば、対応する飛散物の速度の計算結果はほとんどの場合、図 2.2.3.2 よりも速くなるということが文献[5]に示されている。

何人かの気象学者たちは、式(2.2.3.5)で示される速度よりもほとんどの竜巻の風速場において実際の竜巻の径方向の速度 V_r はかなり遅くなるという見解を示している。したがって、飛散物が多く運動量を獲得する高風速領域内の軌跡を計算するための径方向の抗力係数は相対的に小さくなり、飛散物の速度は図 2.2.3.2 の値よりもかなり遅くなる。実際の鉛直方向の風速は式(2.2.3.6)で得られるよりも遅いと考えられているので、飛散物はこの式に基づいて計算されたものより速く地面に落下しやすい。その結果として飛散物の速度も減少する(文献[5])。

竜巻による飛散物の速度の決定論的研究に関しては文献[10]から文献[16]を参照されたい。ANSI/ANS-2.3-1983 基準(文献[17])に明記された飛散物の速度を表 2.2.3.5 に示す。

表 2.2.3.5 ANSI/ANS-2.3-1983 基準(文献[17])に示された飛散物の最大水平速度を挙げる。

飛散物	重さ (pounds)	風速							
		320 mph	260 mph	250 mph	200 mph	180 mph	150 mph	140 mph	100 mph
自動車	4,000	115 mph	100 mph	95 mph	75 mph	65 mph	50 mph	45 mph	20 mph
ワイドフランジ	750	1,100 ft	850 ft	800 ft	600 ft	450 ft	200 ft	180 ft	100 ft
(W 14 × 30 か同等品)		100 mph	75 mph	70 mph	50 mph	45 mph	30 mph	25 mph	0 mph
		700 ft	440 ft	400 ft	200 ft	180 ft	100 ft	80 ft	0 ft

Source: Extracted from American National Standard ANSI/ANS-2.3-1983 with permission of the publisher, the American Nuclear Society.

移動ランキン渦モデルによる竜巻飛来物速度の評価

Evaluation of Tornado-borne Missile Speed using a Translating Rankine Vortex Model

○ 江口 譲, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, eguchi@criepi.denken.or.jp
 杉本 聡一郎, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, soichiro@criepi.denken.or.jp
 服部 康男, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, yhattori@criepi.denken.or.jp
 平口 博丸, 電中研, 千葉県我孫子市我孫子 1646, hiromaru@criepi.denken.or.jp
 Yuzuru Eguchi, Soichiro Sugimoto, Yasuo Hattori, and Hiromaru Hirakuchi.

Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko 1646, Abiko-shi, Chiba-ken, 270-1194 JAPAN

We have developed a numerical model to evaluate velocity of tornado-borne objects or missiles where wind of tornado is modeled with translating Rankine vortex and an object is assumed to be subject to drag and gravity forces in a manner similar to E. Simiu and M. Cordes (1976). In this study, effects of time integration scheme and time increment on accuracy are numerically examined and discussed. Furthermore, the results of tornado-borne missile speed are compared with those of the previous studies where tornado wind fields were defined by scaling an LES result obtained for a small experimental apparatus, to discuss the effect of the tornado wind features on the missile speed.

1. 序論

原子力発電所の安全審査においては、竜巻やその随伴事象が発生したとしても原子力発電所の安全性が維持されることが求められる。竜巻発生時には強風により浮上した物体が原子力発電施設に衝突する可能性があるため、竜巻に伴う飛来物の設計速度を定める必要がある。この竜巻飛来物評価方法として、米国の原子力規制委員会の規制ガイド⁽¹⁾では、E. Simiu⁽²⁾の方法と同様に、竜巻をランキン渦で簡易的にモデル化する方法が用いられている。一方、国内では、小規模な竜巻発生実験装置を対象とした非定常乱流解析で得られた数値解析結果に基づき、スケール則によって実規模竜巻の風速場に変換した非定常風速場を用いる方法が検討されている⁽³⁾。そこで、本研究では、まず E. Simiu and M. Cordes⁽²⁾と同様の竜巻風速モデルに基づいて飛来物速度を求めるための数値解析プログラム TONBOS を作成し、数値積分法や時間ステップ幅が飛来物速度に与える影響を明らかにする。次に、非定常風速場を用いる既往研究⁽³⁾で数値解析結果が提示されている問題を対象として、TONBOS を用いた数値解析を行い、これらの数値解析結果の比較により、竜巻風速場が飛来物速度に与える影響について議論する。

以下、2章では、本研究で開発した竜巻飛来物速度評価プログラム TONBOS の物理モデル（基礎方程式）とその数値解析スキームについて説明する。3章では、時間積分法や解析条件等が数値解析結果に与える影響について議論する。4章では、既往研究の数値解析結果⁽³⁾との比較により、竜巻風速場が飛来物速度に与える影響について議論する。

2. 数値解析の物理モデルと計算スキーム

2.1 基礎方程式

(a) 竜巻の風速場

竜巻の風速場はx軸方向に一定速度 V_x で移動するランキン渦でモデル化する。ランキン渦の周方向風速 V_θ 、径方向(中心方向)風速 V_r 、上昇風速 V_z は E. Simiu and M. Cordes⁽²⁾と同様に以下の式で定義する (Fig.1 参照)。

$$V_r = af(r), \quad V_\theta = bf(r), \quad V_z = cf(r) \quad (1a), (1b), (1c)$$

ただし、 $a=1/\sqrt{5}$, $b=2/\sqrt{5}$, $c=4/3\sqrt{5}$ と定義し、周方向風速 V_θ と径方向風速 V_r を合成した渦の水平速度 $f(r)=(V_\theta^2+V_r^2)^{1/2}$ は、以下の式で定義される。

$$f(r) = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m & \text{if } 0 \leq r \leq R_m \\ \frac{R_m}{r} V_m & \text{if } R_m \leq r \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 r は渦中心からの距離、 R_m は渦コア半径(渦の水平風速が最大となる半径)、 V_m は渦の最大水平風速である。なお、文献(3)では渦の周方向風速 V_θ の最大値[最大径方向風速]として V_m が定義されているので、この場合は、式(1a)-(1c)で $a=1/2$, $b=1$, $c=2/3$ に設定し、 $f(r)$ は渦の周方向(接線方向)速度とみなす。

時刻 $t=0$ で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は飛来物の影響を受けないと仮定すると、時刻 t における竜巻の風速場 \mathbf{V}_w の各風速成分 (u, v, w) は式(1a)-(1c), (2)などから以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{f(r)}{r} \begin{pmatrix} -a(x - V_x t) - by \\ -ay + b(x - V_x t) \\ cr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、渦中心からの距離 r は以下で与えられる。

$$r = \sqrt{(x - V_x t)^2 + y^2} \quad (4)$$

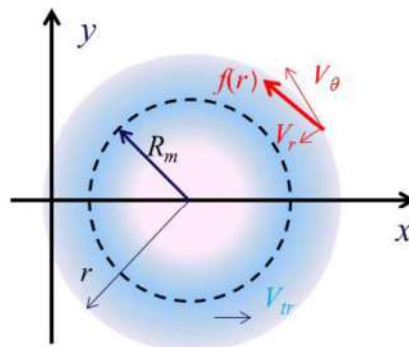


Fig. 1 Plan view of translating Rankine vortex

なお、静止する観測者からみた最大水平風速 V_D は、以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_r \quad (5)$$

(b) 飛来物の運動

飛来物の運動は、既往研究⁽²⁾⁽⁶⁾と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）と重力のみが外力として作用すると仮定する。この場合の飛来物の運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} \quad (6)$$

ここで、各変数は以下で定義されるものである。

- \mathbf{V}_M : 飛来物の速度ベクトル
- \mathbf{V}_w : 風速ベクトル（ランキン型渦風速と移動速度の和）
- ρ : 空気密度
- C_D : 飛来物の平均抗力係数
- A : 飛来物の代表見附面積
- m : 飛来物の質量
- g : 重力加速度
- \mathbf{k} : 鉛直上向き単位ベクトル

2.2 飛来物運動方程式の時間積分法

時刻 t における竜巻の風速場 $\mathbf{V}_w=(u,v,w)$ は式(3)で与えられるので、式(6)を時間積分することによって、飛来物の速度と位置の時刻歴を求めることができる。ここでは、以下の2つの時間積分法を検討する。

(1) 一定加速度法（陽解法）

式(6)において、時刻 τ から時刻 $\tau+\Delta\tau$ における加速度が一定（時刻 τ の値で一定）と仮定する。つまり、

$$\frac{d\mathbf{V}_M(t)}{dt} = \mathbf{A}(\tau) \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は以下で定義される加速度ベクトルである。

$$\mathbf{A}(\tau) = k |\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)| \{ \mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau) \} - g\mathbf{k} \quad (8)$$

なお、簡単のため $k = \rho C_D A / 2m$ とした。式(7)を時間積分すると、以下の速度式を得る。

$$\mathbf{V}_M(t) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau)(t - \tau) \quad (8)$$

さらに、式(9)を時間積分すると、以下の飛来物位置の時間変化式を得る。

$$\mathbf{X}_M(t) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)(t - \tau) + \frac{\mathbf{A}(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (10)$$

ただし、 $\mathbf{X}_M(t)$ は飛来物の位置を表す。従って、式(9),(10)より時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) &= \mathbf{V}_M(\tau) \\ &+ [k |\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)| (\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)) - g\mathbf{k}] \Delta\tau \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) &= \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau \\ &+ \frac{\Delta\tau^2}{2} [k |\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)| (\mathbf{V}_w(\tau) - \mathbf{V}_M(\tau)) - g\mathbf{k}] \end{aligned} \quad (12)$$

式(11),(12)の右辺は時刻 $t = \tau$ における既知の速度・位置の関数であるので、陽解法として時間積分を行うことができる。

(2) 線形加速度法（陰解法）

線形加速度法では、時刻 τ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度が線形に変化するものと仮定する。つまり、式(6)において、以下の式が成立する。

$$\frac{d\mathbf{V}_M(t)}{dt} = -\mathbf{A}(\tau) \frac{t - \tau - \Delta\tau}{\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{t - \tau}{\Delta\tau} \quad (13)$$

式(13)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_M(t) &= \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \\ &- \mathbf{A}(\tau) \frac{(t - \tau - \Delta\tau)^2}{2\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{(t - \tau)^2}{2\Delta\tau} \end{aligned} \quad (14)$$

さらに、式(14)を時間積分すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(t) &= \mathbf{X}_M(\tau) - \mathbf{A}(\tau) \frac{(\Delta\tau)^2}{6} \\ &+ \left[\mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau}{2} \right] (t - \tau) \\ &- \mathbf{A}(\tau) \frac{(t - \tau - \Delta\tau)^3}{6\Delta\tau} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{(t - \tau)^3}{6\Delta\tau} \end{aligned} \quad (15)$$

従って、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における速度と位置は以下で与えられる。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \frac{\Delta\tau}{2} [\mathbf{A}(\tau) + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) &= \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau \\ &+ \mathbf{A}(\tau) \frac{\Delta\tau^2}{3} + \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) \frac{\Delta\tau^2}{6} \end{aligned} \quad (17)$$

式(16),(17)の右辺は以下の時刻 $\tau + \Delta\tau$ における加速度 $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を含んでいる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\tau + \Delta\tau) &= k |\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)| \\ &\times \{ \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) \} - g\mathbf{k} \end{aligned} \quad (18)$$

このため、非線形形式(18)では竜巻風速場も未知であるので、これも同時に連成させる必要がある。本研究では、これらの方程式を Newton-Raphson 法で求解し、時間積分を進めた。この Newton-Raphson 法に基づく求解法の詳細を以下に説明する。

時刻 $\tau + \Delta\tau$ において飛来物速度 $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ とその位置 $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = (x_M, y_M, z_M)$ を求めるために満足すべき式は、式(16),(17),(18)および以下の竜巻の風速場のモデル方程式である。

$$\mathbf{V}_w = \frac{f(r_M)}{r_M} \begin{pmatrix} -a\{x_M - V_r(\tau + \Delta\tau)\} - b y_M \\ -a y_M + b\{x_M - V_r(\tau + \Delta\tau)\} \\ c r_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$r_M = \sqrt{\{x_M - (\tau + \Delta\tau)V_r\}^2 + y_M^2} \quad (20)$$

まず、式(16), (17)から $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を消去すると以下のような $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ と $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ の線形関係式を得ることができる。

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \frac{\Delta\tau}{3} \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) + \mathbf{d}(\tau) \quad (21)$$

ただし、 $\mathbf{d}(\tau)$ は以下で定義する。

$$\mathbf{d}(\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \frac{2\Delta\tau}{3} \mathbf{V}_M(\tau) + \frac{\Delta\tau^2}{6} \mathbf{A}(\tau) \quad (22)$$

また、式(17), (18)から $\mathbf{A}(\tau + \Delta\tau)$ を消去すると以下のような $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ と $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ の非線形関係式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = & \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_w(\tau)\Delta\tau + \mathbf{A}(\tau)\frac{\Delta\tau^2}{3} - \frac{\Delta\tau^2}{6}g\mathbf{k} \\ & + \frac{k\Delta\tau^2}{6}|\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)|\{\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)\} \end{aligned} \quad (23)$$

また、式(21)を用いて、式(23)中の $\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau)$ を消去すると以下を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = & \mathbf{h}(\tau) \\ & + \frac{k\Delta\tau^2}{6}|\mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \frac{3}{\Delta\tau}[\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{d}(\tau)]| \\ & \times \left\{ \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \frac{3}{\Delta\tau}[\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{d}(\tau)] \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

ただし、 $\mathbf{h}(\tau)$ は以下で定義する。

$$\mathbf{h}(\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_w(\tau)\Delta\tau + \mathbf{A}(\tau)\frac{\Delta\tau^2}{3} - \frac{\Delta\tau^2}{6}g\mathbf{k} \quad (25)$$

式(24)を満たす $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ を求めるために以下の関数 $\mathbf{F}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))$ を定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)) = & \mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{h}(\tau) \\ & - \frac{k\Delta\tau^2}{6}|\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))|\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)) \end{aligned} \quad (26)$$

ただし、 $\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))$ は以下で定義される。

$$\mathbf{G}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)) = \mathbf{V}_w(\tau + \Delta\tau) - \frac{3}{\Delta\tau}[\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) - \mathbf{d}(\tau)] \quad (27)$$

$\mathbf{F}(\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau))=0$ を満たす $\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau)$ を求めるために、以下のNewton-Raphson法による繰り返し計算を用いる。

$$\mathbf{X}_M^{(i+1)} = \mathbf{X}_M^{(i)} - \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_M} \right)^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{X}_M^{(i)}) \quad (28)$$

ここで、ヤコビアン行列は式(26)より以下のように求めることができる。

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}_M} = \mathbf{I} - \frac{k\Delta\tau^2}{6} \left\{ \frac{1}{|\mathbf{G}|} \mathbf{G} \otimes \left(\left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}_M} \right] \mathbf{G} \right) + |\mathbf{G}| \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}_M} \right\} \quad (29)$$

ここで、 \mathbf{I} は3x3の単位行列、 $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$ は縦ベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} のテンソル積を表し、その(i,j)成分は $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})_i = a_i b_j$ と定義される。また、 $\mathbf{G}(\mathbf{X}_M)$ の \mathbf{X}_M に関する微分は以下のように求められる。

$$\frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{X}_M)}{\partial \mathbf{X}_M} = \frac{\partial \mathbf{V}_w}{\partial \mathbf{X}_M} - \frac{3}{\Delta\tau} \mathbf{I} \quad (30)$$

2.3 時間進展スキーム

竜巻の風速場を規定する条件である、渦コア半径（渦の水平風速が最大となる半径） R_m 、渦の最大水平風速 V_m および一定移動速度 V_s を与えて、以下のいずれかのスキームで時間進展させる。

(1) 一定加速度法（陽解法）

- ①初期条件の設定：時刻 $t=0$ における飛来物の初期速度と初期位置を与える。竜巻中心は原点に位置するものとする。
- ②時刻 $t=\tau$ の飛来物位置での竜巻風速を式(3)から求め、式(11)から時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ の飛来物速度を、式(12)から飛来物位置を求める。
- ③ $\tau=\tau+\Delta\tau$ として、②に戻り時間積分を進める。（終了まで）

(2) 線形加速度法（陰解法）

- ①初期条件の設定：時刻 $t=0$ における飛来物の初期速度と初期位置を与える。竜巻中心は原点に位置するものとする。
- ②式(28)の繰り返し計算を収束させ、時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ の飛来物位置を求め、次に、時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ の飛来物速度を、式(21)から求める。
- ③ $\tau=\tau+\Delta\tau$ として、②に戻り時間積分を進める。（終了まで）

3. 数値解析コードの検証

3.1 一様風での検証

時刻 $t=0$ において初期速度ゼロで原点に静止する物体が x 方向の一様風 $\mathbf{V}_w=(V_w, 0, 0)$ によって発生する抗力のみを外力として受ける問題について、本研究で開発した解析コード TONBOS を検証する。この問題では、物体の運動に関しては理論解が存在し、時刻 t における物体位置は以下で記述される⁽⁹⁾。

$$x_M(t) = V_w t - \frac{1}{k} \ln(kV_w t + 1) \quad (31)$$

なお、前述と同様に $k=\rho C_D A/2m$ である。この問題を、前節で説明した2つの時間進展スキームで数値解析し、理論解と比較する。解析条件は $V_w=10[\text{m/s}]$ 、 $k=0.01[\text{m}^{-1}]$ とし、時間ステップ $\Delta\tau$ を0.01, 0.1, 1, 10[s]の4種類で計算した。時刻 $t=10[\text{s}]$ における物体位置および物体速度の相対誤差を”（計算値-理論値）÷理論値”で評価したところ、物体位置に関してはFig.2(a)に示す結果が、物体速度に関してはFig.2(b)に示す結果が得られた。

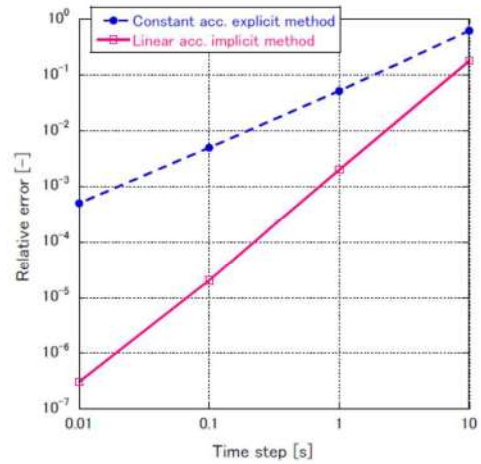


Fig.2(a) Relative error of position, $x_M(t)$, of an object subject to uniform wind at $t=10$ [s] in variation with time step

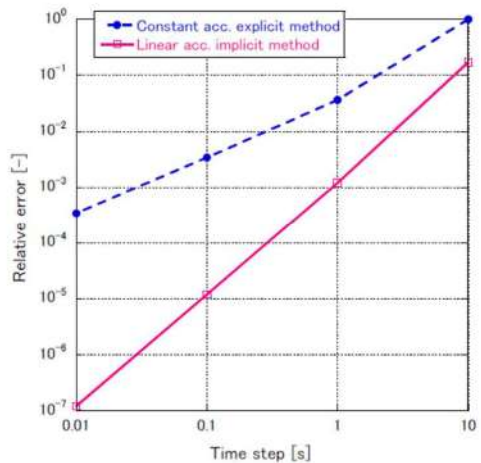


Fig.2(b) Relative error of velocity, $u_M(t)$, of an object subject to uniform wind at $t=10$ [s] in variation with time step

Fig.2(a)および Fig.2(b)より一定加速度法（陽解法）よりも線形加速度法（陰解法）の方が精度が良く、一定加速度法は時間ステップに関して1次精度、線形加速度法は2次精度を有することが確認された。なお、この例では一定加速度法（陽解法）を用いても時間ステップ Δt を0.1[s]以下に設定すれば、物体位置および物体速度の相対誤差は1%以下に抑えることができる。

3.2 移動する竜巻での検証

Simiu and Scanlan⁽⁹⁾は、初速ゼロの飛来物が座標($R_m, 0.40$) [単位: m]に位置するものとして飛来物の運動を計算し、飛来物が地上に落下するまでに達した最大の水平速度を「飛来物最大水平速度」と定義して数値解析結果を得ている。そこで、これと同様に Table 1 に示す3種類の竜巻条件 (Tomado Type-I, -II, -III) を与えて、TONBOS によって「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} を求めた。なお、Table 1 の各条件は文献(3)の Table 3.5.1(p.127)に記載されている値を[mph]から[m/s]へ、[ft]から[m]に換算したものである。

物体特性値 $C_D A/m$ については、文献(3)の Table 16.3.1 (p.565)に掲載されている値 ($C_D A/m=0.0033, 0.0040, 0.0043, 0.0052, 0.0070, 0.0270$ [m²/kg]) および Table 16.3.2 (p.567, Tomado Type-I)のケース(a)に記載されている値 ($C_D A/m=0.001, 0.01$ [m²/kg]) を選定して検証問題とした。なお、時間進展スキームには線形加速度法（陰解法）を用い、全ケースで時間ステップ Δt を0.01[s]に設定した。また、空気密度 ρ は1.226[kg/m³]、重力加速度 g は9.8[m/s²]とした。

Fig.3 に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} を文献(3)の結果と比較して示す。本数値解析の V_h^{max} の結果は文献(3)よりもやや大きい傾向にあるが、両者は整合する結果となっている。なお、一定加速度法（陽解法）を用いても、線形加速度法（陰解法）と同様の解が得られる。文献(3)との相違の原因としては、数値解析スキームの違いや空気密度などの物性値の違いが考えられるが、文献(3)などでは詳しい説明はなされていない。

Table 1 Computational condition of three types of tomadoes

	V_m [m/s]	V_p [m/s]	R_m [m]
Tomado Type-I	129.6	31.3	45.7
Tomado Type-II	107.3	26.8	45.7
Tomado Type-III	84.9	22.4	45.7

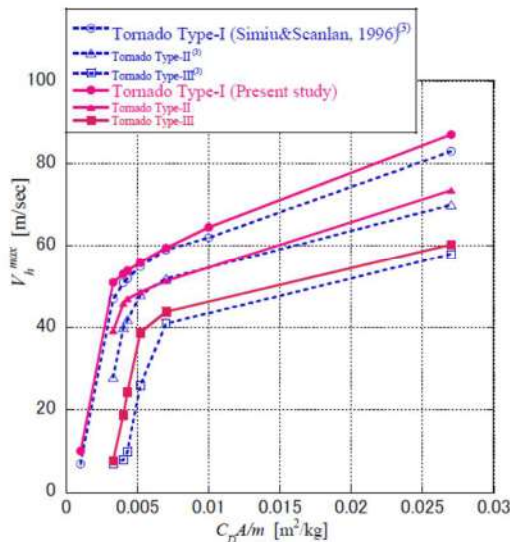


Fig.3 Maximum horizontal missile speed in variation with $C_D A/m$

4. 竜巻風速場の影響

4.1 米国竜巻相当条件での比較

Manuyama⁽⁴⁾は竜巻実験装置（時間および周方向に平均化した接線風速の最大値 V_{max} とその発生半径 R_{max} で定義される Re 数は760）を対象とした LES 解析結果⁽⁴⁾⁽⁶⁾に基づき、一定速度 V_p で移動する実規模の竜巻風速場を生成して飛来物速度を求めている。その一例として $V_{max}=82$ [m/s], $R_{max}=45.7$ [m], $V_p=21$ [m/s]の竜巻条件に相当する非定常風速場を生成し、この非定常風速場の中の座標 ($0, -R_{max}, 40$) [m]から初速ゼロの飛来物を放出する数値解析を多数 (5100 ケース) 行い、飛来物の「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} の確率分布を求めている (文献(4)の Fig.11)。その結果によると、 V_h^{max} の平均値は48[m/s]、標準偏差は7[m/s]、最高値は62[m/s]となっている。この解析例に対応する問題を移動ランキン渦モデルで評価するために、TONBOS において $R_m=45.7$ [m], $V_m=82$ [m/s], $V_p=21$ [m/s] (時間積分法, ρ, g は3.2節と同様)の条件で初速ゼロの飛来物を座標($0, -R_{max}, 40$) [m]から放出する数値解析を行った。なお、周方向風速 V_p の最大値を82[m/s]に設定するため、式(1a)-(1c)で $a=1/2, b=1, c=2/3$ とした。その結果、 $V_h^{max}=47.22$ [m/s]が得られ、Manuyama⁽⁴⁾が得た V_h^{max} の平均値48[m/s]と良く一致した。

さらに、文献(4)では米国規制ガイド⁽¹⁾を参考にして選定した3種類の竜巻条件について、高さ40[m]の位置から飛来物を広範囲かつ密に多数、放出して V_h^{max} を求めている。一方、本数値解析では、これに相当する条件 (Table2 に示す Vortex Type-I, -II, -III) を TONBOS に与えて、飛来物を高さ40[m] (x, y 方向に $\pm 3R_m$ の正方形の範囲の51×51箇所) から放出して「飛来物最大水平速度」を得た。Fig.4 に物体特性 $C_D A/m$ の各値に対する V_h^{max} を文献(4)の結果と比較して示す。文献(4)の V_h^{max} は本数値解析で得られた V_h^{max} よりも大きい傾向にあるが、両者は良く整合することが分かる。

Table 2 Computational condition of three types of vortices

	V_m * [m/s]	V_p [m/s]	R_m [m]
Vortex Type-I	82	21	45.7
Vortex Type-II	72	18	45.7
Vortex Type-III	57	14	45.7

* circumferential speed

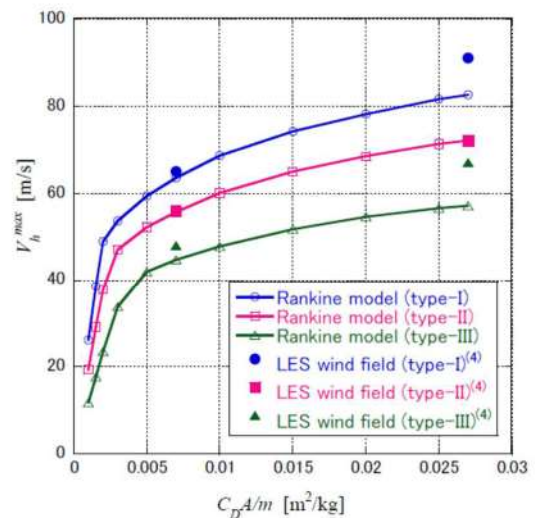


Fig.4 Maximum horizontal missile speed in variation with $C_D A/m$ for Vortex Types-I, II and III shown in Table 2

4.2 国内最大級相当条件での比較

文献(5)の p.237 に示されている竜巻条件に相当する計算条件 (Table3) を TONBOS に与えて、「飛来物最大水平速度」 V_h^{max} を求めた。文献(5)の竜巻風速場の生成方法は文献(4)と同様に LES 解析結果に基づくものであるが、高さ 40[m] の x, y 方向に $\pm 3R_m$ の正方形の 25×25 箇所から飛来物を複数回、放出して V_h^{max} を求めている。本研究でも、同様の位置から飛来物を放出して V_h^{max} を計算した。Fig.5 に物体特性 C_{DA}/m の各値に対する V_h^{max} を文献(5)の結果と比較して示す。物体特性 C_{DA}/m が小さい条件では、文献(5)の V_h^{max} は本数値解析の V_h^{max} の結果よりも小さい傾向にあるが、物体特性 C_{DA}/m が大きい条件では逆の傾向となる。しかしながら、両者は良く整合することが分かる。

物体特性 C_{DA}/m の大小によって V_h^{max} の相対的な大小が逆転する理由としては、 C_{DA}/m が小さい場合は、LES 解析の風速場の上昇速度がランキン渦に比べ小さく、水平方向に十分加速される前に早く落下するが、 C_{DA}/m が大きい場合は、物体が飛散しやすいため気流中の滞在時間が長くなり、LES 解析の風速場の乱れの影響を受けて大きな飛来物速度となるためと考えられる。

5. 結論

本研究では、竜巻の風速場をランキン渦で簡易的にモデル化し、飛来物速度の運動を求めるための数値解析スキームについて説明した。この数値解析スキームに基づく竜巻飛来物評価ソフト TONBOS を用いた計算結果等より以下の結論を得た。

- (1) 飛来物の運動方程式の数値積分法としては、同一の時間ステップ条件下では、線形加速度法 (陰解法) が一定加速度法 (陽解法) よりも高精度である。ただし、時間ステップ幅が十分に小さい場合は飛来物速度に与える影響は小さい。
- (2) LES 解析結果に基づく非定常風速場を用いる既往研究結果⁽⁶⁾との比較により、竜巻風速場が飛来物速度に与える影響について評価したところ、物体特性 C_{DA}/m の大小によって V_h^{max} の相対的な大小関係が逆転する傾向が見られるが、竜巻の風速場をランキン渦でモデル化した場合の結果は LES 解析結果に基づく結果と良く整合することが判明した。

謝辞

本研究の4章 (竜巻風速場の影響) をとりまとめるに当たり、京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門 耐風構造研究分野 丸山 敬 教授から貴重なご意見を頂きましたので、ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76. Design-Basis Tomado and Tomado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050. Tomado-Bome Missile Speeds, 1976.
- (3) Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, August 1996.
- (4) Manyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tomado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (5) 東京工芸大学, “平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究”, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究 成果報告書, 平成 23 年 2 月.
- (6) 丸山敬, “数値的に生成された竜巻状の渦の性質”, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, 平成 22 年 6 月.

Table 3 Computational condition of tomado assumed for a nuclear power plant site

V_m^* [m/s]	V_p [m/s]	R_m [m]
84	16	30

* circumferential speed

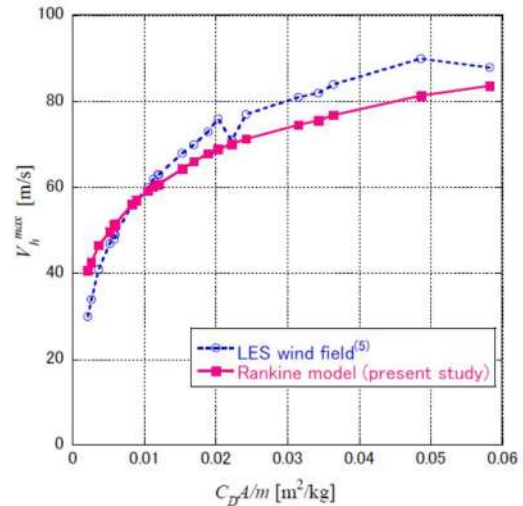


Fig.5 Maximum horizontal missile speed in variation with C_{DA}/m for tomado assumed for a nuclear power plant site shown in Table 3.

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドへの適合状況について

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価
<p>1. 総則</p> <p>1.1 目的</p> <p>原子力規制委員会の定める「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、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならず、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。本ガイドは、当該規定に関連して、原子炉施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随伴現象^(注1)等によって原子炉施設の安全性を損なうことを目的とする。また、本評価ガイドは、竜巻影響評価の妥当性を審査官が判断する際に、参考とするものである。</p> <p>設置許可段階の安全審査においては、以下の2点について確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重^(注1.2)）が、本ガイドに示す基本的な方針を満足した上で適切に設定されていること。 ・設計荷重に対して、竜巻防護施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。 <p>(注1.1) 竜巻及び竜巻と同時に発生する可能性のある雷、大雨、雹^{ひょう}等、あるいはダウンバースト等に伴って発生し得る事象</p> <p>(注1.2) 2.2.2 (2) 参照</p> <p>1.2 適用範囲</p> <p>本ガイドは、設計で想定する竜巻及びその随伴現象等によって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設置許可段階において確認する安全審査に適用する。</p> <p>1.3 関連法規等</p> <p>本ガイドは、以下の法律や基準類を参考としている。</p> <p>(1) 国内</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 核燃料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年6月10日法律第166号） ・ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令（昭和32年11月21日政令第324号） ・ 建築基準法（昭和25年5月24日法律第201号） ・ 建築基準法施行令（昭和25年11月16日政令第338号） 	<p>1. 竜巻に対する防護</p> <p>1.1 概要</p> <p>原子力規制委員会の定める「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（以下「設置許可基準規則」という。）」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならず、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。</p> <p>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伴現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、原子力規制委員会の定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日原子力規制委員会決定）」（以下「ガイド」という。）を参照し、竜巻影響評価として以下を実施し、発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組合せ荷重）の設定 ・泊発電所における飛来物に係る調査 ・飛来物防止対策 ・考慮すべき設計荷重に対する外部事象防護対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

- ・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（平成25年原子力規制委員会規則第5号）
- ・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の解釈（原規技発第1306193号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定））
- ・基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド（原管地発第1306192号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定））
- ・日本産業規格
 - ・日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987
 - ・日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991追補版
 - ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2008年版） JSME S NCI-2008
 - ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2009年追補版） JSME S NCI-2009
 - ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2010年追補版） JSME S NCI-2010
 - ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012年版） JSME S NCI-2012
 - ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版） JSME S NJ1-2012
 - ・日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2004）
 - ・日本建築学会：原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2005）
 - ・日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2010年6月）
 - ・日本建築学会：鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（2005年9月）
 - ・日本建築学会：鋼構造塑性設計指針（2010年2月）
 - ・土木学会：構造工学シリーズ22 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計—基準体系の指針—（2013年1月）
- （2）海外
 - ・ IAEA : IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011
 - ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : Appendix A to Part 50-General Design Criteria for Nuclear Power Plants
 - ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1, March 2007
 - ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.3.2 TORNADO LOADS, NUREG-0800, Revision 3 - March 2007
 - ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.5.1.4 MISSILES GENERATED BY TORNADOES AND EXTREME WINDS, NUREG-0800, Revision 3 - March 2007

ほか

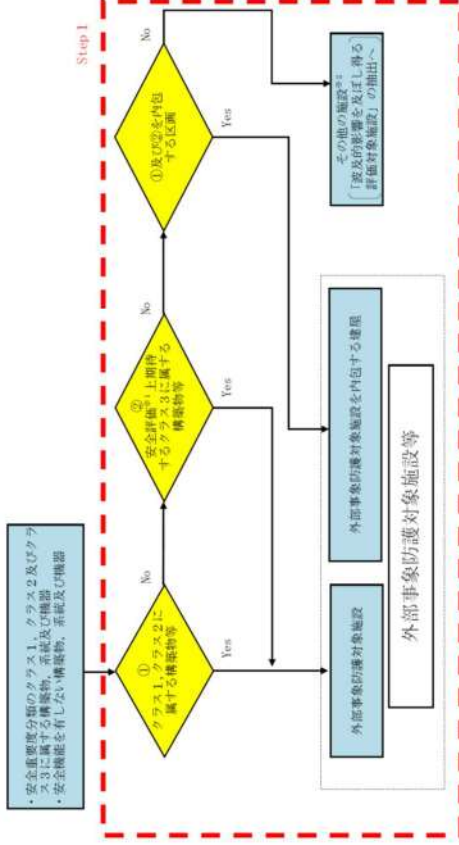
1.4 用語の定義

本ガイドで用いている用語の定義を以下に示す。

- ・竜巻防護施設：「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類におけるSクラスの設計を要求される設備（系統、機器）、建屋及び構築物等。

- 安全機能：「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類におけるSクラスの施設に要求される機能。
- 原子炉施設：発電用軽水型原子炉施設。
- 設計対象施設：本ガイドで設計の対象とする原子炉施設。
- 基準竜巻：設計対象施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、設計対象施設の安全性に影響を与えおそれがある竜巻。
- 設計竜巻：原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻に対して最大風速の割り増し等を行った竜巻。
- 設計竜巻荷重：設計竜巻によって設計対象施設に作用する荷重。
- 設計荷重：設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重。
- 竜巻検討地域：原子力発電所が立地する地域及び竜巻発生を観点から気象条件等が類似の地域。
- 藤田スケール：1971年にシカゴ大学の藤田哲也博士が考案した竜巻等の規模を表す指標。藤田スケールは、通常、F0～F5までの区分が用いられ、区分ごとに風速の範囲が定義されている。
- 日本版改良藤田スケール：藤田スケールを改良した竜巻等の規模を表す指標。日本版改良藤田スケールは、JEF0～JEF5の階級が用いられ、当該階級は、被害指標ごとに設定された被害度に対応する風速のうち最大のものにより決定される。
- 竜巻影響エリア：原子力発電所の号機ごとのすべての設計対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域に基づいて設定されるエリア。
- 設計飛来物：設計竜巻によって設計対象施設に衝突し得る飛来物。
- 竜巻随伴事象：設計竜巻等に伴い発生が想定され得る事象。
- ダウンバースト：積乱雲等から強い下降気流が生じて、竜巻と同様に局地的に突風を発生させる自然現象。
- スーパーセル：上昇気流域における顕著な回転を伴う気流によって生じる巨大積乱雲。単一巨大積乱雲とも呼ばれ、竜巻、雹、大雨及びダウンバースト等を発生させる。単一巨大積乱雲とも呼ばれ、竜巻、雹、大雨及びダウンバースト等を発生させる。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価
<p>2. 設計の基本方針</p> <p>2.1 設計対象施設 以下の(1)及び(2)に示す施設を設計対象施設とする。 (1) 竜巻防護施設 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統・機器）及び建屋・構築物等とする。 (2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設 当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画(注2.1)。</p> <p>解説2.1 設計対象施設 設計竜巻荷重は、基準地震動S_sによる地震荷重と同様に施設に作用するものと捉え、設計対象施設は、耐震設計上の重要度分類を引用して、耐震Sクラス施設及び耐震Sクラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設とした。ただし、竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる。 竜巻防護施設の例としては、原子炉格納容器や安全機能を有する系統・機器（配管を含む）等が考えられる。外殻となる施設等による防護機能が期待できる設計対象施設の例としては、原子炉格納容器に内包された安全機能を有する設備等が考えられる。</p>	<p>1.2 評価の基本方針</p> <p>1.2.1 竜巻から防護する施設の抽出 竜巻から防護する施設は、安全施設が竜巻の影響を受ける場合においても発電用原子炉施設の安全性を確保するために、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定される重要度分類（以下「安全重要度分類」という。）のクラス1、クラス2及びクラス3の設計を要求される構築物、系統及び機器とする。 その上で、上記構造物、系統及び機器の中から、発電用原子炉を停止するため、また停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器として安全重要度分類のクラス1、クラス2及び安全評価[※]上の機能に期待するクラス3に属する構築物、系統及び機器（以下「外部事象防護対象施設」という。）とし、機械的強度を有すること等により、安全機能を損なわない設計とする。 ※ 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析 また、外部事象防護対象施設を内包する建屋は、機械的強度を有すること等により、内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。ここで、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて、外部事象防護対象施設等という。 上記に含まれない構築物、系統及び機器は、竜巻及びその随伴事象に対して機能を維持すること若しくは竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより、その安全機能を損なわない設計とする。</p> <p>1.2.2 竜巻影響評価の対象施設 以下の(1)外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設及び(2)外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設に示す施設を竜巻影響評価の対象施設（以下「評価対象施設等」という。）とする。 外部事象防護対象施設等の抽出フローを第1.2.2.1図に示す。 なお、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される施設についても、外部事象防護対象施設等として抽出すべきものがないことを確認した。【添付資料 1.2】</p>



第 1.2.2.1 図 外部事象防護対象施設等の抽出フロー

(1) 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設【添付資料 1.2】
 外部事象防護対象施設として、屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する施設を含む。）、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び外殻となる施設（建屋、構築物）（以下「外殻となる施設」という。）による防護機能が期待できない施設を抽出する。
 なお、外殻となる施設による防護機能が踏まえ抽出する。
 防護機能の健全性の確認結果を踏まえ抽出する。
 防護機能を期待できることが確認できた区画に内包される外部事象防護対象施設については、該当する外殻となる施設により防護されることから、個別評価は実施しない。
 第 1.2.2.2 図に、外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出フロー及び抽出された評価対象施設を示す。

- a. 屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）
 - (a) 排気筒（建屋外）
 - <以下、外部事象防護対象施設を内包する区画>
 - (b) 原子炉建屋（外部遮へい建屋）（原子炉容器他を内包）
 - (c) 原子炉建屋（周辺補機棟）（主蒸気管他を内包）
 - (d) 原子炉建屋（燃料取扱棟）（使用済燃料ピット他を内包）
 - (e) 原子炉補助建屋（中央制御室他を内包）
 - (f) ディーゼル発電機建屋（ディーゼル発電機他を内包）

- (g) A1, A2-燃料油貯油槽タンク室 (A1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽を内包)
- (h) B1, B2-燃料油貯油槽タンク室 (B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽を内包)
- (i) A1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ (ディーゼル発電機燃料油移送配管を内包)
- (j) B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ (ディーゼル発電機燃料油移送配管を内包)
- (k) 循環水ポンプ建屋 (原子炉補機冷却海水ポンプ他を内包)
- (l) タービン建屋 (タービン保安装置他を内包)

b. 屋内の施設で外気と繋がっている施設

- (a) 換気空調設備 (アニュラス空気浄化設備, 格納容器空調装置, 補助建屋空調装置, 試料採取室空調装置, 中央制御室空調装置, 電動補助給水ポンプ室換気装置, 制御用空気圧縮機室換気装置, ディーゼル発電機室換気装置, 安全補機閉閉器室空調装置)
- (b) 排気筒 (建屋内)

c. 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

- (a) 使用済燃料ピット
- (b) 使用済燃料ラック
- (c) 新燃料ラック
- (d) 燃料移送装置
- (e) 使用済燃料ピットクレーン
- (f) 燃料取扱棟クレーン
- (g) 燃料取替キャナル
- (h) キャスクピット
- (i) 燃料検査ピット
- (j) 原子炉補機冷却海水ポンプ
- (k) 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ
- (l) 配管及び弁 (原子炉補機冷却海水系統)
- (m) 原子炉補機冷却水サージタンク (配管及び弁含む)
- (n) 主蒸気系統配管他
- (o) 制御用空気系統配管
- (p) 蓄熱室加熱器
- (q) ディーゼル発電機燃料油移送配管
- (r) タービン保安装置及び主蒸気止め弁

なお、津波防護施設等は、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。

第1.2.2.3 図に、外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー及び抽出された施設を示す。

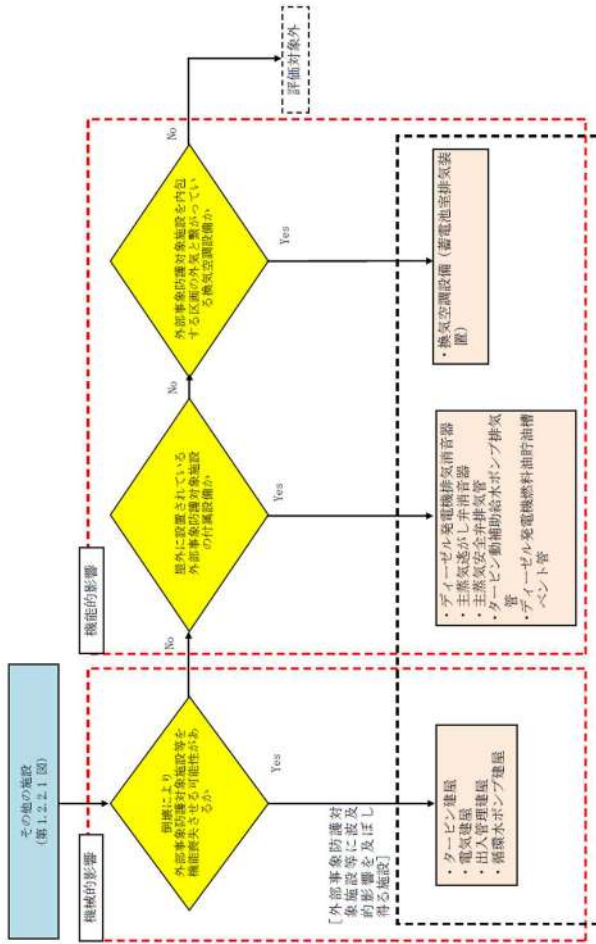
a. 外部事象防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設

- (a) タービン建屋
- (b) 電気建屋
- (c) 出入管理建屋
- (d) 循環水ポンプ建屋

b. 外部事象防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設

(外部事象防護対象施設の付属設備)

- (a) ディーゼル発電機排気消音器
 - (b) 主蒸気逃がし弁消音器
 - (c) 主蒸気安全弁排気管
 - (d) タービン動補給水ポンプ排気管
 - (e) ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管
- (外部事象防護対象施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備)
- (a) 換気空調設備 (蓄電池室排気装置)



第1.2.2.3 図 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

2.2 設計の基本的な考え方

2.2.1 設計の基本フロー

図2.1に設計の基本フローを示す。設置許可段階では、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重が適切に設定されていること、並びに設計荷重に対して、機能・配置・構造計画等を経て抽出された設計対象施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。ただし、設計荷重については、設置許可段階において、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。

(注2.1) 竜巻防護施設を内包する区画。

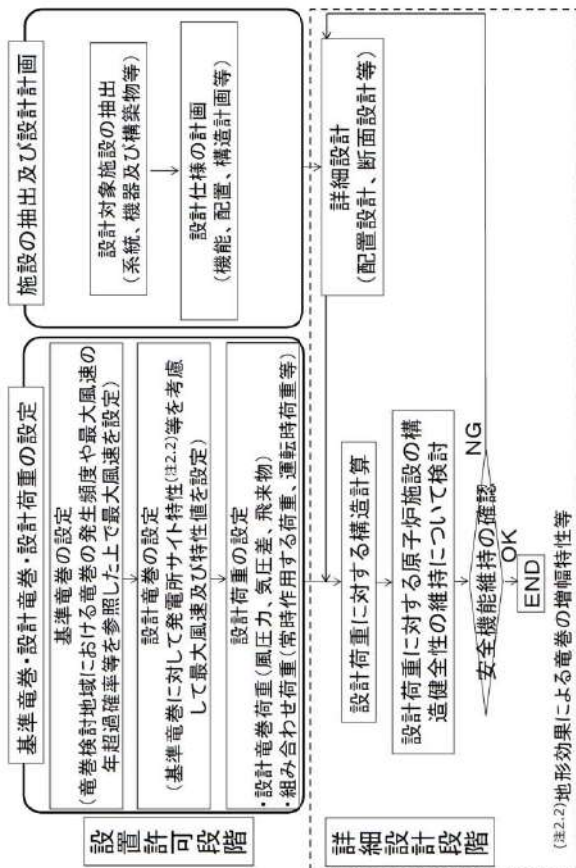


図2.1 設計の基本フロー

2.2.1 設計の基本フロー

詳細設計段階においては、配置・断面設計等を経て詳細な仕様を設定された施設を対象に、設計荷重の詳細を設定し、設計荷重に対する構造計算等を実施し、その結果得られた施設の変形や応力等が構造健全性評価基準を満足すること等を確認して、安全機能が維持されることが確認されることを想定している。

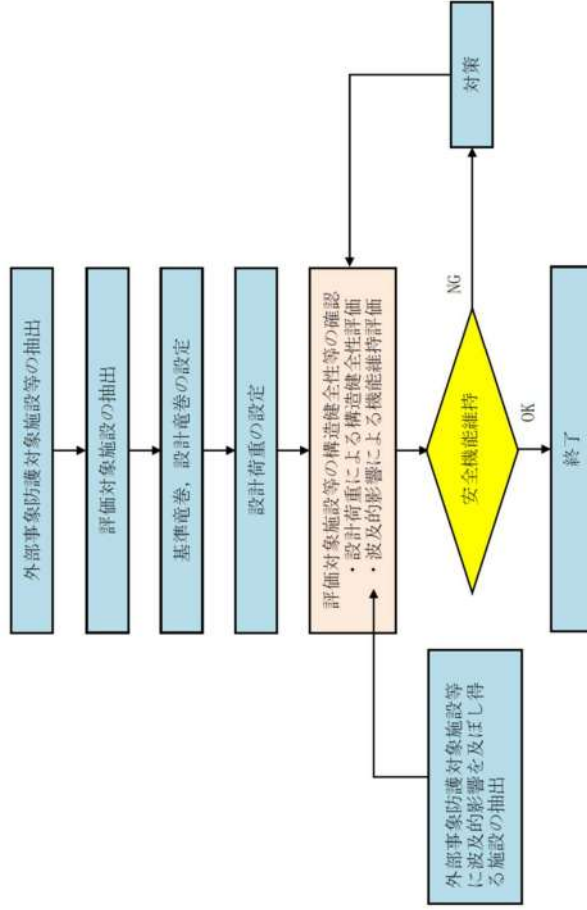
泊発電所3号機竜巻影響評価

1.3 評価の基本的な考え方

1.3.1 評価方法

基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに、評価対象施設等を抽出し、考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設等の構造健全性等について評価を行い、必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されていることを確認する。

竜巻影響評価の基本フローを第1.3.1.1図に示す。



第1.3.1.1図 竜巻影響評価の基本フロー

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価
<p>2.2.2 設計対象施設に作用する荷重 以下に示す設計荷重を適切に設定する。</p> <p>(1) 設計竜巻荷重 設計竜巻荷重を以下に示す。</p> <p>① 風圧力 設計竜巻の最大風速による風圧力</p> <p>② 気圧差による圧力 設計竜巻における気圧低下によって生じる設計対象施設内外の気圧差による圧力</p> <p>③ 飛来物の衝撃荷重 設計竜巻によって設計対象施設に衝突し得る飛来物（以下、「設計飛来物」という）が設計対象施設に衝突する際の衝撃荷重</p> <p>(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。</p> <p>① 設計対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等 ② 竜巻以外の自然現象（注2.3）による荷重、設計基準事故時荷重等</p> <p>なお、上記②の②の荷重については、竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して、上記②の①の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。</p> <p>2.2.3 施設の安全性の確認 設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重、竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせ設計荷重に対して、設計対象施設、あるいはその特定の区画（注2.4）の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>（注2.3）竜巻との同時発生が想定され得る雷、雪、雹^{ひょうりょう}及び大雨等の自然現象を含む。 （注2.4）竜巻防護施設を内包する区画。</p>	<p>1.3.2 評価対象施設等に作用する荷重 以下に示す設計荷重を適切に設定する。</p> <p>(1) 設計竜巻荷重 設計竜巻荷重を以下に示す。</p> <p>a. 風圧力による荷重 設計竜巻の最大風速による風圧力</p> <p>b. 気圧差による圧力 設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力</p> <p>c. 飛来物の衝撃荷重 設計竜巻によって評価対象施設等に衝突し得る飛来物（設計飛来物）が評価対象施設等に衝突する際の衝撃荷重</p> <p>(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。</p> <p>a. 評価対象施設等に常時作用する荷重、運転時荷重等 b. 竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等</p> <p>なお、上記② b. の荷重については、竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して、上記② a. の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を考慮して判断する。 具体的な荷重については、「3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定」に示す。</p> <p>1.3.3 施設の安全性の確認方針 設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重、竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせ設計荷重に対して、評価対象施設、あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い、必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることを確認する。</p>

泊発電所3号機竜巻影響評価	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>2. 基準竜巻・設計竜巻の設定</p> <p>2.1 概要</p> <p>基準竜巻及び設計竜巻の設定フローを第2.1.1図に示す。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p>竜巻検討地域の設定 (発電所が立地する地域及び竜巻発生観点から発電所が立地する地域と気象条件が類似の地域を基に設定)</p> <p>基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (竜巻検討地域における竜巻の発生頻度や最大風速の年超過確率等を参照し、最大風速を設定)</p> <p>設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定 (サイト特性等を考慮して必要に応じて V_B の割増し等を行い、最大風速を設定)</p> <p>設計竜巻の特性値の設定 (V_D 等に基づいて移動速度、最大気圧低下量等の特性値を設定)</p> </div> <p>第2.1.1図 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー</p>	<p>3. 基準竜巻・設計竜巻の設定</p> <p>3.1 概要</p> <p>設置許可段階の安全審査において、基準竜巻及び設計竜巻が適切に設定されていることを確認する。</p> <p>解説3.1 基準竜巻・設計竜巻の最大風速の設定 設計竜巻荷重を設定するまでの基本的な流れは解説図3.1に示すとおりである。</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p>竜巻検討地域の設定 発電所が立地する地域及び竜巻発生観点から気象条件等が類似の地域</p> <p>基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (竜巻検討地域における竜巻の発生頻度や最大風速の年超過確率等を参照した上で最大風速を設定)</p> <p>設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定 (発電所サイト特性^(注3.1)等を考慮して V_B の割増し等を行い、最大風速を設定) $V_D = \alpha \cdot V_B, \alpha \geq 1$</p> <p>設計竜巻の特性値の設定 ($V_D$ 等に基づいて移動速度、最大気圧低下量等の特性値を設定)</p> <p>設計竜巻荷重 (F_D) の設定 (風圧力、気圧差、飛来物の衝突による衝撃荷重を設定)</p> </div> <p>解説図3.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー</p> <p>(注3.1) 地形効果による竜巻の増幅特性等</p>

3.2 電巻検討地域の設定

電巻検討地域は、原子力発電所が立地する地域及び電巻発生を観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似の地域から設定する。

解説3.2 電巻検討地域の設定

(1) 基本的な条件

電巻検討地域の設定にあたっては、IAEAの基準^(*)が参考になる。IAEAの基準では、ある特定の風速を超過する電巻の年発生頻度の検討にあたって電巻の記録を調査する範囲として、およそ10万km²を目安にあげている。このIAEAの基準を参考として、電巻検討地域の目安を、原子力発電所を中心とする10万km²の範囲とする。しかしながら、日本では、例えば日本海側と太平洋側とで気象条件が異なる等、比較的狭い範囲で気象条件が大きく異なる場合があることから、必ずしも10万km²に拘らずに、電巻発生を観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似する地域を調査した結果に基づいて電巻検討地域を設定することを基本とする。

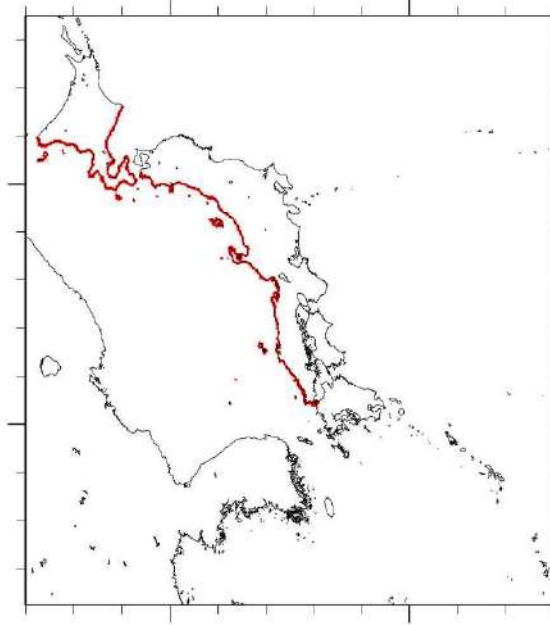
(2) 原子力発電所が海岸線付近に立地する場合の電巻検討地域の設定

解説図3.2に日本における電巻の発生分布^(**)を示す。解説図3.2より日本における電巻の発生位置は、海岸線付近に集中している傾向が伺える。解説図3.3に日本の海岸線付近における電巻の発生状況を示す。解説図3.3をみると、海岸線から1km以内の陸上では単位面積あたりの1年間の平均発生数は 6.0×10^{-4} (個/km²/年)を少し超える程度であり、海岸線から離れたら従って電巻の発生数が減少する傾向が伺える。例えば、解説図3.3の陸上側のグラフの分布をみると、海岸線から5km以上離れた地域では、電巻の発生数が急激に減少する傾向がみられる。以上の傾向を踏まえて、原子力発電所が海岸線付近に立地する場合は、海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を目安に電巻検討地域を設定することとする。なお、原子力発電所がこの範囲(海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲)を逸脱する地域に立地する場合は、海岸線付近で電巻の発生が増大する特徴を踏まえつつ電巻検討地域の範囲を別途検討する必要がある。

2.2 電巻検討地域の設定

電巻検討地域は、泊発電所が立地する地域と気象条件が類似する地域を基に北海道から本州の日本海側及び北海道の襟裳岬以西の海岸に沿った海側5kmと陸側5kmの地域(面積38,895km²)とする。

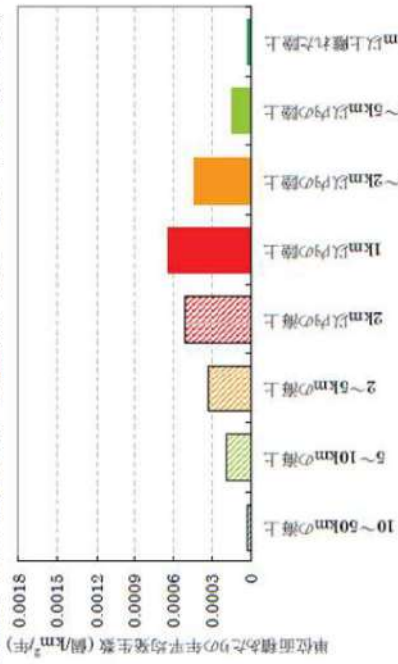
第2.2.1図に電巻検討地域、第2.2.2図に電巻検討地域における電巻の発生状況(1961年～2012年6月)を示す。



第2.2.1図 泊発電所における電巻検討地域

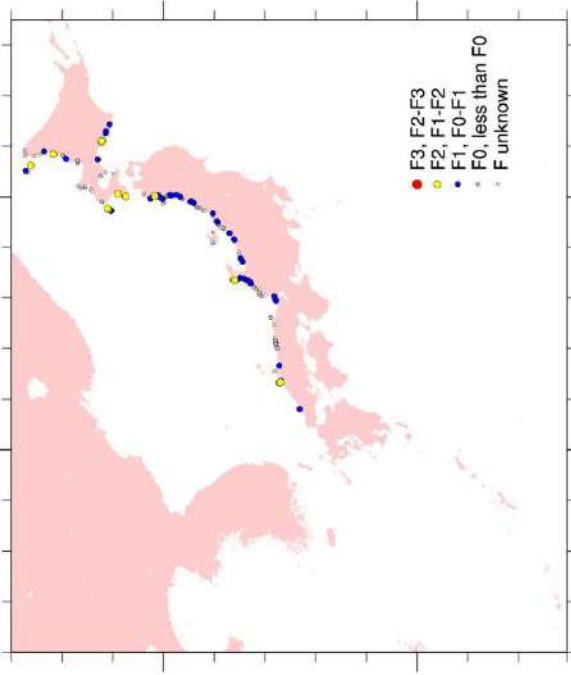


解説図3.2 日本における竜巻の発生分布 (1961～2011年, 気象庁作成) (※2)



解説図3.3 日本の海岸線付近における竜巻の発生状況 (※3) (※2)
(1961～2009年12月, 規模: F0以上)

(注3.2) 被害の痕跡が残りにくい海上竜巻は、単位面積あたりの年平均発生数が、実際の発生数より特に少ない可能性が考えられる。



- F3, F2-F3
- F2, F1-F2
- F1, F0-F1
- F0, less than F0
- F unknown

第2.2.2図 竜巻検討地域における竜巻の発生状況※
※気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

3.3 基準竜巻の設定

以下の基本的な方針に基づいて基準竜巻の最大風速 (V_B) を設定する。ここで、 V_{B1} は最大瞬間風速とする。

(1) 基準竜巻の最大風速 (V_{B1}) は、竜巻検討地域において、過去に発生した竜巻の規模や発生頻度、最大風速の年超過確率等を考慮して適切に設定する。

(2) 基準竜巻の最大風速 (V_B) は、下記に示す V_{B1} と V_{B2} のうちの大きな風速とする。

① 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

日本でも過去に発生した竜巻による最大風速を V_{B1} として設定することを原則とする。ただし、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できる場合においては、「日本」を「竜巻検討地域」に読み替えることができる。

② 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づいて作成した竜巻最大風速のハザード曲線上において、年超過確率 (P_{B2}) に対応する竜巻最大風速を V_{B2} とする。ここで、 P_{B2} は 10^{-5} (暫定値) を上回らないものとする。

また、竜巻検討地域において基準竜巻の最大風速 (V_B) が発生する可能性を定量的に確認するために、 V_B の年超過確率を算定することとする。なお、 V_B が V_{B1} から決定された場合 ($V_B = V_{B1}$ の場合) は、 V_{B2} の算定に用いた竜巻最大風速のハザード曲線を用いて、 V_B の年超過確率を算定する。ちなみに、米国NRCの基準類^(註4)では、設計に用いる竜巻 (設計基準竜巻: Design-basis tornado) の最大風速は、年超過確率 10^{-7} の風速として設定されている。

解説3.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

解説3.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) の設定

本文に記載のとおり、日本でも過去に発生した竜巻による最大風速を V_{B1} として設定することを原則とする。

また、過去に発生した竜巻による最大風速は、竜巻による被害状況等に基づく既往のデータベ

泊発電所3号機竜巻影響評価

2.3 基準竜巻の設定

基準竜巻の最大風速 (V_B) は以下の(1)、(2)より設定を行った。

(1) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

泊発電所が立地する北海道日本海側は、過去の発生実績及び突風関連指数を用いた分析結果から、大規模な竜巻は発生しにくいものと考えられる。

また、竜巻は観測の歴史が浅いこと及び気象庁における竜巻観測体制の変遷を踏まえると、他の気象観測データに比べ不確かさがあると考えられる。

上記を勘案し、日本でも過去に発生した竜巻の最大風速を V_{B1} として設定する。

日本でも過去 (1961年から2012年6月) に発生した最大の竜巻は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」によるとF3スケールである。Fスケールと風速の関係より、F3スケールの風速は70~92m/sであるため、過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1} は、F3スケールの上限値である92m/sとする。

第2.3.1表に日本で過去に発生したF3竜巻を示す。

第2.3.1表 F3竜巻の竜巻発生リスト* (1961年~2012年6月)

Fスケール	発生日時	発生場所経度	発生場所緯度	発生場所
F3	1971年07月07日07時50分35秒	52度45分35秒	139度40分13秒	埼玉県浦和市
F3	1990年12月11日19時13分35秒	25分27秒	140度17分19秒	千葉県茂原市
F3	1999年09月24日11時07分34秒	42分4秒	137度23分5秒	愛知県豊橋市
F3	2006年11月07日13時23分43秒	58分39秒	143度42分12秒	北海道網走支庁 佐呂間町
F3	2012年05月06日12時35分36秒	6分38秒	139度56分44秒	茨城県常総市

*気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻の発生について統計的に評価を行うため、竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づいてハザード曲線 (第2.3.1図) を算定した。ハザード曲線は、海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲全域 (竜巻検討地域) 及びガイドに従い、竜巻検討地域を1km範囲ごとに細分化した場合の計2通りで算定を行った。また、不確かさを要素のハザード算定結果への影響を検討し、不確かさが小さいことを確認した。算定したハザード曲線を第2.3.1図(1)、(2)、(3)に示す。

ガイドに従い、年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻最大風速を V_{B2} とした。

なお、竜巻の観測記録は、気象庁の竜巻等の突風データベースの情報に基づいた。

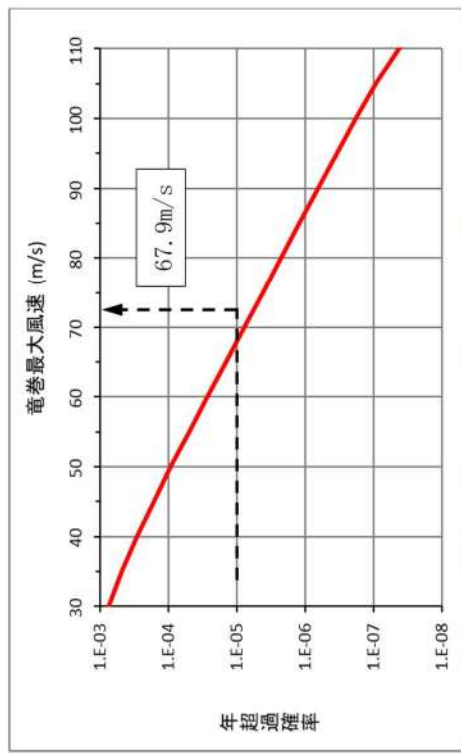
以上、(1)、(2)より算定した竜巻の最大風速 (V_B) を第2.3.2表に示す。

一ス、研究成果等について十分に調査・検討した上で設定する必要がある。
 日本における過去最大級の竜巻としては、例えば、1990年12月に千葉県茂原市で発生した竜巻、2012年5月に茨城県常総市からつくば市で発生した竜巻等があげられる。竜巻検討地域の観測記録等に基づいて V_B を設定する場合において、これら過去最大級の竜巻を考慮しない場合には、その明確な根拠を提示する必要がある。

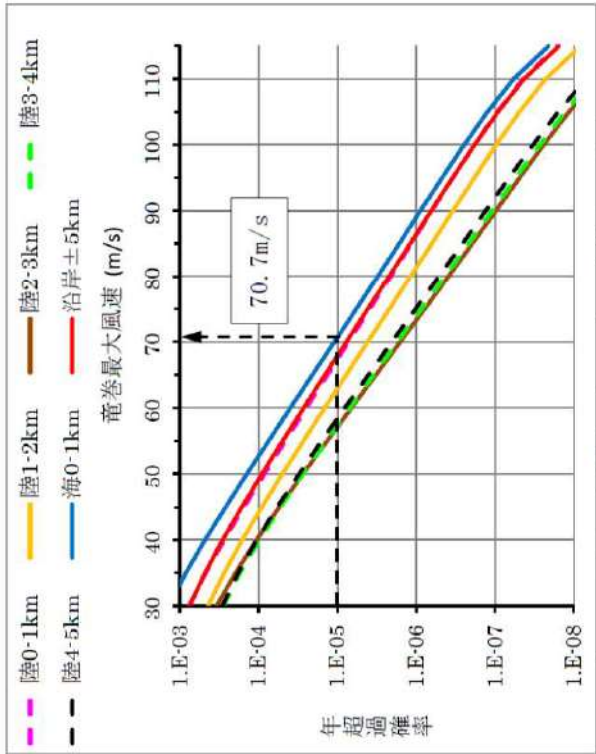
竜巻による被害状況から推定された最大風速を参照して設定された藤田スケールを用いて基準竜巻の最大風速を設定する場合^(※3)は、藤田スケールの各階級(F0~F5)の最大風速を用いる。解説表3.1に藤田スケールと風速の関係を示す。なお、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。

解説表3.1 藤田スケールと風速の関係^(※5)

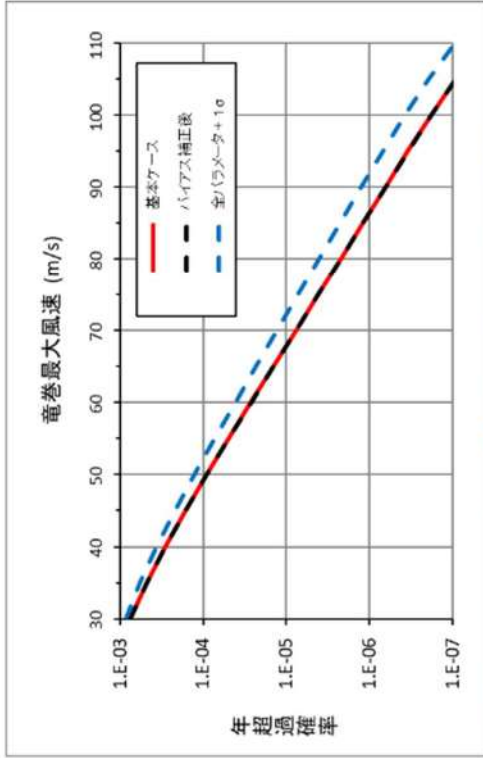
スケール	風速
F0	17~32m/s (約15 秒間の平均)
F1	33~49m/s (約10 秒間の平均)
F2	50~69m/s (約7 秒間の平均)
F3	70~92m/s (約5 秒間の平均)
F4	93~116m/s (約4 秒間の平均)
F5	117~142m/s (約3 秒間の平均)



第2.3.1図(1) 竜巻最大風速のハザード曲線 (海側、陸側5km範囲内で算定)



第2.3.1図(2) 竜巻最大風速のハザード曲線 (1km範囲)



第 2.3.1 図(3) 竜巻最大風速のハザード曲線 (ハザード不確かさ検討)

第 2.3.2 表 竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速[m/s]
過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})	92 (F3)
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})	70.7

以上(1), (2)より, 泊発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は92m/sとした。
 また, 竜巻検討地域における基準竜巻の最大風速 V_B が発生し, 被害を受ける年超過確率は, 第 2.3.1 図(2)より 6.9×10^{-7} である。

解説3.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線を用いた最大風速 (V_{R2}) の算定
 既往の算定方法 (Wenk&Chu^(※6)及びGarson et. al^(※7, ※8)) に基づいて V_{R2} を算定する方法については、解説図3.4にて、その基本的な考え方を以下に例示する。竜巻最大風速のハザード曲線の算定は、解説図3.4に示す算定フローに沿って実施する。なお、本ガイドに示す V_{R2} の具体的な算定方法については、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果^(※9)が参考になる。
 また、竜巻最大風速のハザード曲線の算定方法については、技術的見地等からその妥当性を示すことを条件として、いずれの方法を用いてもよいが、竜巻影響エリアの設定の基本的な考え方は、以下の「(1) 竜巻影響エリアの設定」に従うことを原則とする。
 (注3.3) 解説3.3.3参照

(1) 竜巻影響エリアの設定
 V_{R2} の算定にあたっては、まず始めに V_{R2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、原子力発電所の号機ごとに設定する。号機ごとのすべての設計対象施設の設定面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅、被害長さ、移動方向等から設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。
 竜巻による被害域幅、被害長さ及び移動方向は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。また、竜巻による被害域幅、被害長さ及び移動方向の設定に使用する竜巻の観測記録や仮定条件等は、後述する竜巻の最大風速の確率密度分布の設定に用いる観測記録や仮定条件等との整合性を果たせることを原則とし、 V_{R2} の算定に使用するデータ等には一貫性を果たせるように配慮する。

(2) 竜巻の年発生数の確率分布の設定
 竜巻の年発生数の確率分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいてポアソン過程等により設定することを基本とする。具体的には、竜巻検討地域を海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲に設定した場合は、少なくとも1km範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を設定し、そのうちの V_{R2} が最も大きな値として設定される確率分布を用いることとする。

(3) 竜巻最大風速の確率密度分布の設定
 竜巻最大風速の確率密度分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたっては、竜巻の年発生数の確率分布の設定と同様に、竜巻検討地域を1km範囲ごとに区切ってそれぞれの範囲で確率分布を算定し、そのうちの V_{R2} が最も大きな値として設定される確率分布を設定する等、配慮する。
 竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたって使用する観測された竜巻の最大風速を藤田スケールに基づいて評価する場合^(注3.3)は、藤田スケールの各階級 (F0～F5) の最小風速から最大風速のうち、 V_{R2} が最も大きくなる風速を用いる。ただし、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。

(3) 竜巻最大風速のハザード曲線を用いた最大風速 (V_{R2}) の算定の仕方
 既往の算定方法 (Wenk and Chu 及び Garson et. al) に基づいて、竜巻最大風速のハザード曲線を用いた最大風速 V_{R2} を算定した。具体的な算定方法は、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果^(※9)を参考とし、F4 竜巻の最大風速 116m/s 程度を考慮したハザード曲線とするため、竜巻最大風速の確率密度分布の積分の上限値 120m/s と設定した。
 詳細は添付資料 2.4：竜巻最大風速のハザード曲線の求め方にて説明する。

① 竜巻影響エリアの設定
 竜巻影響エリアは、泊発電所3号炉の評価対象施設等の面積及び設置位置を考慮して、評価対象施設等を十分に含む領域として直径 920m の円とした。
 竜巻の発生数データは気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における 1961 年～2012 年6月までのデータを用いて、観測体制の変遷やFスケール不明竜巻の取扱いを考慮した発生数とした。竜巻による被害幅、被害長さは竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録(気象庁「竜巻等の突風データベース」)に基づいて対数正規分布を仮定し設定した。

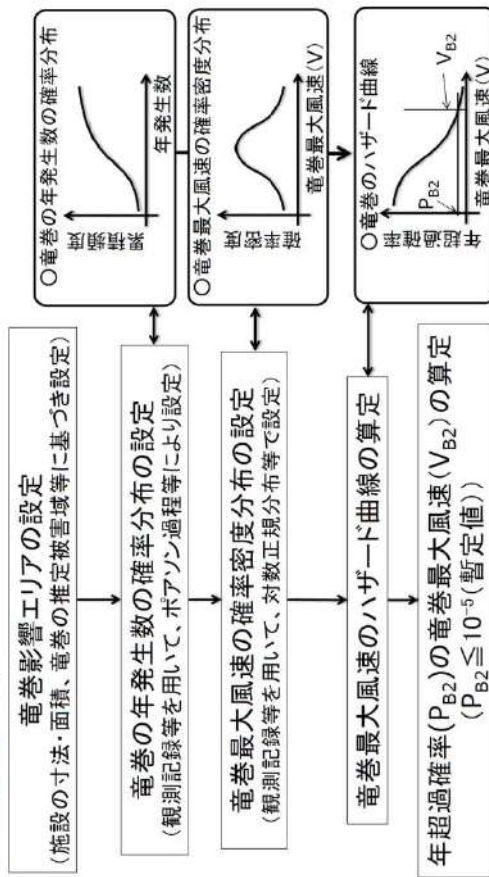
② 竜巻の年発生数の確率分布の設定
 竜巻の年発生数の確率分布は、①で設定した竜巻の発生データに基づき、竜巻は気象事象の中でも極めてまれに発生する事象であり、発生数の変動(標準偏差)が大きいため分布であることからガイドで参照されている東京工芸大学委託成果にならいういポリア分布により設定した。
 また、竜巻検討地域を1km範囲ごとに細分化した評価では、それぞれ1km範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定し、そのうちの V_{R2} が最も大きな値として設定される確率分布を求めた。竜巻風速の確率密度分布も同様とした。

③ 竜巻最大風速の確率密度分布の設定
 竜巻最大風速の確率密度分布は、①、②より対数正規分布を仮定し設定した。

(4) 竜巻最大風速のハザード曲線の算定
上記で設定した竜巻の年発生数の確率密度分布を用いて、竜巻最大風速のハザード曲線を算定する。

なお、竜巻最大風速のハザード曲線の算定において、竜巻最大風速の確率密度分布の積分の上限値を設定する場合は、竜巻最大風速の評価を行うハザード曲線が不自然な形状にならないように留意する。

(5) 年超過確率 (P_{B2}) に対応する竜巻最大風速 (V_{B2}) の算定
上記で算定した竜巻最大風速のハザード曲線において年超過確率が P_{B2} ($\leq 10^{-5}$ (暫定値)) の竜巻最大風速を V_{B2} とする。



解説図3.4 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定フロー

解説3.3.3

日本版改良藤田スケールの適用について2015年12月に気象庁により策定され、2016年4月から竜巻等の突風の調査に使用されている日本版改良藤田スケール (以下「JEFスケール」という。) は、日本の建築物等の種類や特性を踏まえた被害指標及び被害度が用いられており、個別被害から求められる風速の精度の向上が図られている。一方で、2016年4月以降に蓄積されたJEFスケールにより評定された竜巻の風速等に関するデータのみで竜巻最大風速の大きさと発生頻度との関係を把握することは困難であることから、 V_0 の設定は、JEFスケールのデータではなく、2016年3月以前に藤田スケールにより評定された竜巻の風速等に関するデータを用いて行うものとする。ただし、藤田スケールの階級F3の最大風速92m/sに近い値又はそれを超える値がJEFスケールで評定された場合には、気象庁の評定等を踏まえ、その値の扱いを別途検討する。

④ 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

①, ②, ③より竜巻最大風速のハザード曲線を算定した。

⑤ 年超過確率 (P_{B2}) に対応する竜巻最大風速 (V_{B2}) の算定

④で算定したハザード曲線を用いて、年超過確率 $P_{B2}=10^{-5}$ に相当する竜巻最大風速を V_{B2} とした。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

泊発電所3号機竜巻影響評価

3.4 設計竜巻の設定

以下の基本的な方針に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_D) 及び特性値を設定する。ここで、 V_D は最大瞬間風速とする。

(1) 設計竜巻の最大風速 (V_D) は、原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻の最大風速 (V_B) の適切な割り増し等を行って設定されていること。なお、 V_D は、 V_B を下回らないものとする。

(2) 設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速 (V_D)、並びに竜巻検討地域において過去に発生した竜巻の特性等を考慮して適切に設定する。

解説3.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) 及び特性値の設定

解説3.4.1 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定で考慮する地形効果による竜巻の増幅特性
 丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられる^(※9 ほか)ことから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_D) を設定する。

なお、竜巻が丘陵や段差等の上空を通過した際には、竜巻が減衰する可能性が指摘されている^(※10, ※11)が、 V_D の設定においては、そのような減衰の効果は考慮しない。

解説3.4.2 設計竜巻の特性値の設定

解説3.4.2.1 概要

竜巻検討地域で観測された竜巻に関する情報、並びに設計竜巻の最大風速 (V_D) 等に基づいて、下記(1)～(5)に示す設計竜巻の各特性値を設定する。

- (1) 移動速度 (V_T)
- (2) 最大接線風速 (VR_m)
- (3) 最大接線風速半径 (R_R)
- (4) 最大気圧低下量 (ΔP_{max})
- (5) 最大気圧低下率 (dp/dt)_{max}

(1)～(5)の各特性値については原則として、十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定したものを、その根拠の明示を条件として用いる。ただし、設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等がない場合には、解説3.4.2.2 及び3.4.2.3 に示す方法で各特性値を設定することができ。

2.4 設計竜巻の設定

設計竜巻の最大風速および特性値は以下のとおり設定する。

(1) 設計竜巻の最大風速 (V_D)

竜巻検討地域で発生した竜巻は、海側から陸側に進入する可能性が高く、竜巻が増幅することはないと考えられる。竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は、地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後、さらに防潮堤 (T.P. 16.5m) で減衰するため、竜巻による施設への影響は限定的になると考えられる。また、山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても、発電所周辺は広い丘陵地に森林が存在しており、森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

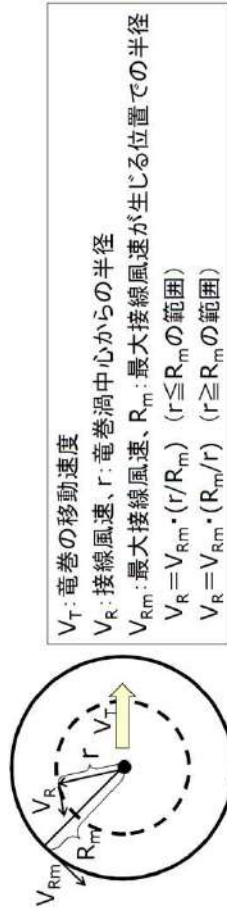
したがって、泊発電所において地形効果による竜巻の増幅の影響は受けられないものと考えられる。そのため、基準竜巻の割り増しは不要と考えるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、基準竜巻の92m/sを安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速 V_D は100m/sとする。

(2) 設計竜巻の特性値

設計竜巻の特性値は、原則として十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定する必要があるが、泊では評価の保守性等も踏まえて、ガイドに示される方法に基づいて設定する。具体的には、ランキン渦モデルを仮定し、①～⑤に従い設定する。設定した結果を第2.4.1表に示す。

解説3.4.2.2 設計竜巻の特性値の設定に係る基本的な考え方
 竜巻に関する観測データが不足している等の理由により、観測データ等に基づいた十分に信頼できる数学モデルの構築が困難な場合は、米国NRCの基準類^(※)を参考として、ランキン渦モデルを仮定して竜巻特性値を設定する。解説図3.5にランキン渦モデルの概要を示す。ランキン渦では、高さ方向によって風速及び気圧が変化しない平面的な流れ場を仮定している。

なお、ランキン渦モデルに比べてより複雑な竜巻渦を仮定した数学モデル等を使用して竜巻特性値を設定する場合は、その技術的な妥当性を示す必要がある。



V_T : 竜巻の移動速度
 V_R : 接線風速、 r : 竜巻渦中心からの半径
 V_{Rm} : 最大接線風速が生じる位置での半径
 $V_R = V_{Rm} \cdot (r/R_m)$ ($r \leq R_m$ の範囲)
 $V_R = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$ ($r \geq R_m$ の範囲)

解説図3.5 ランキン渦モデルの概要

解説3.4.2.3 設計竜巻の特性値の設定
 (1) 設計竜巻の移動速度 (V_T) の設定
 設計竜巻の移動速度 (V_T) は、以下の算定式を用いて V_b から V_T を算定する。

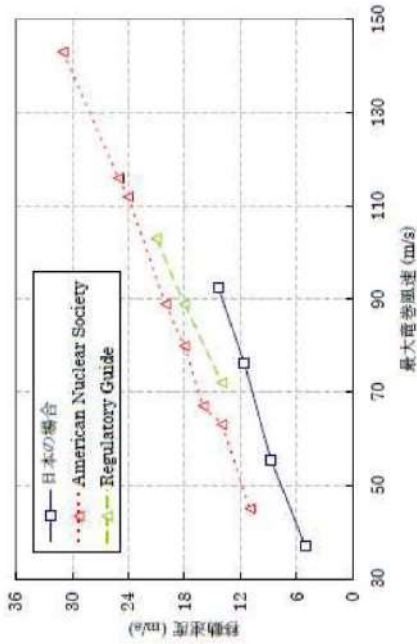
$$V_T = 0.15 \cdot V_b \dots (3.1)$$

① 設計竜巻の移動速度 (V_T)

$$V_T = 0.15 \cdot V_b$$

V_b (m/s): 設計竜巻の最大風速

ここで、 V_b (m/s) は設計竜巻の最大風速を表す。(3.1)式は、解説図3.6に示される日本の竜巻の観測記録に基づいた竜巻移動速度と最大風速との関係^(※)を参考として設定したものである。解説図3.6をみると、青線で示す日本の竜巻による移動速度は、米国NRCの基準類等(参4)による移動速度と比べて、同じ最大竜巻風速に対して小さい。解説図3.6に示される日本の竜巻に対する移動速度は、藤田スケールに基づいた階級(F3, F2及びF1)及びF1~F2, F0及びF0~F1)ごとの平均値であるが、日本で発生する竜巻を個別にみれば、スーパーセルに伴って発生する竜巻等、米国の竜巻に比べて移動速度が速いものも存在すると考えられる。本ガイドでは、設計竜巻の最大速度 (V_b) が一定の場合、移動速度が遅い方が、最大気圧低下 (ΔP_{max}) が大きな値になる(3.2)式、(3.4)式)ことを考慮して、スーパーセルに伴って発生する竜巻等の移動速度が速い竜巻の特性は採用せずに、観測記録の平均値に基づいた解説図3.6の日本の竜巻における移動速度と最大竜巻風速の関係に基づく(3.1)式を採用することにした。



解説図3.6 竜巻の移動速度と最大風速の関係 (参考)

(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{tm}) の設定
 設計竜巻の最大接線風速 (V_{tm}) は、米国NRC の基準類^(※4)を参考として、以下の算定式を用いて V_{tm} を算定する。

$$V_{\text{tm}} = V_b - V_T \dots (3.2)$$

ここで、 V_b (m/s) 及び V_T (m/s) は、設計竜巻の最大風速及び移動速度である。

(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) の設定
 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) は、日本における竜巻の観測記録をもとに提案された竜巻モデル^(※5)に準拠して以下の値を用いる。

$$R_m = 30 \text{ (m)} \dots (3.3)$$

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) の設定
 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) は、米国NRC の基準類^(※4)を参考として、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) を設定する。

$$\Delta P_{\text{max}} = \rho \cdot V_{\text{tm}}^2 \dots (3.4)$$

② 設計竜巻の最大接線風速 (V_{tm})

$$V_{\text{tm}} = V_b - V_T$$

V_b (m/s): 設計竜巻の最大風速, V_T (m/s): 設計竜巻の移動速度

③ 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m)

$$R_m = 30 \text{ (m)}$$

④ 設計竜巻の気圧低下量 (ΔP_{max})

$$\Delta P_{\text{max}} = \rho \cdot V_{\text{tm}}^2$$

ρ : 空気密度 (1.22 (kg/m³)), V_{tm} (m/s): 設計竜巻の最大接線風速

ここで、 ρ 及び V_{fm} は、それぞれ空気密度、設計竜巻の最大接線風速を示す。

(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$ の設定
 設計竜巻の最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$ は、米国NRCの基準類⁽⁸⁾⁽⁹⁾を参考として、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) 及び最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$ を設定する。

$$(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max} \dots (3.5)$$

ここで、 V_T 及び R_m は、それぞれ設計竜巻の移動速度及び最大接線風速が生じる位置での半径を表す。

4. 施設的设计

4.1 概要

設置許可段階の安全審査において以下を確認する。

①設計荷重 (設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重) が適切に設定されていること。ただし、設置許可段階においては、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。(設計対象施設の各部位に作用させる設計荷重の詳細は、詳細設計段階において確認する)

②設計荷重に対して、設計対象施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。

4.2 設計対象施設

「2.1 設計対象施設」に示したとおりとする。

4.3 設計荷重の設定

4.3.1 設計竜巻荷重の設定

「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(1) 設計竜巻荷重」で示した「風圧力」、 $(dp/dt)_{max}$ 及び「飛来物の衝撃荷重」に基づき、「風圧力」、 $(dp/dt)_{max}$ 及び「飛来物の衝撃荷重」について、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重を設定する。

⑤設計竜巻の最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$
 $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max}$
 V_T (m/s): 設計竜巻の移動速度, R_m (m/s): 設計竜巻の最大接線風速半径

第2.4.1表 設計竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動風速 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

3. 竜巻影響評価

3.1 評価概要

評価の概要は以下のとおり。

- (1) 設計荷重 (設計竜巻荷重及びその他の組合せ荷重) の設定
- (2) 原子力発電所における飛来物に係る調査
- (3) 飛散防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設等の構造健全性等の評価を行い、必要に応じた対策を行うことで安全機能が維持されることを確認

3.2 評価対象施設等

「1.2.2 竜巻影響評価の対象施設」に示すとおり。

3.3 設計荷重の設定

3.3.1 設計竜巻荷重の設定

設計竜巻の最大風速 V_0 等に基づき、「風圧力」、 $(dp/dt)_{max}$ 及び「飛来物の衝撃荷重」について、以下のとおり設定する。

解説4.3.1 設計竜巻荷重の設定
 解説4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定
 解説4.3.1.1.1 概要
 設計竜巻の最大風速(V_0)等に基づいて、設計竜巻によって設計対象施設に作用する風圧力を設定する。

解説4.3.1.1.2 基本的な考え方
 (1) 風圧力の算定に用いる風力係数
 竜巻によって生じた被害状況と対応する最大風速は、一般的には、竜巻等の非定常な流れ場の気流性状を考慮した風力係数を用いるのではなく、いわゆる通常の強風等を対象とした風力係数を用いて、逆算により推定されることから、本ガイドにおける風圧力の算定には、通常の強風等を対象とした風力係数を用いることを基本とする。

(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力
 竜巻による最大風速は、一般的には、竜巻によって生じた被害状況と対応する水平方向の風速として算定される。しかしながら、実際の竜巻によって生じた被害は、少なからず鉛直方向の風速の影響も受けていると考えられる。
 よって、本ガイドでは、設計竜巻の水平方向の最大風速(V_0)には、鉛直方向の風速の影響も基本的には含まれているとみなす。
 ただし、鉛直方向の風圧力に対して特に脆弱と考えられる設計対象施設が存在する場合は、 V_0 を入力値とした竜巻の数値解析結果等から推定される鉛直方向の最大風速等に基づいて算定した鉛直方向の風圧力を考慮した設計を行う。

解説4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定
 設計竜巻の最大風速(V_0)による風圧力(P_0)の算定について以下に示す。
 設計竜巻の水平方向の最大風速によって設計対象施設(屋根を含む)に作用する風圧力(P_0)は、「建築基準法施行令」, 「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を準用して、下式により算定する。
 なお、(4.2)式の V_0 は最大瞬間風速であり、「建築基準法施行令」, 「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」の最大風速と定義が異なることに留意する。

$$P_0 = q \cdot G \cdot C \cdot A \cdots (4.1)$$

ここで、 q は設計用速度圧、 G はガスト影響係数、 C は風力係数、 A は施設の受圧面積を表し、 q は下式による。

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdots (4.2)$$

(1) 設計竜巻による風圧力の設定
 設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設(屋根を含む)に作用する風圧力 W_0 は「建築基準法施行令」及び「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」に準拠して、下式により算定する。

なお、ガスト影響係数 G は、 $G=1.0$ 、風力係数 C は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。

$$W_0 = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

q : 設計用速度圧

G : ガスト影響係数(=1.0)

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)

A : 施設の受圧面積

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2$$

ρ : 空気密度

V_0 : 設計竜巻の最大風速

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弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には、ランキン渦モデルの風速場により求めまる鉛直方向の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する。

ここで、 ρ は空気密度、 V_0 は設計竜巻の最大風速である。

(4.1)式に示すように、風圧力(P_0)は、(4.2)式で求められる設計用速度圧(q)に、ガスト影響係数(G)、風力係数(C)及び施設の受圧面積(A)を乗じて算定する。
ガスト影響係数 G は、風の乱れによる建築物の風方向振動の荷重効果を表すパラメータであり、強風中における建築物の最大変位と平均変位の比で定義される。本ガイドの最大竜巻風速(V_0)は、最大瞬間風速として扱うことから $G=1.0$ を基本とする。
風力係数(C)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を参考として、施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて適切に設定する。

解説4.3.1.2 設計竜巻における気圧低下によって生じる設計対象施設内外の気圧差による圧力の設定

解説4.3.1.2.1 概要

前記において設定した設計竜巻による最大気圧低下量(ΔP_{max})及び最大気圧低下率 (dP/dt) max に基づいて設計対象施設に作用する気圧差による圧力を設定する。

解説4.3.1.2.2 基本的な考え方

設計竜巻によって引き起こされる最大気圧低下量及び最大気圧低下率によって設計対象施設に作用する圧力を算定する際の基本的な考え方を以下に示す。なお、以下の考え方は、米国NRC基準類(註12)を参考としている。

- 完全に開かれた建築物等の施設が竜巻に曝されたとき、施設の内圧と外圧は竜巻通過中に急速に等しくなる。したがって、施設の内外の気圧の変化はゼロに近づくのみなせる。
- 閉じた施設(通気がない施設)では、施設内部の圧力は竜巻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、施設内外に圧力差を生じさせる。この圧力差により、閉じた施設の障壁(建築物等の屋根・壁及びタンクの頂部胴部等)に外向きに作用する圧力が生じるとみなせる。
- 部分的に閉じた施設(通気がある施設等)については、竜巻通過中の気圧変化により施設に作用する圧力は複雑な過程により決定される。また、部分的に閉じた設計対象施設への圧力値・分布の精緻な設定が困難な場合は、施設の構造健全性を評価する上で厳しくなるように作用する圧力を設定することとする。

(2) 設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力の設定
設計竜巻による評価対象施設等の内外の気圧差による圧力は、最大気圧低下量 ΔP_{max} に基づき設定する。

a. 建屋・構造物等

建屋については、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重 W_p を以下の式により設定する。

$$W_p = \Delta P_{max} \cdot A$$

ΔP_{max} : 最大気圧低下量

A: 施設の受圧面積

外部事象防護対象施設を内包する建屋・構造物について、影響評価を実施し、当該施設が破損した場合には安全機能維持について確認を行う。

b. 設備(系統、機器)

設備についても、上記と同様に圧力荷重WPを設定する。

なお、換気空調系のように外気と隔離されている区画の境界部等、気圧差による圧力影響を受ける設備について、圧力影響により作用する応力が許容値内であるか確認し、許容値を上回る場合には安全機能維持への影響について確認する。

解説4.3.1.2.3 気圧差による圧力を作用させる施設の設定
 気圧差による圧力を作用させる対象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。

(1) 建屋・構築物等

建屋・構築物等の主要な部材（壁、屋根等）に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の施設については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該施設が破損した場合の安全機能維持への影響についても確認を行うこととする。

- ・ 建屋・構築物等の開口部に設置された窓、扉、シャッター等
- ・ 外気と隔離されているとみなせる区画の隔壁等（天井等）

(2) 設備

設備の主要な部材に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の設備については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該設備が破損した場合の安全機能維持への影響についても確認を行うこととする。

- ・ 外気と隔離されているとみなせる区画の境界部（空調系ダクト類等）
- ・ 圧力差の影響を受け得る計器類や空調装置等

解説4.3.1.3 設計竜巻による飛来物が設計対象施設に衝突する際の衝撃荷重の設定

解説4.3.1.3.1 概要

設計竜巻の最大風速(V_0)及び特性値等に基づいて、設計飛来物を選定あるいは設定し、それら設計飛来物の飛来速度を設定する。そして、設計飛来物が設定した飛来速度で設計対象施設に衝突することを想定して、飛来物の衝突による設計対象施設への衝撃荷重を設定する。

解説4.3.1.3.2 基本的な考え方

竜巻等の突風による被害は、風圧力によって引き起こされるだけでなく、飛来物による被害もかなりの部分を占める。また、竜巻による飛来物は上昇気流の影響もあって比較的遠方まで運ばれる可能性もある。これらの事項に留意して、設計対象施設に到達する可能性がある飛来物について検討を行った上で、設計飛来物を選定あるいは設定する。一般的には、遠方からの飛来物は相対的に重量が軽いものが多く、仮に衝突した場合でも衝撃荷重は相対的に小さいと考えられることから、設計対象施設に到達する可能性がある飛来物を検討する範囲は、原子力発電所の敷地内を原則とする。

ただし、原子力発電所の敷地外からの飛来物による衝撃荷重が、原子力発電所の敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定され得る場合は、原子力発電所の敷地外からの飛来物も考慮する。

また、設計飛来物として、最低限以下の①～③を選定あるいは設定することとする。

なお、以下の①～③の設定にあたっては、米国NRCの基準類(④)を参考とした。

(3) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設等に衝突する際の衝突荷重の設定

a. 泊発電所3号炉における設計飛来物等の選定【添付資料3.3】

泊発電所3号炉の竜巻影響評価における設計飛来物等については、泊発電所3号炉における飛来物源の現地調査結果及び「竜巻影響評価ガイド」の解説表4.1に示されている設計飛来物の設定例を参照して選定する。

第3.3.1.1表に発電所における設計飛来物を示す。

- ①大きな運動エネルギーをもつ飛来物（自動車等）
- ②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物（鉄骨部材等）
- ③開口部等を通過することができなくなる程度に小さくて固い飛来物（砂利等）

解説4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定

(1) 基本的な考え方

設計飛来物に設定する速度は、設計竜巻によって飛来した際の最大速度とする。設計飛来物の最大水平速度(mV_{Hmax})は、非定常な乱流場を数値的に解析できる計算手法等による計算結果等に基づいて設定することを基本とする。ただし、安全側の設計になるように、設計竜巻の最大風速(V_0)を設計飛来物の最大水平速度として設定してもよい。

設計飛来物の最大鉛直速度(mV_{Vmax})は、最大水平速度と同様に計算等により求めても良いし、米国NRCの基準類(参4)を参考に設定した下式により算定してもよい。

$$mV_{Vmax} = (2/3) \cdot mV_{Hmax} \dots (4.3)$$

ここで、 mV_{Hmax} は、設計飛来物の最大水平速度を表す。

(2) 設計飛来物の設定例

設計飛来物の選定あるいは設定、並びに設計飛来物の最大速度を設定する際の参考として、解説表4.1に飛来物及びその最大速度の設定例を示す。解説表4.1の棒状物、板状物及び塊状物の最大水平速度(mV_{Hmax})は、設計竜巻の最大風速(V_0)=100(m/s)とした条件下で解析的に算定した結果(参3)である。また、解説表4.1の最大鉛直速度(mV_{Vmax})は、米国NRCの基準類(参4)を参考として設定した(4.3)式を用いて算定した結果である。

なお、解説表4.1に示した飛来物よりも小さな開口部を飛来物が通過することの影響等を確認する場合は、さらに小さな飛来物を設定する必要がある。

b. 設計飛来物の速度の設定【添付資料 3.1】

設計竜巻の最大風速(100m/s)による設計飛来物の最大水平速度(mV_{Hmax})及び最大鉛直速度(mV_{Vmax})は、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、ガイドに示される設計竜巻の最大風速(V_0)=100m/sの場合と同じ値とする。ガイドにおける鋼製材の最大水平速度及び最大鉛直速度については、平成26年9月17日に改正(最大水平速度が57m/sから51m/sに、最大鉛直速度が38m/sから34m/sに改正)されているが改正前の値とし、第3.3.1.1表のとおりとする。ただし、ガイドに記載のない設計飛来物である砂利の速度については、文献*を参考にして、ランキン渦を仮定し風速場の中での速度を算出した。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

解説表4.1 飛来物及び最大速度の設定例 (V₀=100(m/s)の場合)

飛来物の種類	棒状物			塊状物	
	鋼製パイプ	コンクリート板	コンテナ	コンテナ	トラック
サイズ (m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	8.4	540	2300	4750	135
最大水平速度 (m/s)	49	30	60	34	57
最大鉛直速度 (m/s)	33	20	40	23	38

解説4.3.1.3.4 設計飛来物の衝突方向、衝突範囲及び衝撃荷重の設定
 設計飛来物が設計対象施設に衝突する方向は、安全側の設計になるように設定する。
 設計飛来物が到達する範囲について解析結果等から想定される場合は、その技術的根拠を示した上で設計飛来物が到達しない範囲を設定することができる。
 各設計飛来物による衝撃荷重は、設計飛来物の形状及び剛性等の機械的特性を適切に設定した衝撃解析等の計算結果に基づいて設定するか、あるいは、安全側の設計となるように配慮して設計飛来物を剛体と仮定して設定してもよい。

泊発電所3号機竜巻影響評価

第3.3.1.1表 泊発電所における設計飛来物

項目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ[m]	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04 ^{※1}	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量[kg]	0.18	8.4	135
最大水平速度[m/s]	62 ^{※2}	49 ^{※1}	57 ^{※1}
最大鉛直速度[m/s]	42 ^{※3}	33 ^{※1}	38 ^{※1}

※1 砂利のサイズは、竜巻防護ネットの金網が目開き5cm×5cmを2枚重ね、4cm×4cmを1枚重ねの構造、又は4cm×4cmを3枚重ねの構造となっていることを考慮して選定
 ※2 設計竜巻風速100m/s、当社が実施するランキン渦モデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果
 ※3 竜巻影響評価ガイドに基づき最大水平速度の2/3として算出
 ※4 衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速 (V₀) = 100m/sの場合と同じ値とする。また、鋼製材については、竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。

※：竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究 (東京工芸大学)

E. Simiu and M. Cordes, NBS IR76-1050, Tornado-Borne Missile Speeds, 1976

- c. 設計飛来物の衝撃荷重の設定
 設計竜巻の最大風速100m/sによる設計飛来物の衝撃荷重は、運動エネルギーが最も大きくなる鋼製材の衝突方向及び衝突面積を考慮し、鋼製材が評価対象施設等に衝突した場合の影響が大きくなる衝突方向で算出する。
 鋼製材の最大速度は第3.3.1.1表のとおりであり、静的な構造評価を実施する場合の衝撃荷重は、重量分布を均一な直方体として、Rieraの方法を踏まえた下式にて算出した。

$$W_w = F_{MAX} = MV^2 / L_{MIN}$$

M：飛来物の質量
 V：飛来物の衝突速度
 L_{MIN}：飛来物の衝突方向長さ

Rieraの方法で衝撃荷重を算出する場合、衝撃荷重が最大となるのは第3.3.1.2図に示す向きの衝突となる。

なお、有限要素法による飛来物衝突評価を行う場合には、飛来物の衝突速度を初速度として入力し、衝突解析により衝撃荷重を算出する。衝突解析における鋼製材の衝突方向は、鋼製材が評価対象施設等に衝突した場合の影響が大きくなる衝突方向とする。

解説4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ
 設計対象施設的设计に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重(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NRCの基準類(参12)を参考として設定した下式により算定する。

$$W_{T1} = W_p \dots (4.4)$$

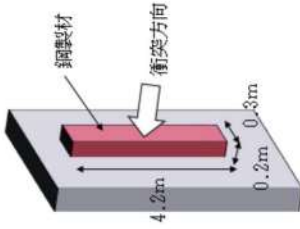
$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M \dots (4.5)$$

ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。

- W_{T1} , W_{T2} : 設計竜巻による複合荷重
- W_w : 設計竜巻の風圧力による荷重
- W_p : 設計竜巻による気圧差による荷重
- W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

なお、設計対象施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定
 「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(2)設計竜巻荷重と組み合わせる荷重」に示した各荷重について、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重として設定し、設計竜巻荷重と組み合わせる。



第3.3.1.2図 最大衝撃荷重となる鋼製材衝突方向 (Rieraの方法⁽¹⁾)

d. 設計竜巻荷重の組合せ
 評価対象施設等の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重 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て、以下の式により算出する。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$$

ここで、

- W_{T1} , W_{T2} : 設計竜巻による複合荷重
- W_w : 設計竜巻の風圧力による荷重
- W_p : 設計竜巻の気圧差による荷重
- W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

ここで、竜巻襲来時において、各荷重の作用方向は必ずしも一様ではないが、WT2の算出においては W_w , W_p 及び W_M の作用方向を揃えることとし、保守性を考慮する。また、評価対象施設等には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

- 3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定
 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。
 (1) 評価対象施設等に常時作用する荷重、運転時荷重等
 評価対象施設等に自重等の常時作用する荷重、内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。
 (2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、ひょう及び降水である。これらの自然現象の組合せにより発生する荷重は、以下のとおり設計竜巻荷重に包絡される。

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り組み、必要な事項については適切に反映を行う。

①雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても、雷によるプラントへの影響は、雷撃であるため雷による荷重は発生しない。

②雪

竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季の限定された期間に発生し、積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから、発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪による荷重が同時に発生し、設備に影響を与えることは考えにくいため、組合せを考慮しない。また、雪が堆積した状態における竜巻の影響については、除雪により雪を長期間堆積状態にしない方針であることから、組合せを考慮しない。

冬季に竜巻が発生する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時は、竜巻通過前に積もった雪の大部分は、竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

③ひょう

ひょうは、積乱雲から直径5mm以上の氷の粒であり、仮に直径10cm程度の大型のひょうを想定した場合、その重量は約0.5kgとなる。直径10cm程度のひょうの終端速度は59m/s、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十分に小さく、ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④降水

竜巻と降水が同時に発生する場合においても、雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく、また降雨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。

(3) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は、当該外部事象防護対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該外部事象防護対象施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して、適切に組み合わせて設計する。

外部事象防護対象施設は、設計竜巻によって安全機能を損わない設計とするため、設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故等の設計基準事故の起因とはならないことから、設計竜巻と設計基準事故は独立事象であり、因果関係はない。

時間的変化の観点からは、事故の影響が長期に及ぶことが考えられる設計基準事故である原子炉冷却材喪失の発生頻度は小さく、また、外部事象防護対象施設に大きな影響を及ぼす竜巻の発生頻度も小さい。よって設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいため、設計基準事故時荷重と設計竜巻の荷重を組み合わせる必要はなく、設計竜巻により外部事象防護対象施設に作用する衝撃による応力評価と変わらない。

また、風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合、外部事象防護対象施設のうち設計基準事故時荷重が生じ、外殻となる施設による防護機能が期待できないこ

とから、竜巻による風荷重等の影響を受ける可能性がある屋内施設としては原子炉補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても原子炉補機冷却海水ポンプの圧力及び温度は変わらないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、設計竜巻の荷重と設計基準事故時荷重を組み合わせる必要はないため、設計竜巻により外部事象防護対象施設に作用する衝撃による応力評価と変わらない。このため、設計竜巻の荷重と設計基準事故時荷重の組合せは考慮しない。

4.4 施設の構造健全性の確認

4.4.1 概要

設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重（常時作用している荷重、竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して、設計対象施設、あるいはその特定の区画^(注4.1)の構造健全性が維持される方針であることを確認する。

(注4.1) 竜巻防護施設を内包する区画。

3.4 評価対象施設等の設計方針

外部事象防護対象施設のうち評価対象施設等については、設計荷重に対してその構造健全性を維持すること又は取替、補修が可能なこと、設計上の要求を維持することにより、安全機能を損なわない設計とする。また、外部事象防護対象施設等に波及影響を及ぼし得る施設については、竜巻及びその随伴事象に対して構造健全性を確保すること、設計上の要求を維持すること又は安全上支障のない期間での修復等の対応により、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

(1) 許容限界

建屋及び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しない部材厚さ（貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会及び土木学会等の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 日本機械学会の基準・指針類
- ・ 震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（日本建築防災協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類等

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生しない部材厚さ（貫通限界厚さ）と部材の最小厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針等に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）等

(2) 屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）

外部事象防護対象施設のうち屋外施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて竜巻飛来物防護対策設備である竜巻防護鋼板等の設置又は運用による竜巻防護

対策を講じる方針とする。

なお、屋内に配置される施設のうち、外殻となる施設等による防護機能が期待できる施設の内
部に配置される施設は、その防護機能により設計荷重に対して影響を受けない設計とする。

また、設計飛来物は評価対象施設等の全面に影響を及ぼすものとして評価及び対策を行う。

a. 排気筒（建屋外）

排気筒（建屋外）は、設計飛来物の衝突により貫通し構造健全性が維持されないことを考慮し
て、補修が可能な設計とすることにより、設計基準事故時における安全機能を損なわない設計と
する。さらに、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び排気筒に常時作用する荷重に対して、
構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

<以下、外部事象防護対象施設を内包する区画>

b. 原子炉建屋（外部遮へい建屋）

原子炉建屋（外部遮へい建屋）は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による
衝撃荷重及び常時作用する荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根、
壁及び開口部（扉類）の破損により当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわな
い設計とする。また、設計飛来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により、当該建
屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

c. 原子炉建屋（周辺補機棟）、原子炉建屋（燃料取扱棟）、原子炉補助建屋及びディーゼル発電
機建屋

原子炉建屋（周辺補機棟）、原子炉建屋（燃料取扱棟）、原子炉補助建屋及びディーゼル発電
機建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する
荷重に対して、構造骨組の構造健全性が維持されるとともに、屋根、壁及び開口部（扉類）の破
損により当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛
来物の衝突時においても、貫通及び裏面剥離の発生により、当該建屋内の外部事象防護対象施設
が安全機能を損なわない設計とする。

ただし、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する
荷重又は設計飛来物の衝突による影響を受け、屋根、壁及び開口部（扉類）が損傷し当該建屋内
の外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性がある場合には、当該建屋内の外部事象防護
対象施設が安全機能を損なわないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、竜巻飛
来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施する。

d. A1, A2-燃料油貯油槽タンク室及びB1, B2-燃料油貯油槽タンク室

A1, A2-燃料油貯油槽タンク室及びB1, B2-燃料油貯油槽タンク室は、地下埋設されていることを
考慮し、設計飛来物による衝撃荷重に対して、構造健全性が維持され、ディーゼル発電機燃料油
貯油槽が安全機能を損なわない設計とする。

e. A1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ及びB1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレ
ンチ

A1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ及びB1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレ

ンチは、設計飛来物の衝突による影響を受け、開口部（蓋）が損傷する可能性があるため、当該トレンチ内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわれないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、竜巻飛来物防護対策設備である竜巻防護鋼板等の設置又は運用による竜巻防護対策を実施する。

f. 循環水ポンプ建屋

循環水ポンプ建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重又は設計飛来物の衝突による影響を受け、屋根、壁及び開口部（扉類）が損傷する可能性があるため、当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわれないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施する。

g. タービン建屋

タービン建屋は、竜巻を起因として蒸気発生器への過剰給水が発生することはないが、独立事象としての重量の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、タービン保安装置及び主蒸気止め弁が安全機能を損なわれない設計とする。

(3) 屋内の施設で外気と繋がっている施設

外殻となる施設に内包され防護される外部事象防護対象施設のうち、外気と繋がっている施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて竜巻飛来物防護対策設備である竜巻防護鋼板の設置又は運用による竜巻防護対策を講じる方針とする。

a. 換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機閉閉器室空調装置）
換気空調設備（アニュラス空気浄化設備、格納容器空調装置、補助建屋空調装置、試料採取室空調装置、中央制御室空調装置、電動補助給水ポンプ室換気装置、制御用空気圧縮機室換気装置、ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機閉閉器室空調装置）は、原子炉建屋（外部遮へい建屋）、竜巻防護鋼板の設置による竜巻防護対策を行う原子炉建屋（周辺補機棟）及び原子炉補助建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないことから、気圧差による荷重及び設備に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわれない設計とする。

b. 排気筒（建屋内）

排気筒（建屋内）は、竜巻防護鋼板の設置による竜巻防護対策を行う原子炉建屋（周辺補機棟）に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しないため、気圧差による荷重及び排気筒に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわれない設計とする。

(4) 外殻となる施設による防護機能が期待できない施設

外殻となる施設による防護機能が期待できない施設は、設計荷重に対して、安全機能が維持さ

れる設計とし、必要に応じて竜巻飛来物防護対策設備である竜巻防護ネット等の設置又は運用による竜巻防護対策を講じる方針とする。

a. 使用済燃料ピット

設計飛来物が原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通し使用済燃料ピットに侵入する場合でも、設計飛来物の衝撃荷重により、使用済燃料ピットのライニング及びコンクリートの一部が損傷して、ピット水が漏えいすることはほとんどなく、使用済燃料ピットの冷却機能及び遮蔽機能に影響しないことにより使用済燃料ピットが安全機能を損なわない設計とする。

b. 使用済燃料ラック

設計飛来物が原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通し使用済燃料ピットに侵入し使用済燃料ラックに衝突する場合でも、設計飛来物が使用済燃料ラックに貯蔵している燃料の燃料有効部に達することはなく、使用済燃料ラックに貯蔵している燃料の構造健全性が維持されることにより安全機能を損なわない設計とする。

c. 新燃料ラック

設計飛来物が原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通し新燃料貯蔵庫に侵入し新燃料ラックに衝突する場合でも、設計飛来物が新燃料ラックに貯蔵している燃料の燃料有効部に達することはなく、新燃料ラックに貯蔵している燃料の構造健全性が維持されることにより安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物のうち鋼製パイプが新燃料ラックに衝突することがなく、新燃料ラックに貯蔵している燃料に直接衝突し、燃料の構造健全性が損なわれることを考慮して、竜巻防護鋼板の設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物が新燃料ラックに貯蔵している燃料に直接衝突することを防止し、燃料の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

d. 燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン、燃料取扱棟クレーン、燃料取扱キヤナル、キヤスクピット、燃料検査ピット

燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン、燃料取扱棟クレーン、燃料取扱キヤナル、キヤスクピット、燃料検査ピットは、設計飛来物が原子炉建屋（燃料取扱棟）の壁を貫通し、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン、燃料取扱棟クレーン、燃料取扱キヤナル、キヤスクピット、燃料検査ピットに衝突し移送中又は取扱い中の燃料の構造健全性が損なわれることを考慮して、竜巻襲来が予想される場合には、燃料取扱作業を中止し、移送中の燃料は燃料移送装置にて使用済燃料ラックに貯蔵することにより、移送中又は取扱い中の燃料の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

なお、使用済燃料ピットクレーンは、使用済燃料ラック及び使用済燃料ラックに貯蔵している燃料に影響を及ぼさない待機位置への退避措置を行う。

e. 原子炉補機冷却海水ポンプ

原子炉補機冷却海水ポンプは、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、竜巻防護ネットの設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷

重、気圧差による荷重及び原子炉補機冷却海水ポンプに常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

f. 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナは、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、竜巻防護ネットの設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び原子炉補機冷却海水出口ストレーナに常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

g. 配管及び弁（原子炉補機冷却海水系統）
配管及び弁（原子炉補機冷却海水系統）は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮し、竜巻防護ネットの設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の衝突を防止し、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び配管及び弁（原子炉補機冷却海水系統）に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわない設計とする。

h. 原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む）
原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む）は、設計飛来物が原子炉建屋（周辺補機棟）の開口部建具である扉を貫通し、原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む）に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻防護壁の設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む）への衝突を防止し、原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む）の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

i. 主蒸気系統配管他
主蒸気系統配管他は、設計飛来物が原子炉建屋（周辺補機棟）又はディーゼル発電機建屋の開口部建具であるブローアウトパネル、扉又はガラリを貫通し、主蒸気系統配管他に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻防護壁等で開口部建具の竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の主蒸気系統配管他への衝突を防止し、主蒸気系統配管他の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

j. 制御用空気系統配管
制御用空気系統配管は、設計飛来物が原子炉補助建屋の開口部建具である扉を貫通し、制御用空気系統配管に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻防護壁の設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の制御用空気系統配管への衝突を防止し、制御用空気系統配管の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

k. 蓄熱室加熱器
蓄熱室加熱器は、設計飛来物がディーゼル発電機建屋の開口部建具である扉又はガラリを貫通し、蓄熱室加熱器に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻防護壁等の設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物の蓄熱室加熱器への衝突を防止し、蓄熱室加熱器の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

1. ディーゼル発電機燃料油移送配管
 ディーゼル発電機燃料油移送配管は、設計飛来物がA1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ及びB1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチの蓋を貫通し、ディーゼル発電機燃料油移送配管に衝突し安全機能を損なうことを考慮して、竜巻防護鋼板等の設置による竜巻防護対策を行うことにより、設計飛来物のディーゼル発電機燃料油移送配管への衝突を防止し、ディーゼル発電機燃料油移送配管の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。
- m. タービン保安装置及び主蒸気止め弁
 タービン保安装置及び主蒸気止め弁は、蒸気発生器への過剰給水の緩和手段（タービントリップ機能）として期待している。竜巻を起因として蒸気発生器への過剰給水が発生することはないが、独立事象としての重量の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、安全機能を損なわない設計とする。
- (5) 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設
 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設については、設計荷重による影響を受ける場合においても外部事象防護対象施設等に影響を及ぼさないよう、必要に応じて施設の補強、竜巻飛来物防護対策設備又は運用による竜巻防護対策を実施することにより、外部事象防護対象施設等の安全機能を損なわない設計とする。
- a. 循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋
 循環水ポンプ建屋、タービン建屋、電気建屋及び出入管理建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、倒壊により外部事象防護対象施設等へ波及的影響を及ぼさない設計とする。
- b. ディーゼル発電機排気消音器
 ディーゼル発電機排気消音器は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、ディーゼル発電機排気消音器が閉塞することがなく、ディーゼル発電機排気消音器が維持される設計とする。
 さらに、ディーゼル発電機排気消音器が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とし、外部事象防護対象施設であるディーゼル発電機排気消音器に機能的影響を及ぼさない設計とする。
- c. 主蒸気逃がし弁消音器
 主蒸気逃がし弁消音器は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、主蒸気逃がし弁消音器が損傷して閉塞することはない、主蒸気逃がし弁の排気機能が維持される設計とする。
 さらに、主蒸気逃がし弁消音器が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。
 以上より、主蒸気逃がし弁消音器が、外部事象防護対象施設である主蒸気逃がし弁に機能的影響を及ぼさず、主蒸気逃がし弁が安全機能を損なわない設計とする。

- d. 主蒸気安全弁排気管
主蒸気安全弁排気管は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、主蒸気安全弁排気管が損傷して閉塞することはない。主蒸気安全弁の排気機能が維持される設計とする。さらに、主蒸気安全弁排気管が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。
- 以上より、主蒸気安全弁排気管が、外部事象防護対象施設である主蒸気安全弁に機能的影響を及ぼさず、主蒸気安全弁が安全機能を損なわない設計とする。
- e. タービン動補助給水ポンプ排気管
タービン動補助給水ポンプ排気管は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、タービン動補助給水ポンプ排気管が損傷して閉塞することはない。タービン動補助給水ポンプの機関の排気機能が維持される設計とする。
- さらに、タービン動補助給水ポンプ排気管が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び自重等の常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とする。
- 以上より、タービン動補助給水ポンプ排気管が、外部事象防護対象施設であるタービン動補助給水ポンプに機能的影響を及ぼさず、タービン動補助給水ポンプが安全機能を損なわない設計とする。
- f. ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管
ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管は、設計飛来物の衝突により貫通することを考慮しても、ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管が閉塞することがなく、ディーゼル発電機燃料油貯油槽のベント機能が維持される設計とする。
- さらに、ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管が風圧力による荷重、気圧差による荷重及び常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し、安全機能を損なわない設計とし、外部事象防護対象施設であるディーゼル発電機燃料油貯油槽に機能的影響を及ぼさない設計とする。
- g. 換気空調設備（蓄電池室排気装置）
換気空調設備が原子炉補助建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。気圧差による荷重及び設備に常時作用する荷重に対しては、換気空調設備の構造健全性が維持される設計とする。
- 以上より、換気空調設備が、外部事象防護対象施設である蓄電池に機能的影響を及ぼさず、蓄電池が安全機能を損なわない設計とする。

4.4.2 建屋、構築物等の構造健全性の確認
設計荷重に対して、建屋・構築物等の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。

(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定
建屋・構築物等の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって設計対象施設に生じる変形や応力等を算定する方針である。設計対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として、現行の法律及び基準類^(注4.2)等に準拠して算定する。

(2) 構造健全性の確認

「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、設計対象施設（建屋・構築物等）が以下の構造健全性評価基準を満足する方針であることを確認する。

① 竜巻防護施設（外設となる施設等による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く）設計対象施設が終局耐力等の許容限界^(注4.2)に対して十分な安全余裕を有している。

② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

1) 設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.3)が、終局耐力等の許容限界^(注4.2)に対して十分な安全余裕を有している。

2) 設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.3)に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。^(注4.4)

(注4.2) 建築基準法、日本産業規格、日本建築学会及び土木学会等の規準・指針類、並びに日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEA4601-1987）等に準拠する。

(注4.3) 竜巻防護施設を内包する区画。

(注4.4) 貫通及び裏面剥離（コンクリート等の部材に衝突物が衝突した際に、衝突面の裏側でせん断破壊等に起因した剥離が生じる破壊現象）に対して、施設の構造健全性を確認することを基本とする。

4.4.3 設備の構造健全性の確認

設計荷重に対して、設備（系統・機器）の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。

(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定設備の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって設計対象施設に生じる変形や応力等を算定する方針である。設計対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として、現行の法律及び基準類^(注4.5)等に準拠して算定する。

(2) 構造健全性の確認

「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、設計対象施設（設備）が以下の構造健全性評価基準を満足する方針であることを確認する。

① 竜巻防護施設（外殻となる施設等による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く）設計対象施設が許容応力度等に基づく許容限界^(注4.5)に対して妥当な安全余裕を有している。

② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

1) 設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.6)が、許容応力度等に基づく許容限界^(注4.5)に対して妥当な安全余裕を有している。
 2) 設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.6)に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。^(注4.7)

(注4.5) 日本産業規格、日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）及び日本機械学会の規格・指針等に準拠する。

(注4.6) 竜巻防護施設を内包する区画。

(注4.7) 貫通及び裏面剥離（コンクリート等の部材に衝突物が衝突した際に、衝突面の裏側でせん断破壊等に起因した剥離が生じる破壊現象）に対して、施設の構造健全性を確認することを基本とする。

泊発電所3号機竜巻影響評価	原子力発電所の竜巻影響評価ガイド
<p>3.5 竜巻随伴事象に対する評価</p> <p>竜巻随伴事象は過去の竜巻被害事例及び泊発電所のプラント配置から、想定される事象である、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行い、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわないことを確認した。【添付資料3.4】</p>	<p>4.5 その他の確認事項</p> <p>4.4 に示す以外の確認事項については、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。例えば、中央制御室等の重要な区画等や非常用発電機等の重要な設備等に繋がる給排気ダクト類へ作用する風圧力が安全機能維持に与える影響等、安全機能維持の観点から重要と考えられる確認事項を設定する。そして、それぞれの項目について検討を行い、安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>5. 竜巻随伴事象に対する考慮</p> <p>5.1 概要 竜巻随伴事象に対して、竜巻防護施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>5.2 基本的な考え方及び検討事項 検討対象とする竜巻随伴事象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。 ただし、竜巻随伴事象として容易に想定される以下の事象については、その発生の可能性について検討を行い、必要に応じてそれら事象が発生した場合においても安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(1) 火災 設計竜巻等により燃料タンクや貯蔵所等が倒壊して、重油、軽油及びガソリン等の流出等に起因した火災が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>(2) 溢水等 設計竜巻による気圧低下等に起因した使用済燃料プール等の水の流出、屋外給水タンク等の倒壊による水の流出等が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p>
<p>(1) 火災 竜巻随伴事象として、設計竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器に衝突する場合及び屋外の危険物貯蔵施設等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。 建屋内については、飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近には、発電用原子炉施設の安全機能を損なわせる可能性のある発火性又は引火性物質を内包する機器は配置されておらず、火災防護計画により適切に管理することから、設計竜巻により建屋内に火災が発生することはなく、建屋内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。 建屋外については、発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえて火災の影響を評価した上で、外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とすることを「1.10 外部火災防護に関する基本方針」に記載する。 以上より、竜巻随伴事象としての火災に対して外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。</p> <p>(2) 溢水 竜巻随伴事象として、設計竜巻による気圧低下の影響や飛来物が建屋開口部付近の溢水源に衝突する場合及び屋外タンク等に飛来物が衝突する場合の溢水が想定される。 外部事象防護対象施設を内包する建屋内については、飛来物が侵入する場合でも、建屋開口部付近に飛来物が衝突して外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性のある溢水源が配置されておらず、設計竜巻により建屋内に溢水が発生することはない。また、建屋内は設計竜巻による気圧低下の影響を受けないことから建屋内の外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。 建屋外については、気圧低下の影響による屋外タンク等の破損は考え難いものの、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水が想定されるが、「1.7 溢水防護に関する</p>	

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	泊発電所3号機竜巻影響評価
<p>(3) 外部電源喪失</p> <p>設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷・竜^{ひょう}等、あるいはダウンバースト等により、送電網に関する施設等が損傷する等して外部電源喪失に至った場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>6. 附則 この規定は、平成25年7月8日より施行する。 本ガイドに記載されている以外の計算方法等を設計で使用する場合は、技術的見地等からその妥当性を示す必要がある。 また、竜巻等の発生頻度、特性及びメカニズム等に関する情報、並びに竜巻等による被害の実情に関する情報等が不足している現在の日本の状況では、竜巻等に係る最新情報の調査・入手に努めるとともに、本ガイドは、最新情報を反映して適宜見直しを行うものとする。 なお、将来に観測された竜巻の最大風速が、過去に観測された竜巻の最大風速を上回った場合は、本設計の妥当性について再度見直すこととする。</p>	<p>基本方針」にて、竜巻時の屋外タンク等の破損を想定し、溢水が安全系機器に影響を及ぼさない設計とされていることから、竜巻随伴事象による屋外タンク等が損傷して発生する溢水により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない。</p> <p>以上より、竜巻随伴事象としての溢水に対して外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。</p> <p>(3) 外部電源喪失</p> <p>設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により送電網に関する施設等が損傷して外部電源喪失が発生する場合は想定される。設計竜巻に対してディーゼル発電機の構造健全性を維持することにより、外部電源喪失の影響がなく外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお、ディーゼル発電機の付属設備について、安全機能を損なわないことを以下のとおり確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・吸排気については外気と繋がっているが、竜巻襲来時の短時間での圧力差による影響はない。 ・排気消音器出口に風圧力による荷重が作用して消音器内に大気が逆流した場合において、排気が阻害され系統内が閉塞気味になり、排気ガス温度が徐々に上昇し、通常運転時を超える温度となり出力制限となることが予想されるが、竜巻は長期間停滞することなく数秒～10数秒のオーダーで通過するため、この程度であれば排気ガス温度の急激な上昇はなくディーゼル発電機運転に支障を来すことはない。

竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱作業中止に係る運用について

1. 概要

原子炉建屋（燃料取扱棟）において、燃料取扱設備（燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン、燃料取扱棟クレーン、燃料取替キャナル、キャスクピット、燃料検査ピット）による燃料取扱作業を実施中に竜巻が襲来した場合、設計飛来物が原子炉建屋（燃料取扱棟）の外壁（鉄骨造部分）や扉を貫通し、当該設備に衝突して移送中又は取扱い中の燃料の構造健全性が損なわれる可能性があることから、竜巻襲来が予測される場合には、燃料取扱作業を中止することとしている。

ここでは、燃料取扱作業中止に係る運用について以下に示す。

2. 燃料取扱作業中止に係る運用

- ① 気象庁が発表する竜巻関連の気象情報（竜巻注意情報等）を判断基準とした竜巻退避対応（STEP3）時に燃料取扱作業を中止する。

表1 竜巻運用管理基準

竜巻警戒レベル	発令条件	運用対策
竜巻監視対応 (STEP1)	<ul style="list-style-type: none"> 後志西部地方のうち岩内町、共和町、泊村、神恵内村の4町村のうち、いずれかに「雷注意報（竜巻）」又は「雷注意報（ひょう）」が発表された場合 又は <ul style="list-style-type: none"> 「竜巻注意情報（石狩・空知・後志地方）」が発表された場合 	<ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストによる監視
竜巻退避準備対応 (STEP2)	<ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストにより、発電所上空に「竜巻発生確度2」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合 又は <ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストにより、発電所上空に「雷活動度2以上」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合 	<ul style="list-style-type: none"> 車両、人の退避準備等
竜巻退避対応 (STEP3)	<ul style="list-style-type: none"> レーダーナウキャストにより、発電所上空に「竜巻発生確度2」かつ「雷活動度3以上」が発生したことを確認した場合、又は予測値からその恐れがある場合 	<ul style="list-style-type: none"> 車両、人の退避 燃料取扱作業中止等

- ② 燃料移送装置にて移送中の燃料は原子炉建屋（外部遮へい建屋）内に移動する，又は使用済燃料ピットクレーンにて取扱い中の燃料は使用済燃料ラックに貯蔵する。
- ③ 使用済燃料ピットクレーンは使用済燃料ラック及び使用済燃料ラックに貯蔵している燃料に影響を及ぼさない待機位置へ退避する。

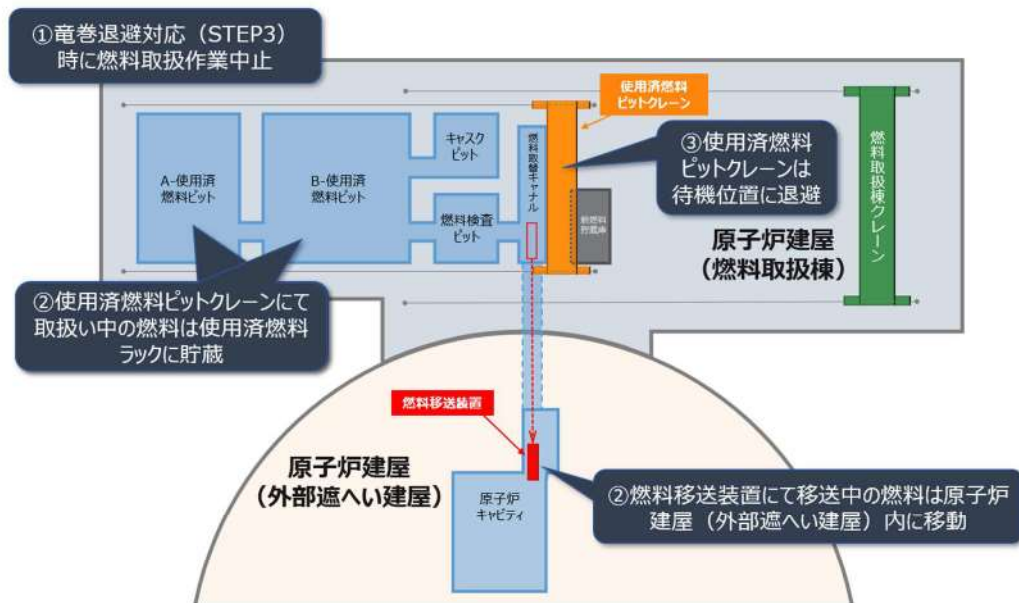


図1 燃料取扱作業中止に係る運用イメージ

泊発電所 3 号炉

運用，手順説明資料

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）

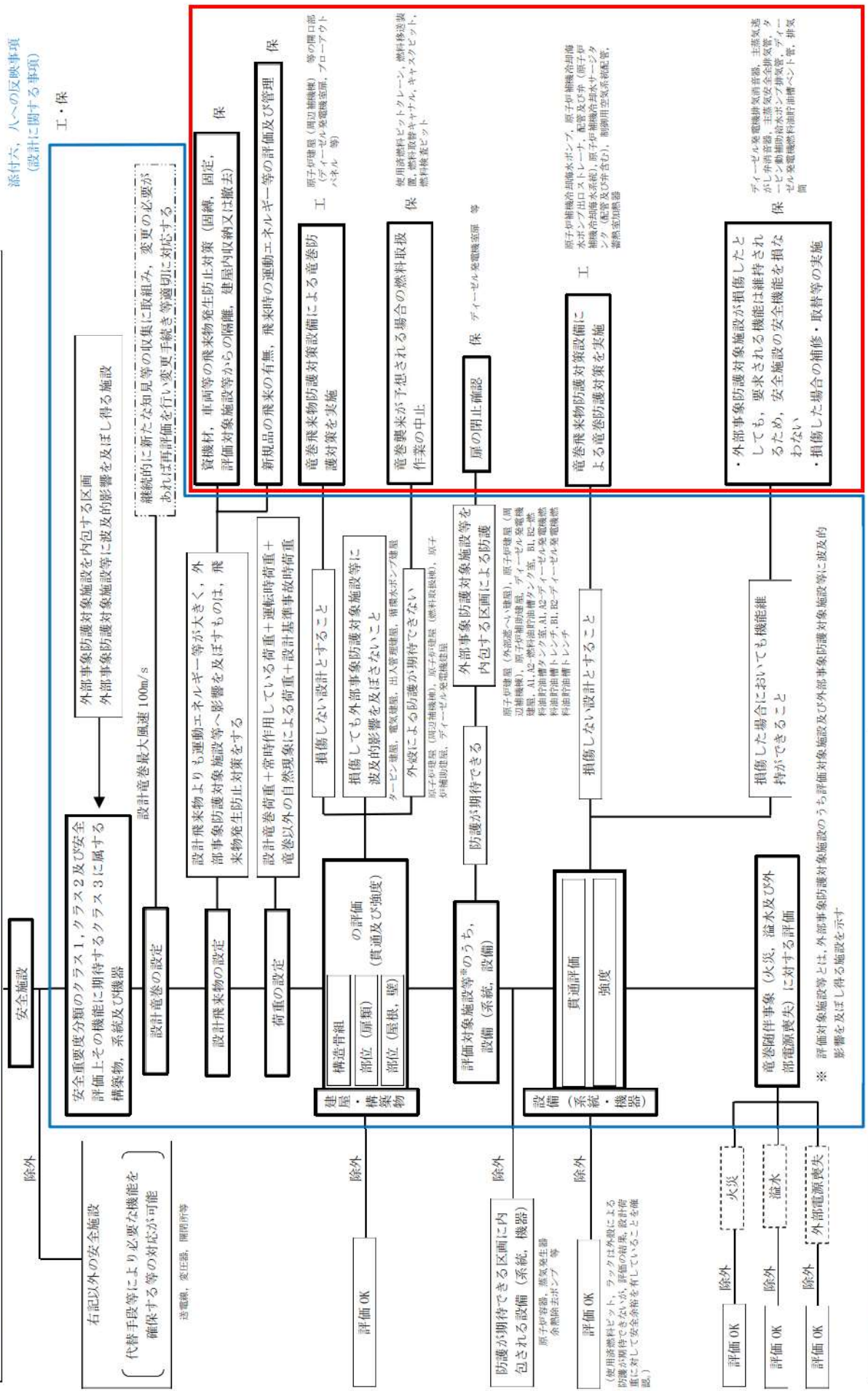
安全施設（兼用キヤスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

安全施設（兼用キヤスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

安全施設（兼用キヤスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわなければならない。



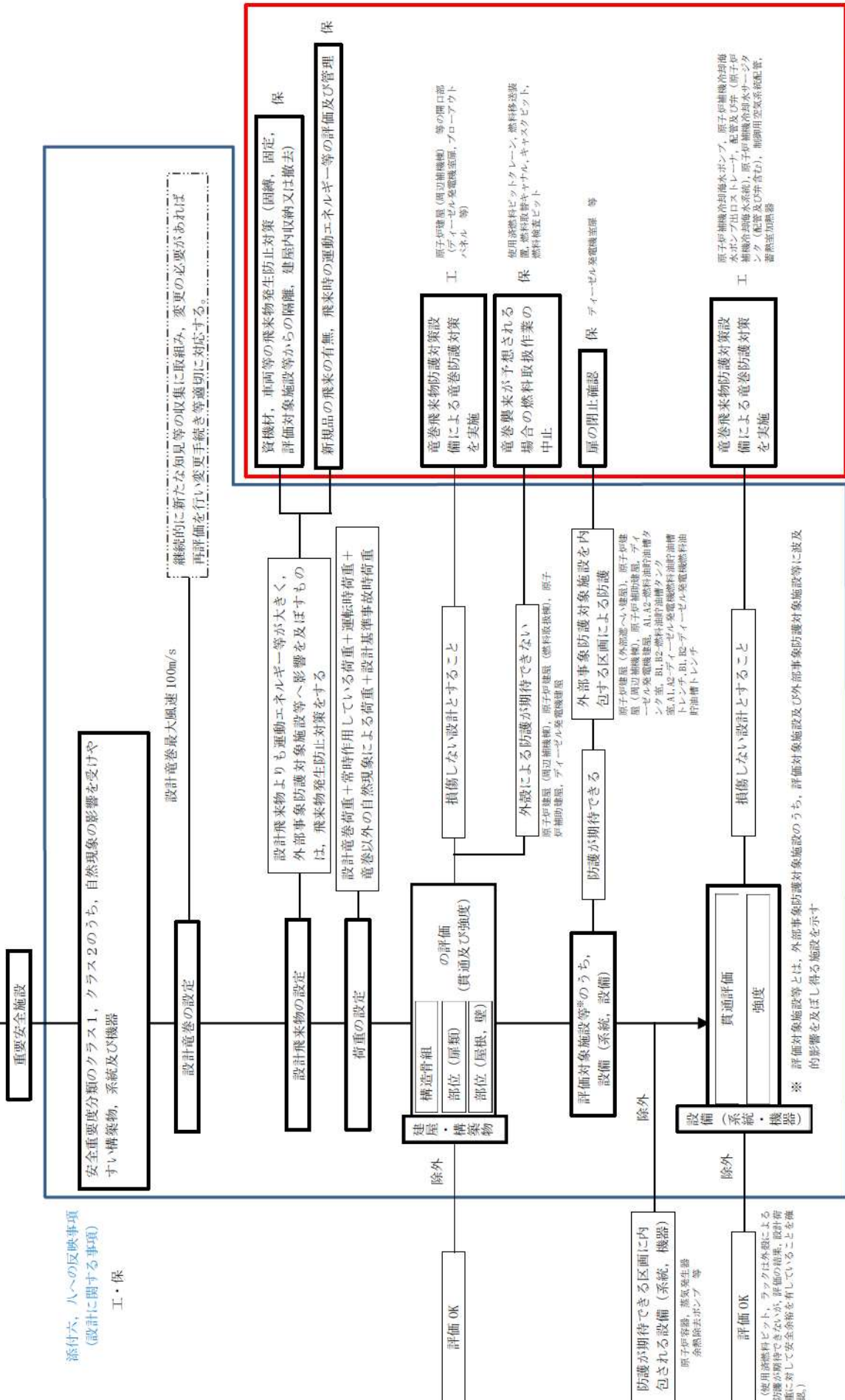
添付六、八への反映事項
(設計に関する事項)

工・保

添付六、八への反映事項 (手順に関する事項)

【後段規制との対応】
 工：工認（基本設計方針，添付書類）
 保：保安規定（運用，手順に係る事項，下位文書含む）
 【添付六、八の反映事項】
 □：添付六、八に反映
 □：当該条文に關係しない
 (他条文での反映事項他)

重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならぬ



添付六、八への反映事項
(設計に関する事項)
工・保

添付六、八への反映事項
(手順に関する事項)

【添付六、八の反映事項】
□ : 添付六、八に反映
□ : 添付六、八に反映
□ : 当該条文に開示しない
(他条文での反映事項他)

【後段規制との対応】
工: 工認(基本設計方針, 添付書類)
保: 保安規定(運用, 手順に係る事項, 下位文書含む)

運用, 手順に係る対策等 (設計基準)

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの 衝撃による損傷の防 止	資機材, 車両等管理 資機材, 車両等の飛 来物発生防止対策 (固縛, 固定, 評価 対象施設等からの隔 離, 建屋内収納又は 撤去)	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外の飛散するおそれのある資機材, 車両等については, 飛来時の運動エネルギー等への影響を評価し, 評価対象施設等への影響の有無を確認する。評価対象施設等への影響を及ぼす資機材, 車両等については, 固縛, 固定, 評価対象施設等からの隔離, 建屋内収納又は撤去の飛来物発生防止対策について手順等を定める ・資機材, 車両等の質量, 寸法, 形状から算出した飛来の有無, 飛来時の運動エネルギー等による飛来物発生防止対策 (固縛, 固定, 評価対象施設等からの隔離, 建屋内収納又は撤去) の評価方法手順及び評価結果の管理 ・担当部署による保守・点検の体制
		体制	
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> ・日常点検 ・定期点検 ・損傷時の補修
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・運用・手順, 体制, 保守・点検に関する教育

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの 衝撃による損傷の防 止	評価対象施設等を防 護するための操作・ 確認事項	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、評価対象施設等を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順等を定める [操作・確認事項] ・ 竜巻に関する情報入手及び情報入手後の対応 (情報の入手, 周知, 体制判断, 実施方法と手順) ・ 竜巻襲来が予想される場合の対応に関する運用・手順 (竜巻襲来が予想される場合の使用中の資機材の固縛等) ・ 竜巻襲来が予想される場合の燃料取扱作業の中止についての運用, 手順 ・ 扉 (ディーゼル発電機室扉 等) の閉止確認手順 [補修] ・ 設備が損傷した場合の代替設備の確保及び補修, 取替等の運用, 手順
		体制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 担当部署による作業中止等の実施体制 ・ 担当部署による扉閉止確認体制 ・ 竜巻襲来に備えた体制の構築, 実施及び解除の判断基準, 実施手順, 連絡方法等 ・ 担当部署による保守・点検の体制 ・ 担当部署による損傷箇所の補修体制
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日常点検 ・ 定期点検 ・ 損傷時の補修
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・手順, 体制, 保守・点検に関する教育