

【公開版】

提出年月日	令和2年7月13日	R11
日本原燃株式会社		

六ヶ所廃棄物管理施設における
新規制基準に対する適合性

安全審査 整理資料

第8条 外部からの衝撃による損傷の防止
(竜巻)

目 次

1 章 基準適合性

1. 基本方針

1. 1 要求事項の整理

1. 2 要求事項に対する適合性

1. 3 規則への適合性

2. 竜巻影響評価の基本方針

3. 設計対処施設

4. 基準竜巻・設計竜巻の設定

4. 1 竜巻検討地域の設定

4. 2 基準竜巻の最大風速の設定

4. 3 設計竜巻の最大風速の設定

5. 設計荷重（竜巻）の設定

5. 1 設計飛来物の設定

5. 2 荷重の組合せと許容限界

6. 評価に使用する風速場モデルについて

7. 竜巻防護設計

7. 1 竜巻防護対象施設を収納する建屋

7. 2 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設

7. 3 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

7. 4 竜巻随伴事象に対する設計

8. 手順等

2 章 補足説明資料

1章 基準適合性

1. 基本方針

1. 1 要求事項の整理

外部からの衝撃による損傷の防止について、事業許可基準規則第八条と再処理施設安全審査指針の比較並びに当該指針を踏まえたこれまでの許認可実績により、事業許可基準規則第八条において追加された要求事項を整理する。（第8. 1表（竜巻））

第8. 1 表 (竜巻) 事業許可基準規則第八條と再処理施設安全審査指針 比較表 (1 / 3)

事業許可基準規則 第八條 (外部からの衝撃による損傷の防 止)	再処理施設安全審査指針	備考
<p>1 廃棄物管理施設は、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性を損なわないものでなければならぬ。</p> <p>(解釈)</p> <p>1 第1項に規定する「想定される自然現象」とは、廃棄物管理施設の敷地及びその周辺の自然環境を基に、最新の科学的知見に基づき、洪水、風(台風)、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等から適用されるものをいう。なお、必要のある場合には、異種の自然現象の重畳を考慮すること。</p> <p>2 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性を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組合せに遭遇した場合において、自然事象そのものもたらず環境条件及びその結果として廃棄物管理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。</p>	<p>指針1. 基本的立地条件</p> <p>事故の誘因を排除し、災害の拡大を防止する観点から、再処理施設の立地地点及びその周辺における以下の事象を検討し、安全確保上支障がないことを確認すること。</p> <p>1. 自然環境</p> <p>(1) 地震、津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等の自然現象</p> <p>(2) 地盤、耐力、断層等の地質及び地形等</p> <p>(3) 風向、風速、降雨量等の気象</p> <p>(4) 河川、地下水等の水象及び水理</p> <p>(解説)</p> <p>1 自然環境及び社会環境について、申請者が行った文献調査及び現地調査の結果を、建物・構築物の配置を含む設計の妥当性の判断及び各種の評価に用いることが適切であることを確認するほか、必要に応じ現地調査等を行い、申請者の行った各種の調査結果の確認を行うものとする。</p>	<p>追加要求事項</p>

第8. 1表 (竜巻) 事業許可基準規則第八條と再処理施設安全審査指針 比較表 (2 / 3)

<p>事業許可基準規則 第八條 (外部からの衝撃による損傷の防 止)</p>	<p>再処理施設安全審査指針</p>	<p>備 考</p>
	<p>指針14 地震以外の自然現象に対する考慮</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 再処理施設における安全上重要な施設は、再処理施設の立地地点及びその周辺における自然環境をもとに津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等のうち予想されるものを設計基礎とすること。 2 これらの設計基礎となる事象は、過去の記録の信頼性を十分考慮のうえ、少なくともこれを下回らない苛酷なものであって、妥当とみなされるものを選定すること。 3 過去の記録、現地調査の結果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して設計基礎とすること。 	<p>前記のとおり</p>

第8. 1 表 (竜巻) 事業許可基準規則第八条と再処理施設安全審査指針 比較表 (3 / 3)

事業許可基準規則 第八条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	再処理施設安全審査指針	備考
<p>2 廃棄物管理施設は、事業所又はその周辺において想定される当該廃棄物管理施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの (故意によるものを除く。) に対して安全性を損なわないものでなければならぬ。</p> <p>(解釈)</p> <p>3 第2項に規定する「想定される当該廃棄物管理施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの (故意によるものを除く。)」とは、敷地及び敷地周辺の状況をもとに選択されるものであり、飛来物 (航空機落下等)、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突又は電磁的障害等をいう。なお、「航空機落下」については、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」 (平成14・07・29 原院第4号 (平成14年7月30日原子力安全・保安院制定)) 等を参考にし、防護設計の要否について確認すること。近隣工場における事故については、事故の種類と施設までの距離との関連においては、その影響を評価した上で、必要な場合、廃棄物管理施設の安全性を確保する上で必要な施設が適切に保護されていることを確認すること。</p>	<p>指針1 基本的立地条件</p> <p>事故の誘因を排除し、災害の拡大を防止する観点から、再処理施設の立地地点及びその周辺における以下の事象を検討し、安全確保上支障がないことを確認すること。</p> <p>2 社会環境</p> <p>(1) 近接工場における火災、爆発等</p> <p>(2) 航空機事故等による飛来物等</p> <p>(3) 水の利用状況、飲食物の生産・流通状況、人口分布状況等</p> <p>(解説)</p> <p>2 社会環境に関する事象として注目すべき点は、近接工場における事故及び航空機に係る事故である。</p> <p>近接工場における事故については、事故の種類と施設までの離隔距離との関連においてその影響を評価した上で、必要な場合、安全上重要な施設が適切に保護されていることを確認すること。</p> <p>航空機に係る事故については、航空機に係る施設の事故防止対策として、航空機の施設上空の飛行制限等を勘案の上、その発生の可能性について評価した上で、必要な場合は、安全上重要な施設のうち特に重要と判断される施設が、適切に保護されていることを確認すること。</p>	追加要求事項

1. 2 要求事項に対する適合性

(1) 外部からの衝撃による損傷の防止

廃棄物管理施設は、敷地内又はその周辺の自然環境を基に想定される洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等の自然現象（地震及び津波を除く。）又は地震及び津波を含む組合せに遭遇した場合において、自然現象そのものがもたらす環境条件及びその結果として当該施設で生じ得る環境条件においても、安全性を損なわない設計とする。

なお、敷地内又はその周辺で想定される自然現象のうち、洪水及び地滑り並びに津波については、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

また、廃棄物管理施設は、敷地内又はその周辺の状況を基に想定される飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等のうち廃棄物管理施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）（以下「人為事象」という。）に対して安全性を損なわない設計とする。

なお、敷地内又はその周辺において想定される人為事象のうち、ダムの崩壊及び船舶の衝突については、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

自然現象及び人為事象の組合せについては、地震、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、火山の影響、生物学的事象、森林火災等を考慮する。これらの事象が単独で発生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組合せを特定し、その組合せの影響に対しても安全性を損なわない設計とする。

(2) 竜巻

安全機能を有する施設は、想定される竜巻が発生した場合においても、作用する設計荷重に対してその安全機能を損なわない設計とする。

竜巻に対する防護設計を行うための設計竜巻の最大風速は 100m/s とし、設計荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重並びに安全機能を有する施設に常時作用する荷重、運転時荷重及びその他竜巻以外の自然現象による荷重等を適切に組み合わせたものとして設定する。

安全機能を有する施設の安全機能を損なわないようにするため、安全機能を有する施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策として、飛来物となる可能性のあるもののうち、運動エネルギー及び貫通力の大きさを踏まえ、設計上考慮すべき飛来物（以下「設計飛来物」という。）を設定する。飛来物となり得る資機材及び車両のうち、衝突時に与える運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物によるものより大きくなるものについては、固定、固縛、建屋収納、退避又は撤去を実施する。

また、再処理事業所外から飛来するおそれがあり、かつ、再処理事業所内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定されるものがある場合は、設計飛来物として考慮の可否を検討する。

竜巻に対する防護設計においては、機械的強度を有する建物により保護すること等により、安全機能を有する施設の安全機能を損なわない設計とすること、若しくは竜巻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、安全上支障が生じない期間での修理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。

1. 3 規則への適合性

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第八条 廃棄物管理施設は、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性を損なわないものでなければならない。

2 廃棄物管理施設は、事業所又はその周辺において想定される当該廃棄物管理施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全性を損なわないものでなければならない。

<適合のための設計方針>

第1項について

廃棄物管理施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して廃棄物管理施設の安全性を損なわない設計とする。

(1) 竜巻

日本で過去（1961年～2013年12月）に発生した最大の竜巻から、設計竜巻の最大風速は92m/sとなるが、竜巻に対する設計に当たっては、蓄積されている知見の少なさといった不確定要素を考慮し、将来の竜巻発生に関する不確実性を踏まえ、基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速を100m/sとし、安全機能を有する施設の安全機能を損なわないよう、飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

a. 飛来物の発生防止対策

竜巻により再処理事業所内の資機材が飛来物となり、安全機能を有する施設の安全機能を損なわないよう、以下の対策を行う。

- (a) 飛来物となる可能性のあるものを固定，固縛，建屋収納又は敷地から撤去する。
- (b) 車両の周辺防護区域内への入構の管理，竜巻の襲来が予想される場合の車両の固縛又は飛来対策区域外の退避場所への退避を行う。

b. 竜巻防護対策

安全機能を有する施設は，設計荷重（竜巻）に対して安全機能を損なわない設計とすること，若しくは竜巻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修理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。

安全上重要な施設は，竜巻防護対象施設とし，建物の外壁及び屋根により建物全体で適切に防護することにより安全機能を損なわない設計とすることを基本とする。

竜巻の発生に伴い，降雹が考えられるが，降雹による影響は竜巻防護設計にて想定している設計飛来物の影響に包絡される。また，冬季における竜巻の発生を想定し，積雪による荷重を適切に考慮する。

2. 竜巻影響評価の基本方針

原子力規制委員会の定める「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年 12 月 6 日原子力規制委員会規則第三十一号）」第八条では、外部からの衝撃による損傷防止として、廃棄物管理施設は、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性を損なわないものでなければならないとしており、敷地の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻を挙げている。

廃棄物管理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件事象等によって安全機能を有する施設の安全機能を損なわない設計であることを評価するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 13061911 号 原子力規制委員会決定）（以下「竜巻ガイド」という。）を参照し、以下の竜巻影響評価について実施する。

- (1) 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
- (2) 廃棄物管理施設における飛来物に係る調査
- (3) 飛来物発生防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する設計対処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

安全機能を有する施設は、廃棄物管理施設が竜巻の影響を受ける場合においてもその安全機能を確保するために、竜巻に対して安全機能を損なわない設計とする。

その上で、竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する施設を、廃棄物管理施設の全ての安全機能を有する構築物、系統及び機器とする。設計竜巻から防護する施設（以下「竜巻防護対象施設」という。）としては、冷却及び遮蔽の安全機能を確保する観点から、安全上重要な機能を有する構築物、系統及び機器を抽出する。竜巻防護対象施設及びそれらを収納する建屋（以下「竜巻防護対象施設等」という。）は、竜巻により冷却及び遮蔽の安全機能を損なわないよう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。

また、その施設の倒壊等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせる可能性がある施設及び竜巻防護対象施設を収納する建屋は、機械的強度を有すること等により、竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。ここで、竜巻防護対象施設、竜巻防護対象施設を収納する建屋及びその施設の倒壊等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせる可能性がある施設を併せて、設計対処施設という。

上記に含まれない安全機能を有する施設は、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理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。

なお、ガラス固化体輸送容器（以下「輸送容器」という。）にガラス固化体を収納した輸送容器は廃棄物管理施設内に一時的に保管されることを踏まえ、竜巻によりガラス固化体を収納した輸送容器に波及的破損を与えない設計とする。

【補足説明資料 2-1】

3. 設計対処施設

設計対処施設は、竜巻防護対象施設の安全機能を損なわないよう、設計竜巻に対して設計上の考慮を行う施設全体とする。

安全機能を有する施設は、冷却及び遮蔽の安全機能を損なわないようにするため、安全上重要な施設を竜巻防護対象施設とする。

これらの施設を第8.1図（竜巻）～第8.3図（竜巻）に示す選定フローに従い、竜巻による風圧力、気圧差及び飛来物に対する設計対処施設として選定するとともに竜巻防護対象施設を収納する建屋を設計対処施設として選定する。また、建屋に収納される竜巻防護対象施設のうち第8.4図（竜巻）に示す選定フローに従い選定される設計荷重（竜巻）に対して十分な耐力を有しない建屋に収納される竜巻防護対象施設及び開口部を有する室に設置される竜巻防護対象施設のうち第8.5図（竜巻）に示す選定フローに従い選定される竜巻防護対象施設は、建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設として選定する。

以上の選定結果から、竜巻防護対象施設は以下のように分類できる。

- a. 建屋に収納される竜巻防護対象施設（外気と繋がっている竜巻防護対象施設を除く）
- b. 屋外の竜巻防護対象施設
- c. 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設
- d. 建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設

なお、建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設及び屋外の竜巻防護対象施設に該当する施設はない。

また、安全上重要な施設以外の安全機能を有する施設については、当該施設の破損等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機

能を損なわせる可能性がある施設又はその施設の特定の区画を，竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として選定する。

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設としては，竜巻防護対象施設等を除く構築物，系統及び機器の中から，竜巻防護対象施設等に対し，倒壊による機械的影響を及ぼし得る施設及び付属施設の破損等による機能的影響を及ぼし得る施設を以下のとおり選定する。

竜巻防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設としては，建物・構築物の高さと竜巻防護対象施設等との距離を考慮して，破損又は倒壊により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせるおそれがある施設を竜巻防護対象施設に機械的影響を及ぼし得る施設として選定する。

竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設としては，竜巻防護対象施設の付属設備のうち屋外にあるもので，風圧力，気圧差及び飛来物の衝突による破損等により竜巻防護対象施設の安全機能を損なわせるおそれがある施設を竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設として選定する。

なお，安全上重要な施設以外の安全機能を有する施設で竜巻防護対象施設の付属設備のうち屋外にあるものに該当する施設はないことから，竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設はない。

選定した結果から，設計対処施設は以下に分類される。

- ・ 竜巻防護対象施設を収納する建屋
- ・ 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設
- ・ 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

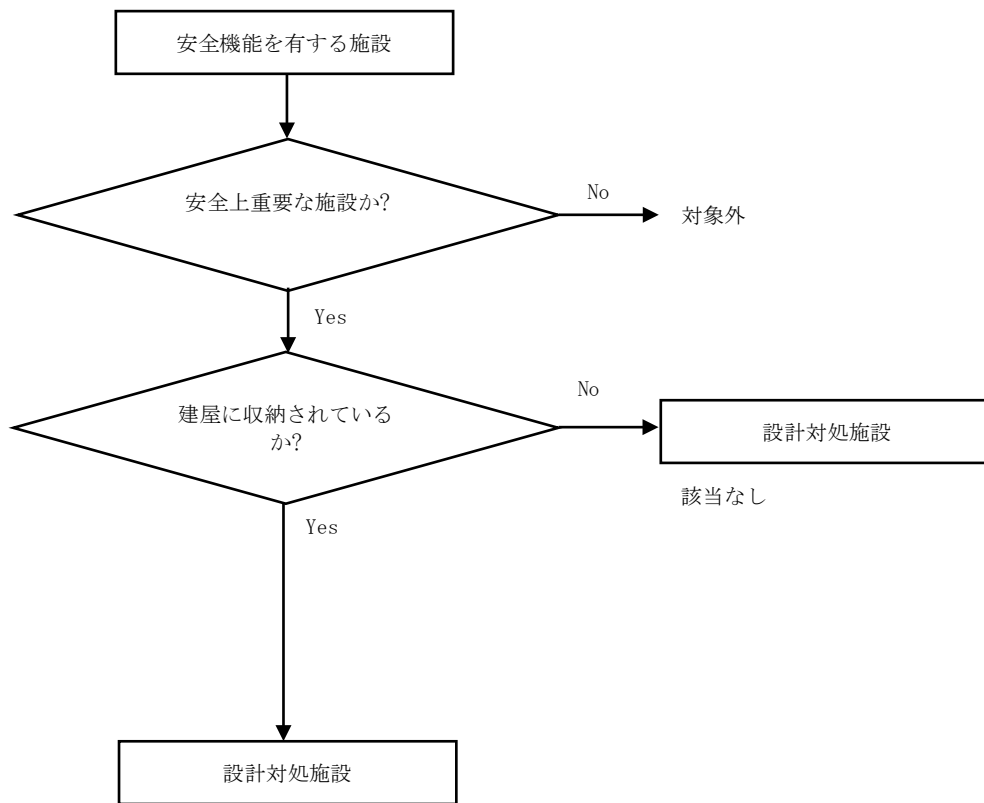
竜巻防護対象施設のうち，建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設として，ガラス固化体貯蔵設備の収納管を選定する。

竜巻防護対象施設を収納する建屋としてガラス固化体貯蔵建屋及びガラス固化体貯蔵建屋B棟を選定する。

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）及びガラス固化体受入れ建屋を選定する。

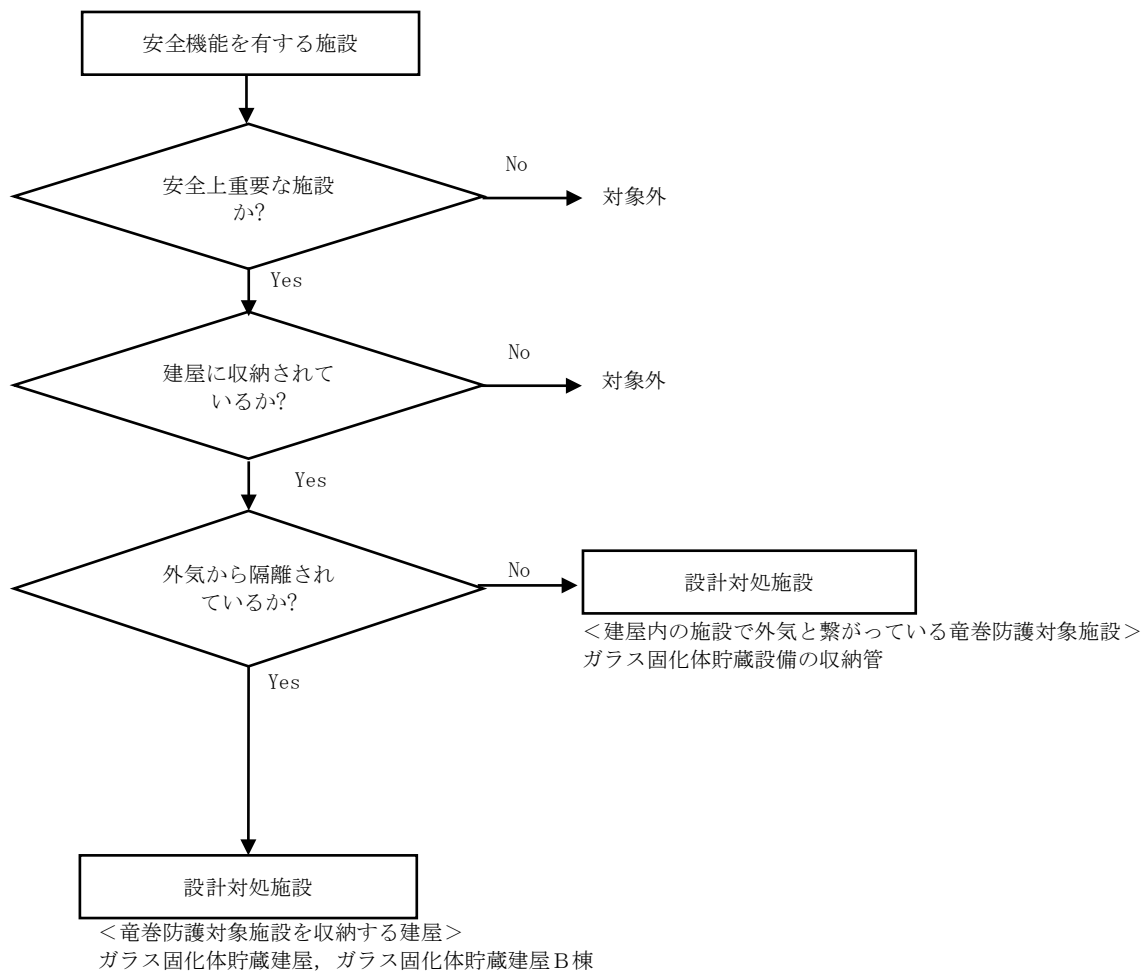
なお、廃棄物管理施設内に一時的に保管されるガラス固化体を収納した輸送容器は、竜巻により波及的破損を与えない設計とする。

【補足説明資料 3-1～3-3】

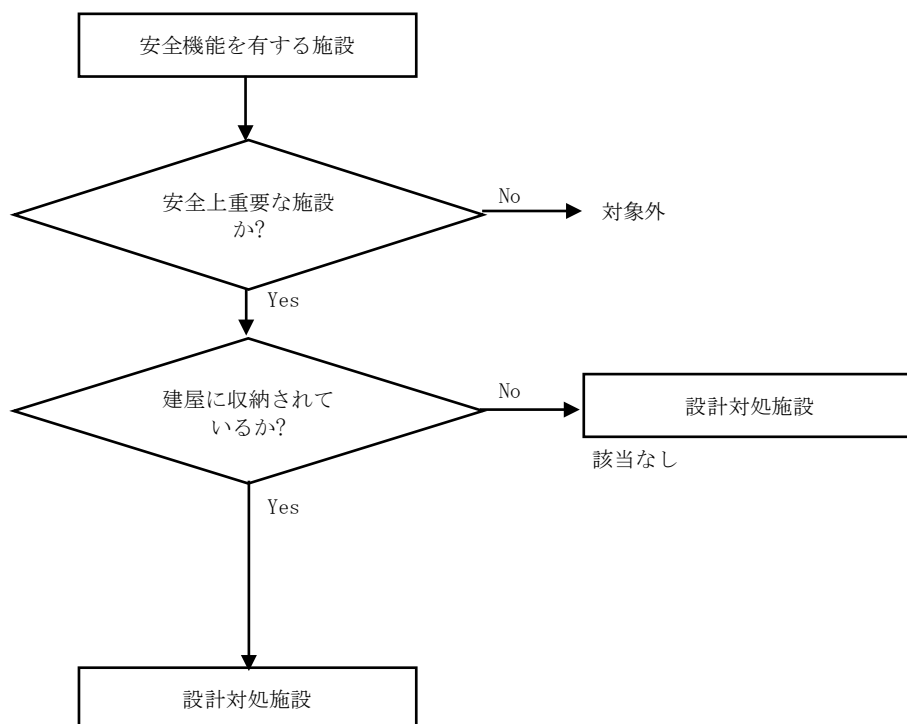


<竜巻防護対象施設を収納する建屋>
 ガラス固化体貯蔵建屋, ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第8. 1 図 (竜巻) 風圧力に対する設計対処施設の選定フロー

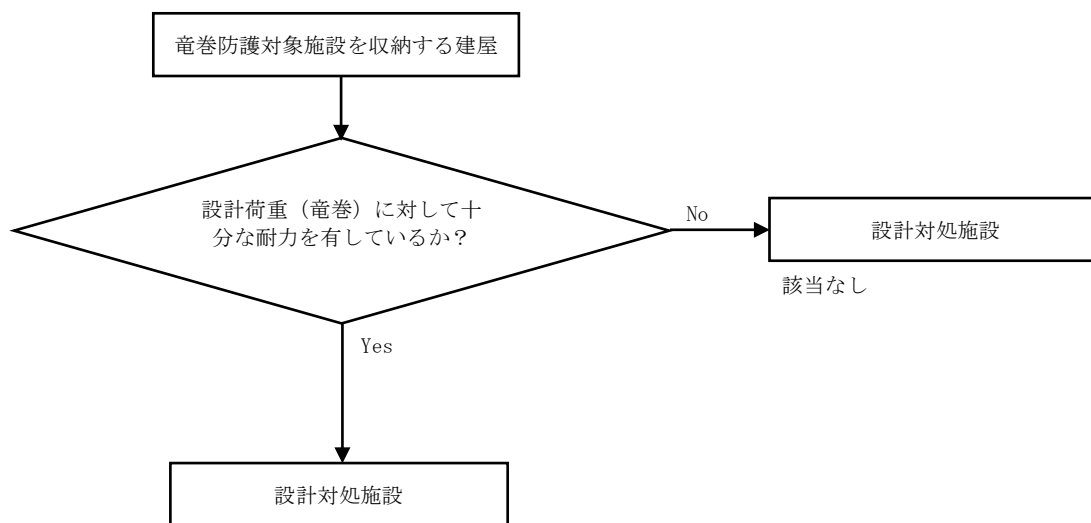


第8. 2 図 (竜巻) 気圧差に対する設計対処施設の選定フロー



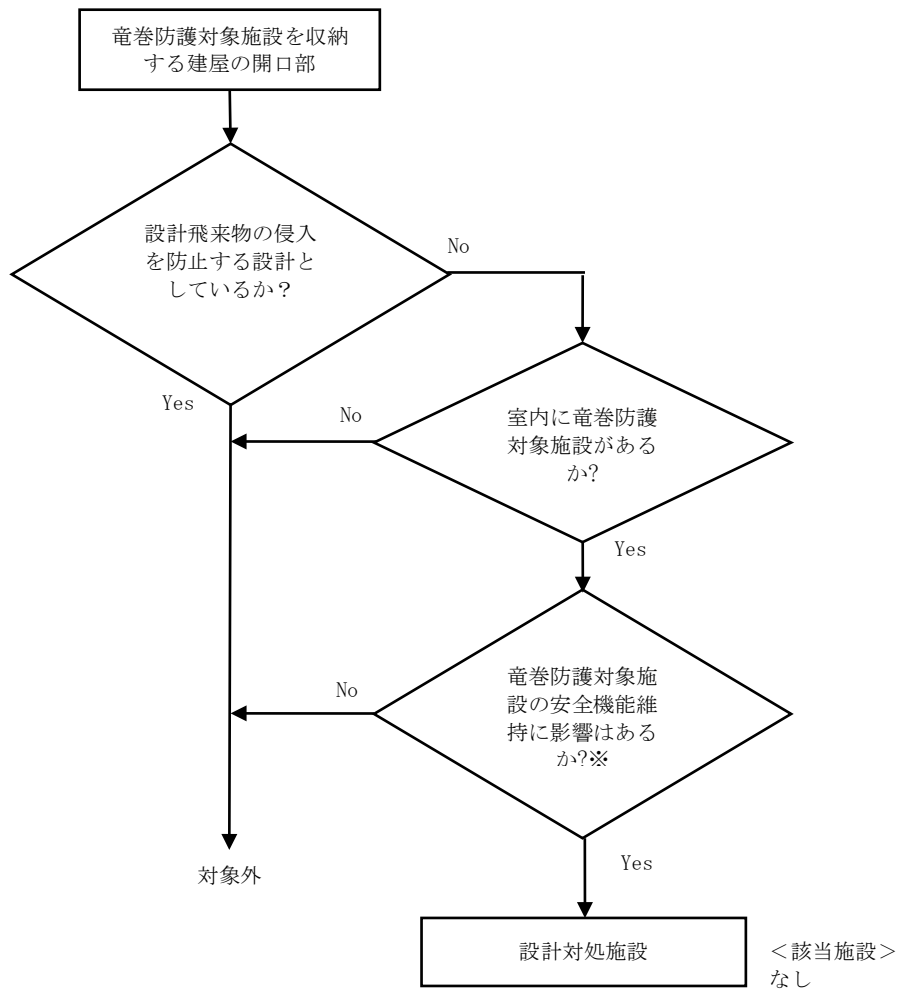
<竜巻防護対象施設を収納する建屋>
 ガラス固化体貯蔵建屋, ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第8. 3図 (竜巻) 飛来物に対する設計対処施設の選定フロー



＜竜巻防護対象施設を収納する建屋＞
 ガラス固化体貯蔵建屋， ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第8. 4図（竜巻） 建屋の耐力に関する設計対処施設の選定フロー



※設計飛来物が開口部を通じて室内へ侵入した場合に、安全上重要な施設へ衝突する可能性の有無を確認する。

第8. 5図（竜巻） 開口部に対する設計対処施設の選定フロー

4. 基準竜巻・設計竜巻の設定

基準竜巻及び設計竜巻の設定は竜巻ガイドを参考に実施する。

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

4. 1 竜巻検討地域の設定

竜巻検討地域は、竜巻ガイドを参考に廃棄物管理施設が立地する地域、気象条件の類似性の観点から検討し設定する。

(1) 廃棄物管理施設が立地する地域の気候

廃棄物管理施設が立地する地域は、竜飛岬から奥羽山脈の分水嶺より東側にあり、その地域の気候は、日本海側の気候と太平洋側の気候の両面の特徴を合わせもっている。東北地方を気温、降水及び風により詳細に区分した気候区分を第8. 6図（竜巻）に示す。これによると、廃棄物管理施設が立地する地域は、区分Ⅲ（青森県北部及び東部地域）のうち区分Ⅲb（太平洋側にあるが冬は日本海側の気候型でやませの影響が強い）に属している。

(2) 廃棄物管理施設が立地する地域の竜巻発生の特徴

第8. 7図（竜巻）に示すとおり、廃棄物管理施設が立地する地域周辺においては、もともと竜巻の発生数は少なく、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（以下「東京工芸大学委託成果」という。）で示されている、全国19個の竜巻集中地域からも離れている。

竜巻発生時の総観場は、東京工芸大学委託成果を参考に、気象庁「竜巻等の突風データベース」の総観場を、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して、7種に再編した総観場を用い、竜巻の発生要因別の地域分布の特徴を把握した。竜巻の発生要因別地域分布を第8.

8 図（竜巻）に，その特徴を第 8. 2 表（竜巻）に示す。

立地地域周辺における竜巻の発生状況は，日本海側や，茨城県以西の太平洋側における発生状況とも特徴が異なり，日本海側に特徴的な寒候期の竜巻の発生はほとんどなく，暖候期に竜巻が発生している。また，茨城県以西の太平洋側で特徴的な台風起源の竜巻の発生はなく，太平洋海岸付近及び海上での竜巻の発生はほとんどない。

(3) 竜巻検討地域

竜巻検討地域の設定は，竜巻ガイドを参考に，廃棄物管理施設が立地する地域の気候及び竜巻発生観点での特徴を踏まえて実施する。当該地域はもともと竜巻の発生数が少ないため，以下の a. ～ d. に示す条件を考慮して，青森県から岩手県の太平洋側（竜飛岬から御崎岬）及び北海道地方の南側（白神岬から襟裳岬）の海岸線に沿った海側 5 k m 及び陸側 10 k m の範囲を竜巻検討地域に設定する（面積約 18,000 k m²）。第 8. 9 図（竜巻）に竜巻検討地域を示す。

- a. 立地地域の気候及び竜巻発生観点での特徴を踏まえ，青森県（竜飛岬より太平洋側）から岩手県を基本とする。
- b. I A E A の基準を参考に，廃棄物管理施設を中心とする 10 万 k m²（半径約 180 k m）の範囲を目安とし，その範囲に掛かる北海道南西部は，立地地域と同じ太平洋側に面していることを考慮して，竜巻検討地域に含める。
- c. 竜巻検討地域は，分水嶺及び関口武による気候区分（1959）を参考に設定する。
- d. 廃棄物管理施設が海岸線から約 5 k m の位置に立地していること及び竜巻の発生がほとんど海岸線付近であることから，海岸線に沿った海側 5 k m 及び陸側 10 k m の範囲を考える。

ここで、設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために、竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率と、日本海側及び太平洋側における出現比率とを比較した結果を第8.10図（竜巻）に示す。竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率は、日本海側及び太平洋側の出現比率とも傾向が異なっていることが確認できる。

また、藤田スケール3以上の竜巻の発生しやすさの地域性の検討として、「突風関連指数」による解析を行う。突風関連指数として、積乱雲を発生させる上昇流の強さの目安であるCAPE（Convective Available Potential Energy：対流有効位置エネルギー）及び積乱雲がスーパーセルに発達しやすいかどうかの指標となるSRH（Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティ）を算出する。

これらの指数は、竜巻発生環境との関連付けで、国内外で広く利用され知見が蓄積されている。CAPEの概念を第8.11図（竜巻）に、SRHの概念を第8.12図（竜巻）に示す。

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta'(z) - \theta(z)}{\theta(z)} dz \quad (a)$$

$$SRH = \int_{地上}^{高度3km} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz \quad (b)$$

ここで、式(a)のgは重力加速度、 θ はストーム周囲の温位、 θ' は下層の空気塊を上空に持ち上げた際の温位であり、dzは鉛直方向の層厚である。LFCは自由対流高度、ELは平衡高度である。式(b)のVは水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は鉛直シアに伴う水平渦度、Cはストームの移動速度である。

各指数の計算は、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）の再

解析データ ECMWF-Interim (1989年以降：水平分解能約70 km) 及びERA40 (1989年まで：水平分解能約250 km) を基に，水平分解能5 km，時間分解能1時間に解析した気象データセットを用いて，1961年～2010年までの50年間について行い，それに基づいて両指数が同時に閾値を超過する頻度を計算する。同時超過頻度の算出に当たっては，竜巻発生時には少なからず降水がもたらされるため，降水量の閾値(4 mm/h)を設定する。また，CAPEは降水過程により安定化し小さくなり得るため，周辺のCAPEの大きな空気塊が当該メッシュに向かって流入することを考慮した方法を参考に，当該メッシュの風上側半径25 kmの扇状範囲内のCAPEの最大値を算出する。

CAPEについては，緯度及び季節で絶対値が大きく変動するため，暖候期(5月～10月)及び寒候期(11月～4月)に分けて，それぞれ閾値を設定する。藤田スケール3以上の竜巻が発生し得る環境場として以下の閾値を用いる。

[暖候期(5月～10月)]

$$\text{CAPE} : 1,200 \text{ J/kg}, \quad \text{SR e H} : 350 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

[寒候期(11月～4月)]

$$\text{CAPE} : 500 \text{ J/kg}, \quad \text{SR e H} : 350 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

暖候期及び寒候期に対する同時超過頻度分布の算出結果を第8.13図(竜巻)に示す。暖候期においては，太平洋側及び東シナ海から対馬海峡にかけては比較的大きな値となっている。また，沿岸域では，茨城県東海岸から西の本州太平洋側，九州太平洋側及び東シナ海側で高く，特に宮崎平野沿岸では大きい値となっている。それに比べて，日本海側及び茨城県以北の太平洋側の値は1～2桁以上小さな値であり，藤田スケ

ール3規模の竜巻の発生が未だ確認されていないことと対応している。

本手法による解析により、藤田スケール3以上の竜巻の発生しやすさの地域性を特定でき、竜巻検討地域において藤田スケール3以上の竜巻は極めて発生し難いといえる。

4. 2 基準竜巻の最大風速の設定

基準竜巻の最大風速は、竜巻ガイドを参考に、過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) のうち、大きな風速を設定する。

(1) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) の設定に当たっては、日本で過去 (1961年～2013年12月) に発生した最大の竜巻は藤田スケール3であり、藤田スケール3における風速は70m/s～92m/sであることから、その最大風速を基に V_{B1} を92m/sとする。第8. 3表 (竜巻) に日本で過去に発生した藤田スケール3の竜巻の一覧を示す。

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻最大風速のハザード曲線は、竜巻ガイドを参考とした既往の算定方法に基づき、具体的には、東京工芸大学委託成果を参考に算定する。本評価は、竜巻データの分析、竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布の算定、相関係数の算定並びにハザード曲線の算定によって構成される。

a. 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」に掲載されている竜巻年別発生確認数 (第8. 14図 (竜巻)) を基に、竜巻検討地域 (海岸線から陸側に10km, 海側に5kmの計15km幅の範囲) における1961年～2013年12月までの53年間の統計量を藤田スケール別に算出する。また、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつきを踏まえ、以下の(a)～(c)の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

(a) 被害が小さくて見過ごされやすい藤田スケール0及び藤田スケール

不明の竜巻に対しては、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。

- (b) 被害が比較的軽微な藤田スケール1竜巻に対しては、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- (c) 被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられる藤田スケール2及び藤田スケール3竜巻に対しては、観測記録が整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

また、藤田スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

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藤田スケールが推定されるため、陸上での藤田スケール不明の竜巻は、被害が少ない藤田スケール0竜巻とみなす。

一方、海上で発生しその後上陸しなかった竜巻については、その竜巻の藤田スケールを推定することは困難であることから、「沿岸部近傍での竜巻の発生特性は、陸上と海上とで類似している」という仮定に基づいて各藤田スケールに分類する。

以上を踏まえて、第8.4表（竜巻）のとおり、観測データから53年間の推定データを評価する。

竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布となり、東京工芸大学委託成果にポリヤ分布への適合性が良いことが示されている。以上より、ハザード曲線の評価に当たって使用する竜巻の年発生数の確率分布は、第8.15図（竜巻）に示すとおりポリヤ分布を採用する。

b. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布並びに相関係数

竜巻検討地域における53年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さ

を基に、確率密度分布については竜巻ガイド及び竜巻ガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参考に、第8.16図（竜巻）～第8.18図（竜巻）に示すとおり対数正規分布に従うものとする。

また、53年間の推定データの作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には、被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与える。その際は、被害幅又は被害長さが長いほうから優先的に用いることで、被害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように評価を行う。

さらに、1961年以降の観測データのみを用いて、第8.5表（竜巻）に示すとおり竜巻風速、被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。

c. 竜巻影響エリアの設定

廃棄物管理施設の設計対処施設を包含する円を設置面積とみなし、第8.19図（竜巻）に示すとおり竜巻影響エリアとして設定する。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

d. ハザード曲線の算定

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が V_0 以上となる確率を求め、ハザード曲線を求める。

前述のとおり、竜巻の年発生数の確率分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式（a）で示される（W e n a n d C h u）。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (a)$$

ここで、Nは竜巻の年発生数、 v は竜巻の年平均発生数、Tは年数である。 β は分布パラメータであり、式（b）で示される。

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

ここで、 σ は竜巻の年発生数の標準偏差である。

Dを竜巻影響評価の対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象と定義し、対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ としたとき、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が V_0 以上となる確率は式(c)で示される。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (c)$$

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 （すなわち、竜巻検討地域の面積約 $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）、1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式(d)で示される。

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

ここで、 $E[DA(V_0)]$ は $DA(V_0)$ の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式(d)により $R(V_0)$ を推定して、式(c)により $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅を w 、被害長さを l 、移動方向を α とし、同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(e)で示される(Garson et al.)。

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

ここで、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に対象構造物を投影したときの長さである。竜巻影響エリアを円形で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径180mで一定となる（竜巻の移動方向に依存しない）。 S は竜巻影響エリアの面積（直径180mの円の面積：約 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ）を表す。竜巻影響エリアの直径を D_0 とした場合の計算式は式 (f) で示される。

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

風速の積分範囲の上限値は、ハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120 m/s に設定する。

また、 $W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅であり、式 (g) で示される。この式により、被害幅内の風速分布に応じて被害様相に分布がある（被害幅の端ほど風速が小さくなる）ことが考慮されている（Garson et al.）。

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

ここで、係数の1.6について、既往の研究では例えば0.5や1.0などの値も提案されている。竜巻ガイドが参考としている文献（Garson et al.）では、観測値が不十分であるため、より厳しい評価となるよう1.6を用いることが推奨されており、本検討でも1.6を用

いる。また、廃棄物管理施設の竜巻影響評価では、ランキン渦モデルによる竜巻風速分布に基づいて設計竜巻の特性値を設定する。ランキン渦モデルは高さ方向によって風速及び気圧が変化しないため、地表から上空まで式（g）を適用できる。なお、式（g）において係数を1.0とした場合がランキン渦モデルに該当する。

また、 V_{min} は、*gale intensity velocity* と呼ばれ、被害が発生し始める風速に位置付けられる。米国気象局 NWS（*National Weather Service*）では、*gale intensity velocity* は34～47ノット（17.5～24.2m/s）とされている。また、気象庁が使用している風力階級では、風力8は疾強風（*gale*：17.2～20.7m/s）、風力9は大強風（*strong gale*：20.8～24.4m/s）と分類されており、風力9では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされている。以上を参考に、本評価においては、 $V_{min}=25\text{m/s}$ とする。なお、この値は藤田スケール0（17～32m/s）のほぼ中央値に相当する。

以上より、竜巻検討地域を対象に算定したハザード曲線を第8.20図（竜巻）に示す。

e. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速（ V_{B2} ）

竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は、竜巻ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速とし、39m/sとする。

f. 1km範囲ごとの評価（参考評価）

竜巻検討地域を海岸線に沿って1km範囲ごとに細分化した短冊状の範囲を対象にハザード曲線を求める。評価の条件として、発生数は、短冊状の範囲を通過した竜巻もカウントしている。被害幅及び被害長

さは、それぞれ 1 k m 範囲内の被害幅及び被害長さを用いる。以上に基づいて、竜巻検討地域の評価と同様の方法で算定したハザード曲線を第 8. 21 図（竜巻）に示す。これより、年超過確率 10^{-5} に相当する風速を求めると、海岸線から陸側 1 k m を対象とした場合の 56 m/s が最大となる。ただし、廃棄物管理施設は海岸線から陸側 1 k m の範囲にないため、本評価は参考とする。

(3) 基準竜巻の最大風速

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=92\text{ m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=39\text{ m/s}$ より、廃棄物管理施設における基準竜巻の最大風速 V_B は 92 m/s とする。風速 92 m/s に相当する年超過確率は、ハザード曲線より 1.86×10^{-8} である。

4. 3 設計竜巻の最大風速の設定

廃棄物管理施設が立地する地域の特性を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

廃棄物管理施設では、敷地が平坦であり、竜巻の増幅を考慮する必要のある地形はないと考えられるため、基準竜巻の最大風速に対する割り増しは行わず、設計竜巻の最大風速は92m/sとなるが、竜巻に対する設計に当たっては、蓄積されている知見の少なさといった不確定要素を考慮し、将来の竜巻発生に関する不確実性を踏まえ、基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速を100m/sとする。風速100m/sに相当する年超過確率は、ハザード曲線より 6.66×10^{-9} である。

【補足説明資料 4-1～4-6】

第8. 2表（竜巻） 竜巻の発生要因別の地域分布の特徴

総観場 ^{注)}	気象庁竜巻データベースの分類	発生分布の特徴
台風	台風	関東以西の太平洋側(特に東～南方向に開けた地域)で発生頻度が高く、F2、F3スケールの強い竜巻も多い。
温帯低気圧	南岸低気圧、日本海低気圧、二つ玉低気圧、東シナ海低気圧、オホーツク海低気圧、その他(低気圧)、寒冷前線、温暖前線、閉塞前線	全国的に発生頻度が高く、F2、F3スケールの竜巻も見られる。特に、南～西方向に開けた地域はより頻度が高い。
季節風(夏)	暖気の移流、熱帯低気圧、湿舌、太平洋高気圧	太平洋側や内陸を中心に、全国的に多くみられる。
季節風(冬)	寒気の移流、気圧の谷、大陸高気圧、季節風	日本海側や関東以北で発生頻度が高い。
停滞前線	停滞前線、梅雨前線、前線帯、不安定線、その他(前線)	関東以西でみられる。
局地性	局地性擾乱、雷雨(熱雷)、雷雨(熱雷を除く)、地形効果、局地性降水	地形的な影響によるものであり、全国で発生している。
その他	移動性高気圧、中緯度高気圧、オホーツク海高気圧、帯状高気圧、その他(高気圧)、大循環異常、その他	全国的に発生数が少なく、地域差はみられない。

注) 東京工芸大学委託成果を参考に、気象庁「竜巻等の突風データベース」の総観場を、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して、7種に再編した。

第8. 3表（竜巻） 日本で過去に発生したF3竜巻

(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

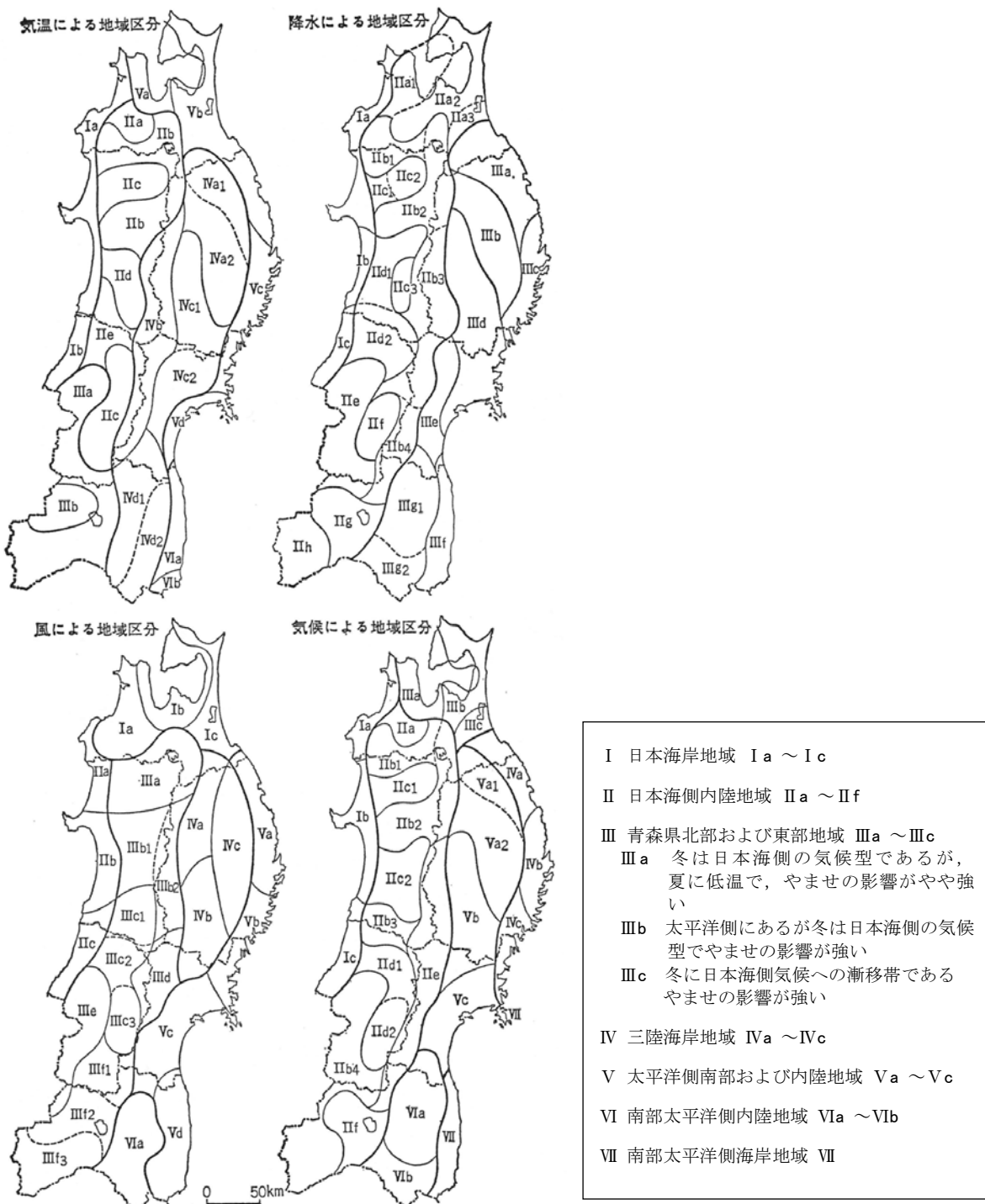
発生日時	発生場所		
	緯度	経度	発生場所
1971年07月07日07時50分	35度54分20秒	139度40分45秒	埼玉県大宮市
1990年12月11日19時13分	35度28分39秒	140度18分57秒	千葉県茂原市
1999年09月24日11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県豊橋市
2006年11月07日13時23分	43度59分20秒	143度42分25秒	北海道網走支庁 佐呂間町
2012年05月06日12時35分	36度6分38秒	139度56分44秒	茨城県つくば市

第8. 4表 (竜巻) 竜巻発生数の分析結果

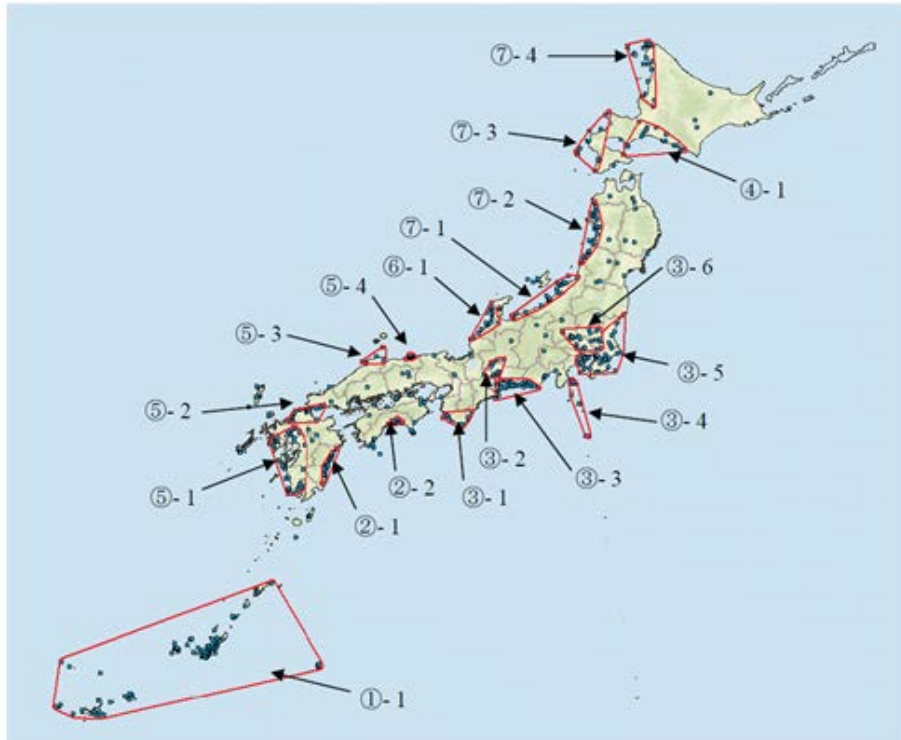
発生数の統計	(陸上+上陸) 竜巻										海上竜巻	総数
	F0	F1	F2	F3	F4	不明	小計					
1961/1～2013/12 (53年間)	期間内総数 (個)	6	9	4	0	0	0	1	20	5	25	
	年平均 (個)	0.11	0.17	0.08	0.00	0.00	0.02	0.38	0.09	0.47		
	標準偏差 (個)	0.58	0.51	0.27	0.00	0.00	0.14	0.97	0.41	1.08		
1991/1～2013/12 (23年間)	期間内総数 (個)	6	9	2	0	0	1	18	5	23		
	年平均 (個)	0.26	0.39	0.09	0.00	0.00	0.04	0.78	0.22	1.00		
	標準偏差 (個)	0.86	0.72	0.29	0.00	0.00	0.21	1.35	0.60	1.48		
2007/1～2013/12 (7年間)	期間内総数 (個)	5	3	0	0	0	0	8	4	12		
	年平均 (個)	0.71	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	0.57	1.71		
	標準偏差 (個)	1.50	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	0.98	2.06		
推定データ (53年間) (抜分後)	期間内総数 (個)	57	32	6	0	0	0	95		95		
	年平均 (個)	1.07	0.58	0.11	0.00	0.00	0.00	1.76		1.76		
	標準偏差 (個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06		2.06		
推定データ (53年間) (全竜巻)	期間内総数 (個)	57	32	6	0	0	0	95		95		
	年平均 (個)	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00	0.00	1.79		1.79		
	標準偏差 (個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06		2.06		

第8.5表（竜巻） 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数

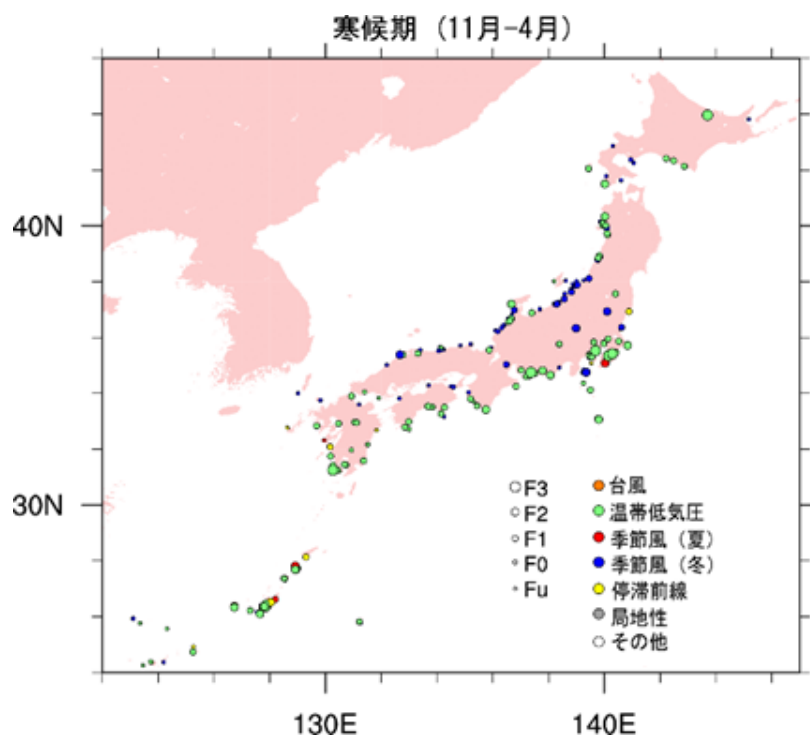
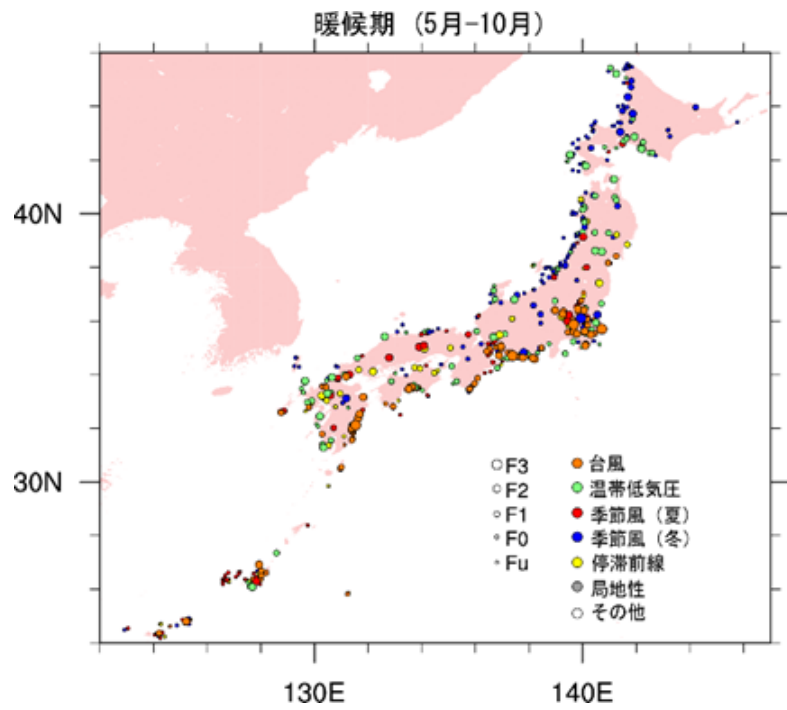
相関係数（対数）	風速（m/s）	被害幅（m）	被害長さ（m）
風速（m/s）	1.0000	0.0800	0.4646
被害幅（m）	0.0800	1.0000	0.2418
被害長さ（m）	0.4646	0.2418	1.0000



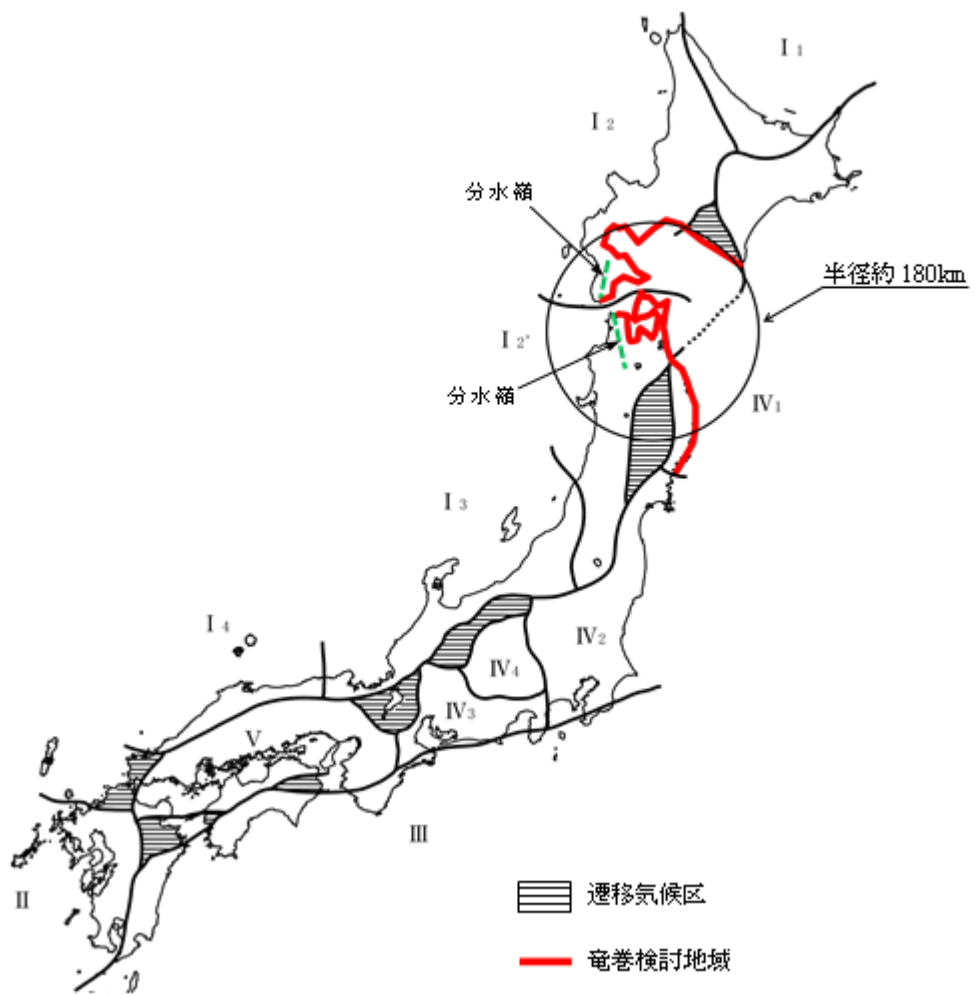
第8. 6図 (竜巻) 吉野正敏 (1967~) による東北地方の気候区分



第8. 7図（竜巻） 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域

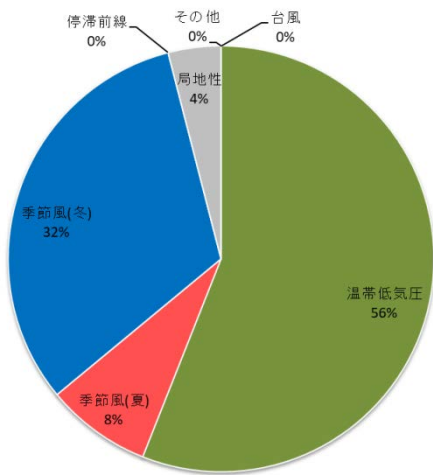


第8. 8図 (竜巻) 竜巻の発生要因別地域分布



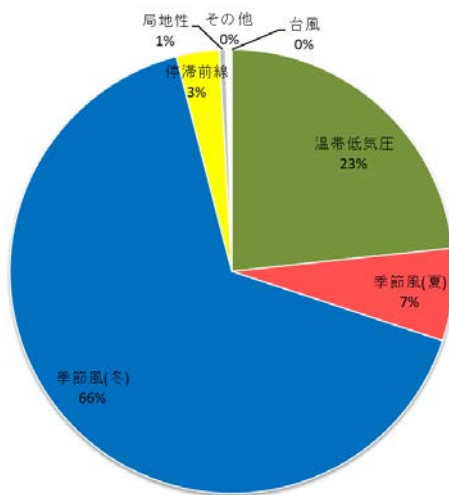
第8.9図（竜巻） 竜巻検討地域

関口武（1959）：日本の気候区分を基に作成



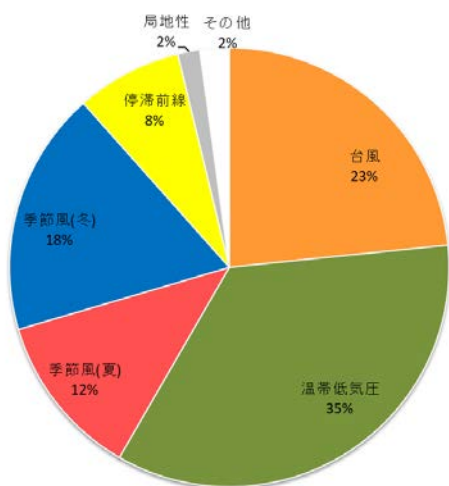
◆ 竜巻検討地域

- ・ 「温帯低気圧」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 太平洋側で多くみられる「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



◆ 北海道～山口県の日本海側 (223 事例)

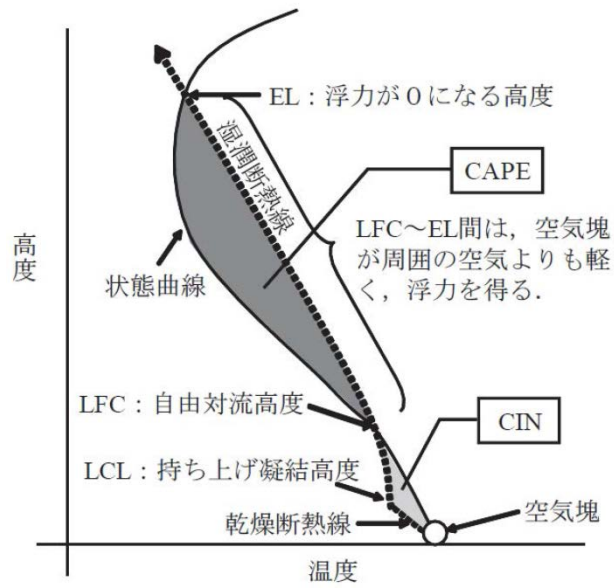
- ・ 「季節風(冬)」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



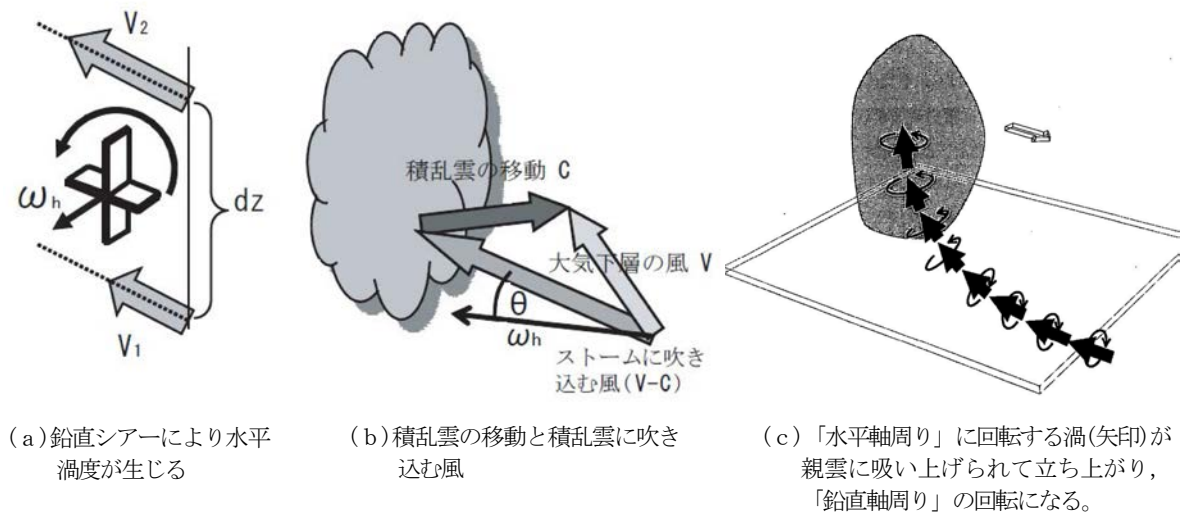
◆ 茨城県以西の太平洋側 (372 事例)

- ・ 竜巻検討地域と比較して、「台風」, 「季節風(夏)」, 「停滞前線」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 太平洋側から暖かく湿った気流が、竜巻の親雲の発達を促すと考えられる。

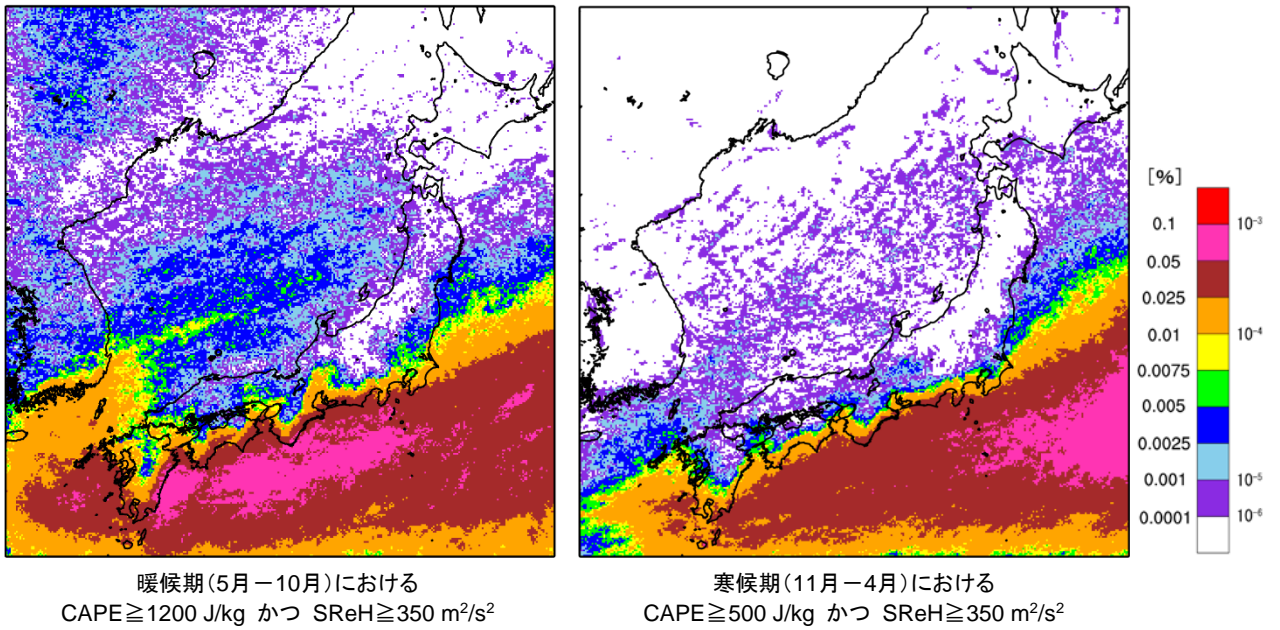
第 8. 10 図 (竜巻) 竜巻検討地域等における竜巻の発生要因の出現比率



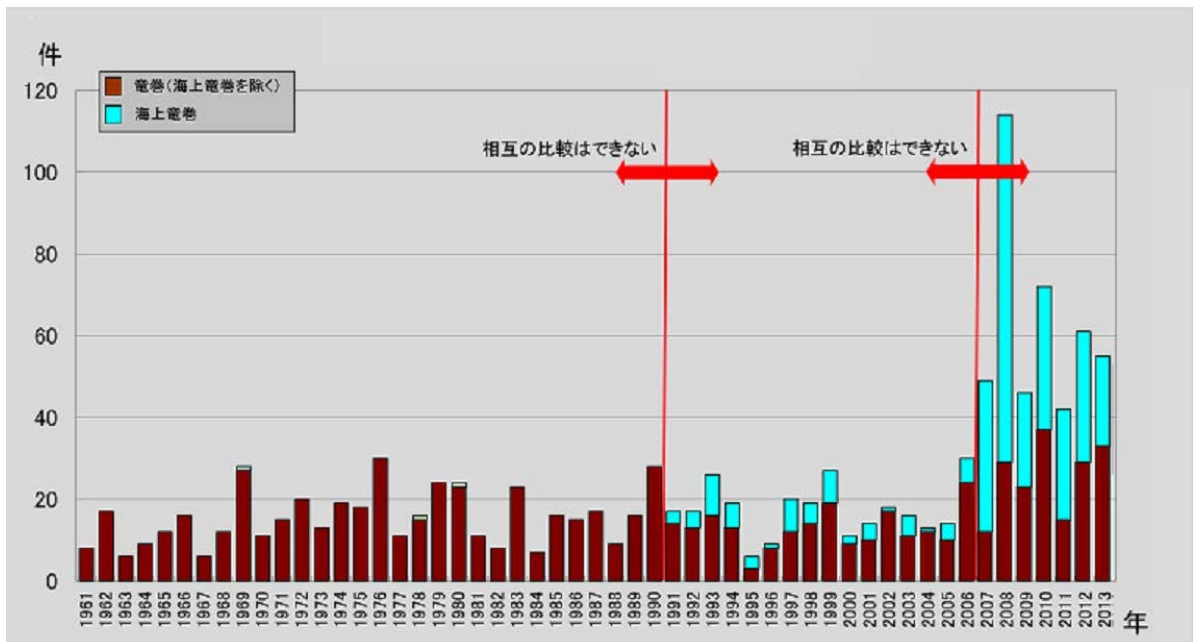
第8. 11 図 (竜巻) CAPE の概念



第8. 12 図 (竜巻) S R e H の概念

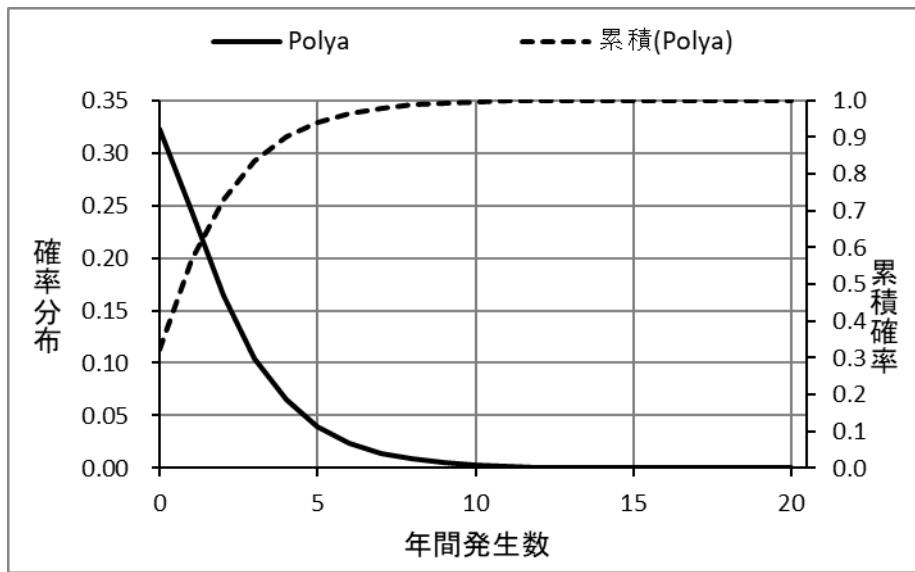


第 8. 13 図 (竜巻) 同時超過頻度分布の算出結果

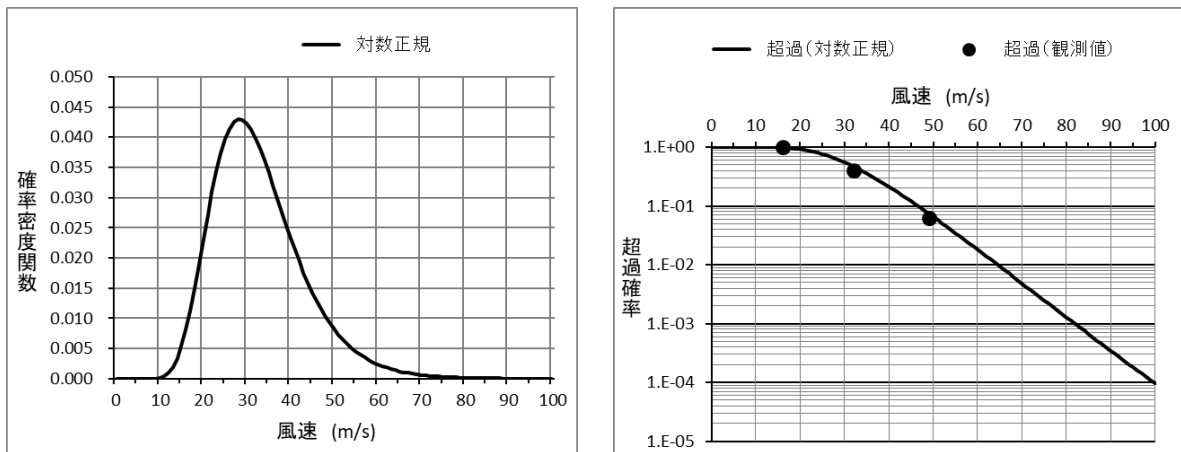


(出典：気象庁「竜巻等の突風データベース」)

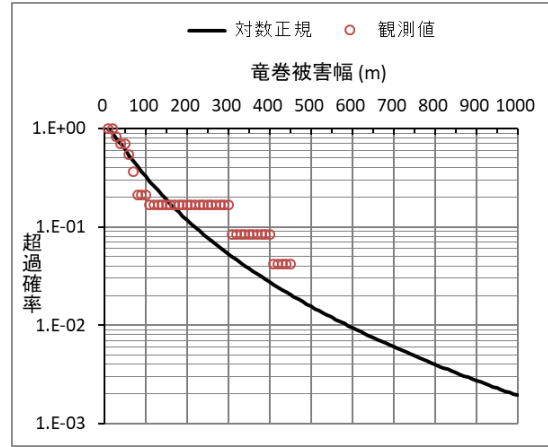
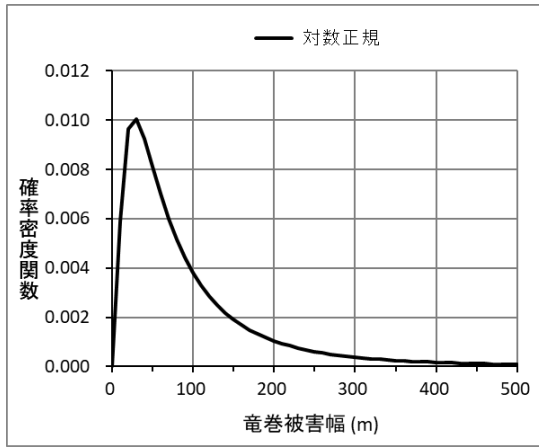
第 8. 14 図 (竜巻) 竜巻年別発生確認数



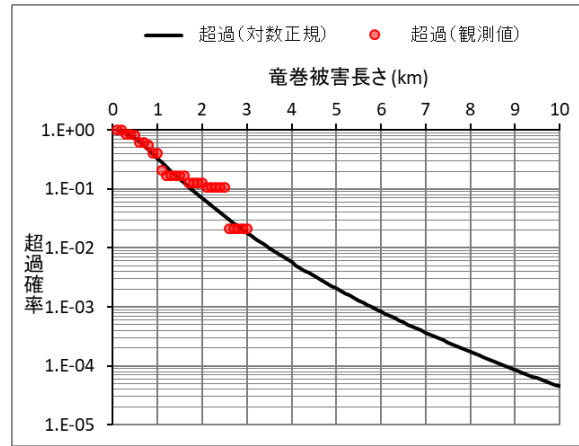
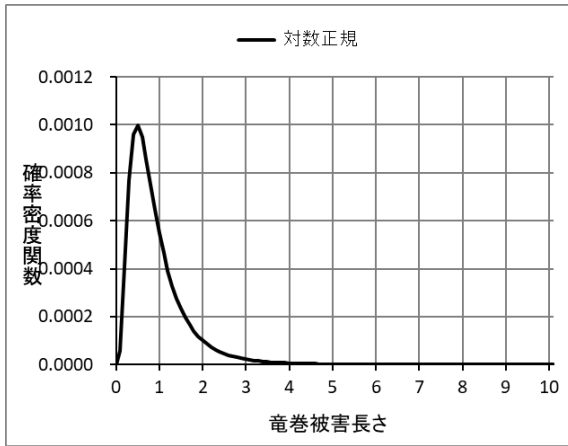
第 8. 15 図 (竜巻) 竜巻検討地域における竜巻発生数の確率分布と累積確率



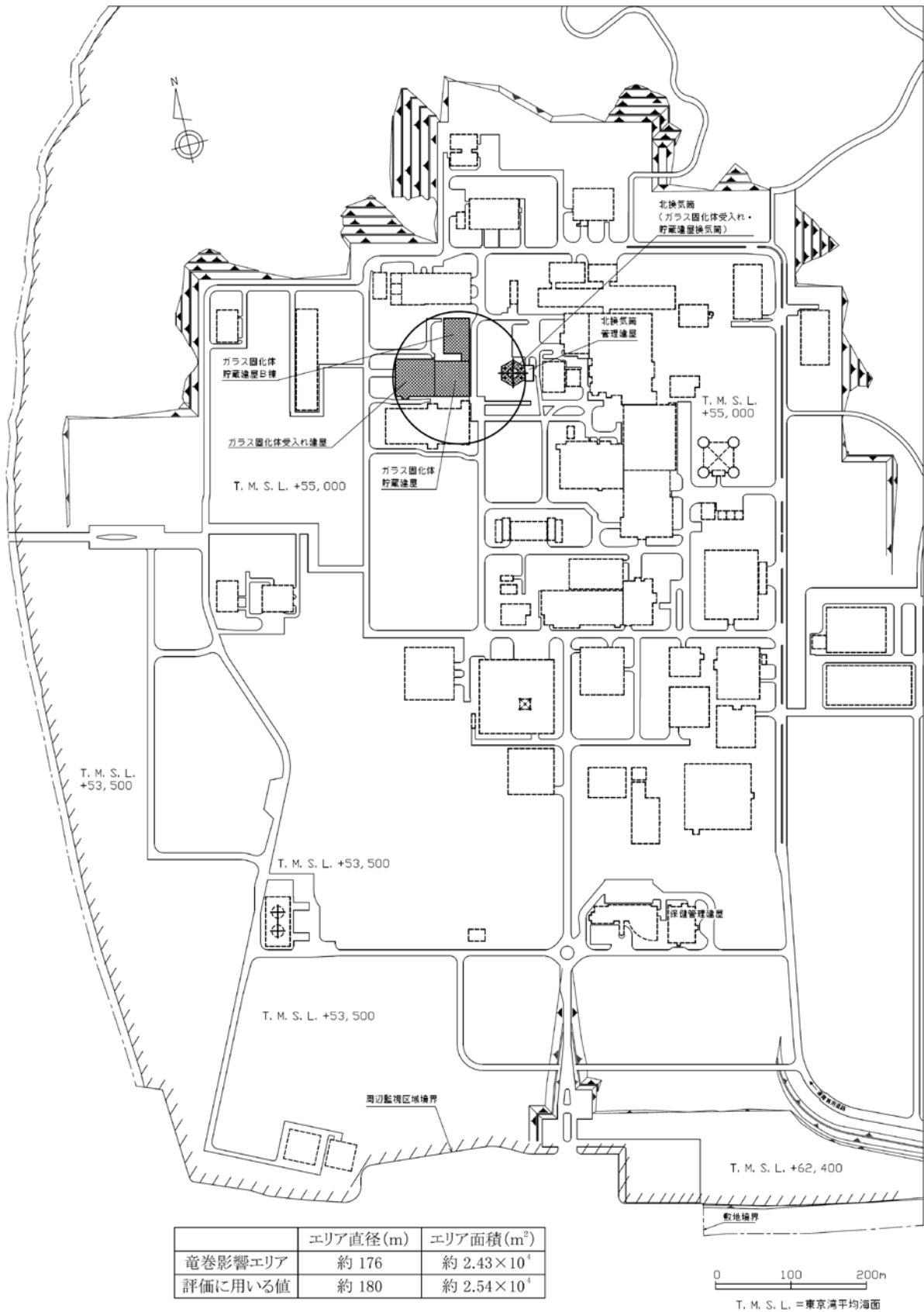
第 8. 16 図 (竜巻) 風速の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



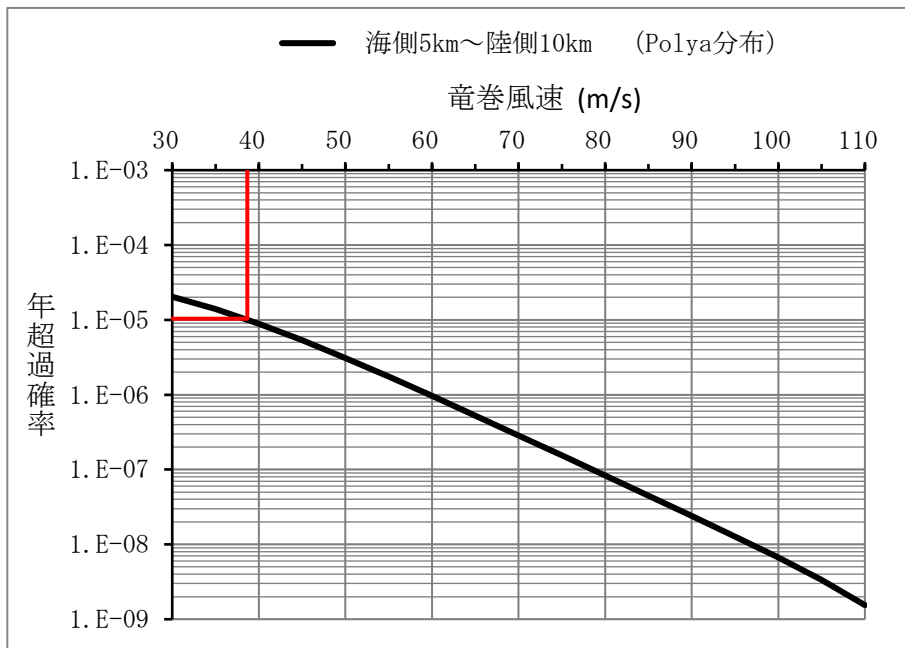
第8.17図 (竜巻) 被害幅の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



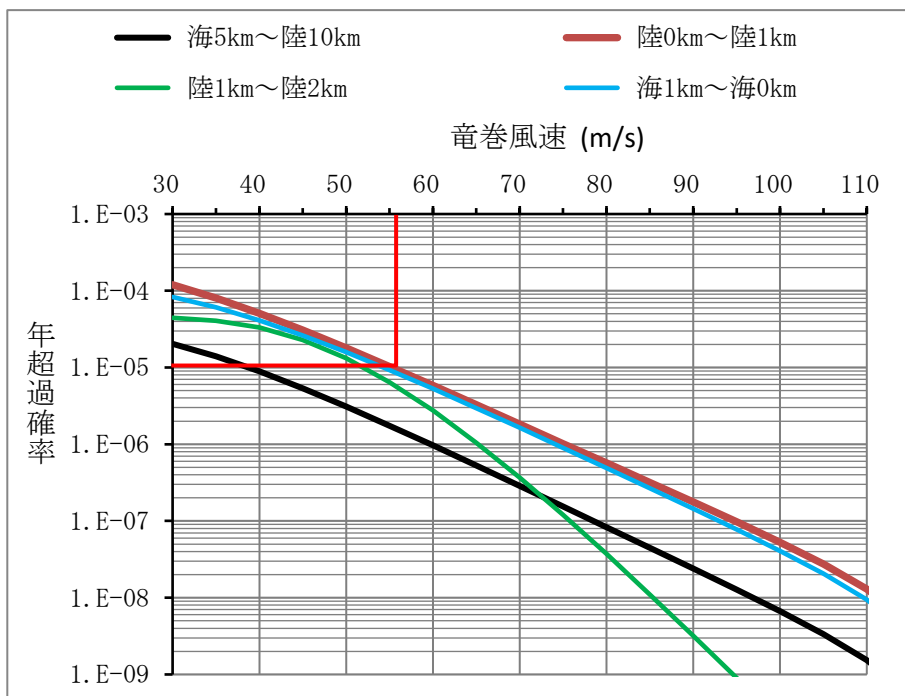
第8.18図 (竜巻) 被害長さの確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



第8. 19 図 (竜巻) 竜巻影響エリア



第8.20 図 (竜巻) 竜巻最大風速のハザード曲線 (竜巻検討地域)



第8.21 図 (竜巻) 竜巻最大風速のハザード曲線 (1km範囲) (参考)

5. 設計荷重（竜巻）の設定

設計竜巻の特性値については、現状、設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等が無い場合、竜巻ガイドを参考に設定する。設計竜巻の特性値を第8.6表（竜巻）に示す。また、設計竜巻については、今後も継続的に観測データ及び増幅に関する新たな知見の収集に取り組み、必要な事項については適切に反映を行う。

(1)設計竜巻の移動速度（ V_T ）

設計竜巻の移動速度（ V_T ）は、東京工芸大学委託成果を参考に、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以下の式を用いて算定する。

$$V_T = 0.15 \times V_D$$

V_D （m/s）：設計竜巻の最大風速

(2)設計竜巻の最大接線風速（ V_{Rm} ）

設計竜巻の最大接線風速（ V_{Rm} ）は、米国原子力規制委員会の基準類を参考に、以下の式を用いて算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

(3)設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径（ R_m ）

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径（ R_m ）は、東京工芸大学委託成果による日本の竜巻の観測記録を基に提案されたモデルを参考として、以下の値を用いる。

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

(4)設計竜巻の最大気圧低下量（ ΔP_{max} ）

設計竜巻の最大気圧低下量（ ΔP_{max} ）は、米国原子力規制委員会の基準類のランキン渦モデルによる風速分布を参考に、以下の式を用いて算定する。

$$\Delta P_{\max} = \rho \times V_{Rm}^2$$

ρ : 空気密度 (1.22 (kg/m³))

(5)設計竜巻の最大気圧低下率 ((dp/dt)_{max})

設計竜巻の最大気圧低下率 ((dp/dt)_{max}) は、米国原子力規制委員会の基準類のランキン渦モデルによる風速分布を参考に、以下の式を用いて算定する。

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

5. 1 設計飛来物の設定

竜巻ガイドを参考に再処理事業所内をふかんした現地調査及び検討を行い、再処理事業所内の資機材の設置状況を踏まえ、設計対処施設に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。抽出した飛来物に竜巻ガイドに例示される飛来物を加え、それぞれの寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力の大きさを考慮して、設計竜巻により設計対処施設に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）を設定する。衝突時に設計対処施設に与える運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物によるものより大きくなるものについては、浮き上がり又は横滑りの有無を考慮した上で、固定、固縛、建屋収納又は敷地からの撤去により飛来物とならないようにする。

車両については、周辺防護区域への入構を管理するとともに、固縛又は退避を必要とする区域（以下「飛来対策区域」という。）を設定し、竜巻の襲来が予想される場合には、停車又は走行している場所に応じて固縛するか又は飛来対策区域外の避難場所へ退避することにより、飛来物とならないよう管理を行うことから、設計飛来物として考慮しない。

また、再処理事業所外から飛来するおそれがあり、かつ、再処理事業所内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定されるものとしてむつ小川原ウィンドファームの風力発電施設のブレードがある。むつ小川原ウィンドファームの風力発電施設から設計対処施設までの距離及び設計竜巻によるブレードの飛来距離を考慮すると、ブレードが設計対処施設まで到達するおそれはないことから、ブレードは設計飛来物として考慮しない。

以上のことから、竜巻ガイドに例示される鋼製材を設計飛来物として設定する。

なお、降下火砕物の粒子による影響については、設計飛来物の影響に

包絡される。

第8. 7表（竜巻）に廃棄物管理施設における設計飛来物を示す。

5. 2 荷重の組合せと許容限界

(1) 設計対処施設に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により設計対処施設に作用する設計竜巻荷重を以下に示す。

a. 風圧力による荷重

竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻ガイドを参考に次式のとおり算出する。

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

ここで、

W_w : 風圧力による荷重

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に応じて設定する。)

A : 施設の受圧面積

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

である。ここで、

ρ : 空気密度

V_D : 設計竜巻の最大風速

である。

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せい弱と考えられる設計対処施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速に基づいて算出した鉛直方向の風圧力による荷重についても考慮した設計とする。

b. 気圧差による荷重

外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受け

る設備並びに竜巻防護対象施設を収納する建屋の壁及び屋根においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる設計対処施設の内外の気圧差による圧力荷重を考慮し、より厳しい結果を与える「閉じた施設」を想定して次式のとおり算出する。「閉じた施設」とは通気がない施設であり、施設内部の圧力が竜巻の通過以前と以後で等しいとみなせる。他方、施設の外側の圧力は竜巻の通過中に変化し、施設内外に圧力を生じさせる。

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

ここで、

W_P : 気圧差による荷重

ΔP_{max} : 最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

である。

c. 飛来物の衝撃荷重

竜巻ガイドを参考に、衝突時の荷重が大きくなる向きで設計飛来物が設計対処施設に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

また、貫通評価においても、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

(2) 設計竜巻荷重の組合せ

設計対処施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、竜巻ガイドを参考に風圧力による荷重 (W_W)、気圧差による荷重 (W_P) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は米国原子力規制委員会の基準類を参考として、以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + (1/2) \cdot W_P + W_M$$

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

(3) 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。

【補足説明資料5-7】

a. 設計対処施設に常時作用する荷重及び運転時荷重

b. 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に発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、降雹及び降水である。これらの自然現象により発生する荷重の組合せの考慮は、以下のとおりとする。

なお、風（台風）に対しては、「その他外部衝撃」で考慮することとしている建築基準法に基づく風荷重が設計竜巻を大きく下回ることから、設計竜巻荷重に包絡される。

ただし、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。

(a) 落 雷

竜巻及び落雷が同時に発生する場合においても、落雷による影響は雷撃であり、荷重は発生しない。

(b) 積 雪

廃棄物管理施設の立地地域は、冬季においては積雪があるため、冬季における竜巻の発生を想定し、建築基準法に基づいて積雪の荷重を適切に考慮する。

(c) 降 雹

降雹は積乱雲から降る直径 5 mm 以上の氷の粒であり、仮に直径 10 cm 程度の大型の降雹を仮定した場合でも、その質量は約 0.5 kg である。竜巻及び降雹が同時に発生する場合においても、直径 10 cm 程度の降雹の終端速度は 59 m/s，運動エネルギーは約 0.9 kJ であり，設計飛来物の運動エネルギーと比べて十分小さく，降雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

(d) 降 水

竜巻及び降水が同時に発生する場合においても，降水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく，また降水による荷重は十分小さいため，設計竜巻荷重に包絡される。

(4) 許容限界

建屋・構築物の設計において，設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については，貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さ及び部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに，設計荷重（竜巻）により発生する変形又は応力が安全上適切と認められる以下の規格及び規準等による許容応力度等の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会等の基準，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）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類

設備の設計においては，設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価について，貫通が発生する限界厚さ及び部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに，設計荷重（竜巻）により発生する応力が安全

上適切と認められる以下の規格及び規準等による許容応力等の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。

- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会等の基準，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）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類

【補足説明資料 5-1～5-7】

第8.6表（竜巻） 設計竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線風速半径 R_m (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

第8.7表（竜巻） 廃棄物管理施設における設計飛来物

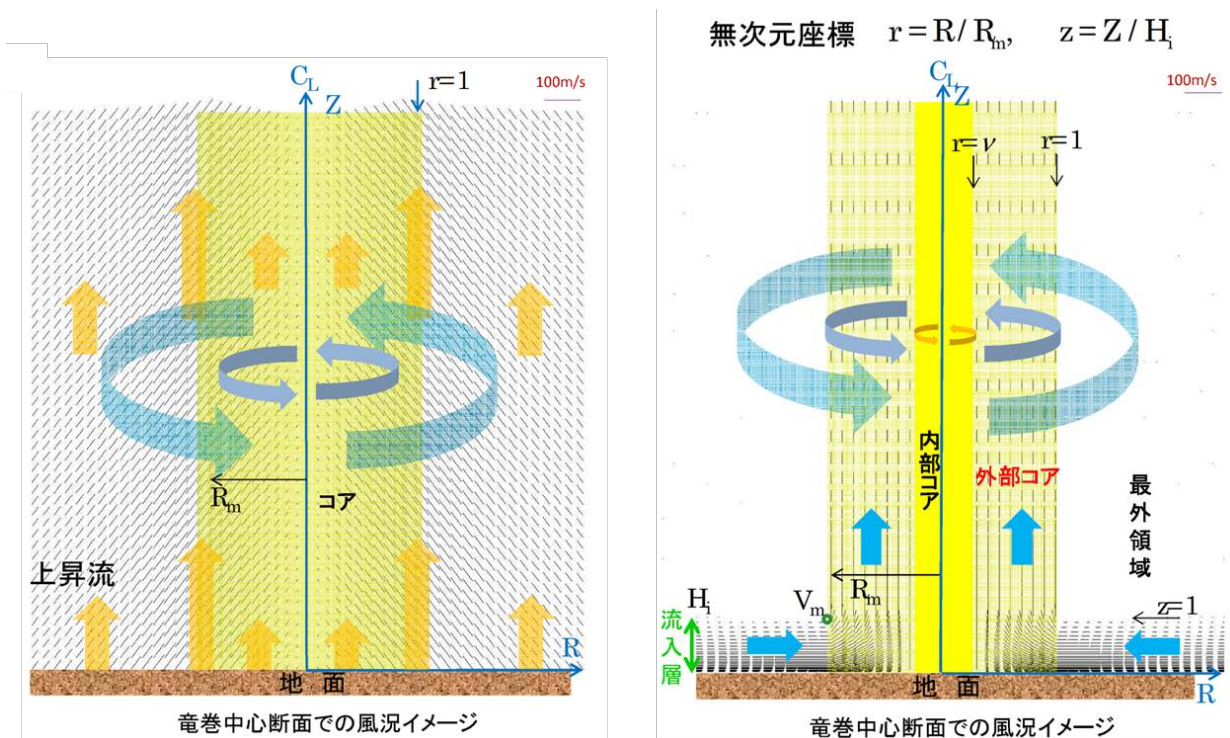
飛来物の種類	鋼製材
寸法 (m)	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	51
最大鉛直速度 (m/s)	34

6. 評価に使用する風速場モデルについて

ランキン渦モデルは米国原子力規制委員会の基準類で採用されており、利用実績が高く、非常に簡単な式で風速場を記述することができる。しかし、風速場が高さに依存しないため、地表面付近では非現実的な風速場となることがデメリットとしてあげられる。

フジタモデルはランキン渦モデルと比較して、解析プログラムが複雑であるが、観測に基づき考案され、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。第8.22図（竜巻）に風速場モデルを示す。

廃棄物管理施設の竜巻影響評価では、基本的にランキン渦モデルを採用するが、車両の固縛又は退避の運用において考慮する離隔距離の設定においては、車両が全て地表面にあることから、地表面の風速場をよく再現しているフジタモデルを採用する。



第8.22図（竜巻） 風速場モデル

（ランキン渦モデル（左），フジタモデル（右））

【補足説明資料 6-1】

7. 竜巻防護設計

竜巻に対する防護設計においては、竜巻ガイドを参考に、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、竜巻防護対象施設又は竜巻防護対象施設を収納する区画の構造健全性を確保するため、機械的強度を有する、建物の外壁及び屋根により建物全体を保護すること等により、以下の事項に対して安全機能を損なわない設計とする。

- (1) 飛来物の衝突による建屋・構築物の貫通，裏面剥離及び設備（系統・機器）の損傷
- (2) 設計竜巻荷重及びその他の荷重（常時作用する荷重，運転時荷重及び竜巻以外の自然現象による荷重）を適切に組み合わせた設計荷重（竜巻）
- (3) 竜巻による気圧の低下

竜巻防護対象施設，竜巻防護対象施設を収納する建屋及び竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の設計竜巻からの防護設計方針を以下に示す。また，設計対処施設及び防護対策等を第8.8表（竜巻）に示す。

7. 1 竜巻防護対象施設を収納する建屋

竜巻防護対象施設を収納する建屋は、設計荷重（竜巻）に対して、主架構の構造健全性を維持するとともに、個々の部材の破損により施設内の竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物の衝突に対しては、貫通及び裏面剥離の発生により竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。具体的には以下のとおりである。

a. ガラス固化体貯蔵建屋及びガラス固化体貯蔵建屋B棟

設計荷重（竜巻）に対して主架構の構造健全性を維持するとともに、個々の部材の破損により竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物の衝突に対しては、貫通及び裏面剥離の発生により施設内の竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

7. 2 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設

外気と繋がっている竜巻防護対象施設は、気圧差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。具体的には以下のとおりである。

a. ガラス固化体貯蔵設備の収納管

ガラス固化体貯蔵設備の収納管は、通風管との間に冷却空気を流す構造としている。

収納管は気圧差による荷重に対して構造健全性を維持できるよう十分な強度を有する設計とし、安全機能を損なわない設計とする。

7. 3 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設については、設計荷重（竜巻）を考慮しても倒壊等に至らないよう必要に応じて補強すること等により、周辺の竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。具体的には以下のとおりである。

北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）及びガラス固化体受入れ建屋は、倒壊等に至った場合には周辺の施設に波及的影響を及ぼすおそれがあることから、設計飛来物の衝突による貫通及び風圧力による荷重を考慮しても倒壊等に至らない設計とし、周辺の竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

7. 4 竜巻随件事象に対する設計

竜巻ガイドを参考に、過去の他地域における竜巻被害状況及び再処理施設の配置を図面等により確認した結果、竜巻随件事象として以下の事象を想定し、これらの事象が発生した場合においても、竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

(1) 火 災

竜巻により屋外にある危険物貯蔵施設等（ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所、ディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所及びボイラ用燃料貯蔵所）が損傷し、漏えい及び防油堤内での火災が発生したとしても、火災源と竜巻防護対象施設の位置関係を踏まえて熱影響を評価した上で、竜巻防護対象施設の安全機能に影響を与えない設計とすることを「外部火災防護に関する設計」にて考慮する。

建屋内に設置される竜巻防護対象施設には、開口部を有する室に設置されるものはないため、設計飛来物の侵入により建屋内に火災が発生し、竜巻防護対象施設に影響を及ぼすことは考えられない。

(2) 溢 水

再処理事業所内の屋外タンク等の破損による溢水を想定し、溢水源と竜巻防護対象施設を収納する建屋の位置関係を踏まえた影響評価を行った上で、溢水が竜巻防護対象施設を収納する建屋の開口部まで到達しないよう施設を配置する。

竜巻防護対象施設を収納する建屋のうち開口部を有する室については、設計飛来物の侵入による建屋内の溢水が発生したとしても、竜巻防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

また、建屋貫通部への止水処理をすることにより、屋外タンク等の破損による溢水が建屋内に浸入することを防止する。

(3) 外部電源喪失

竜巻防護対象施設には、外部電源の給電を受けるものはないため、設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷・雹等、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による外部電源喪失が発生しても、竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことはない。

【補足説明資料 7-1, 7-2】

第8. 8表（竜巻） 設計対処施設及び防護対策等

設計対処施設		竜巻の最大風速	想定する設計飛来物	飛来物対策	防護対策
竜巻防護対象施設を収納する建屋	ガラス固化体貯蔵建屋	100m/s	鋼製材	固縛又は車両の退避等の飛来物発生防止	設計荷重（竜巻）に対して主架構の構造健全性を維持するとともに、個々の部材の破損により施設内の竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計
	ガラス固化体貯蔵建屋B棟				設計飛来物の衝突に対して貫通及び裏面剥離により安全機能を損なわない設計
建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設	ガラス固化体貯蔵設備の収納管				気圧差荷重に対して構造健全性を維持できる十分な強度を有する設計
竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）				風荷重及び設計飛来物の衝撃荷重に対し倒壊しない強度を有する設計
	ガラス固化体受入れ建屋				

8. 手順等

設計竜巻による飛来物の発生防止を図るため、以下の事項を考慮した手順を定める。

- 資機材等で飛来物となる可能性のあるものは、浮き上がり又は横滑りの有無を考慮した上で、飛来時の運動エネルギー及び貫通力が設計飛来物である鋼製材よりも大きなものについて、設置場所に応じて固定、固縛、建屋収納又は敷地からの撤去を行う。
- 車両については、周辺防護区域内への入構を管理するとともに、飛来対策区域を設定し、竜巻の襲来が予想される場合に車両が飛来物とならないよう固縛又は飛来対策区域外の退避場所へ退避する。
- 飛来対策区域は、車両から距離を取るべき離隔対象施設と車両との間を取るべき離隔距離を考慮して設定する。

離隔距離の検討に当たっては、先ず解析により車両の最大飛来距離を求める。解析においては、フジタモデルの方がランキン渦モデルよりも地表面における竜巻の風速場をよく再現していること及び車両は地表面にあることから、フジタモデルを適用する。フジタモデルを適用した車両の最大飛来距離の算出結果を第8.9表（竜巻）に示す。車両の最大飛来距離の算出結果は170mであるが、フジタモデルを適用した解析における不確実性を補うため、算出結果に安全余裕を考慮して、離隔距離を200mとする。

飛来対策区域を第8.23図（竜巻）のとおりとする。

- 車両の退避場所は、周辺防護区域内及び周辺防護区域外に設ける。

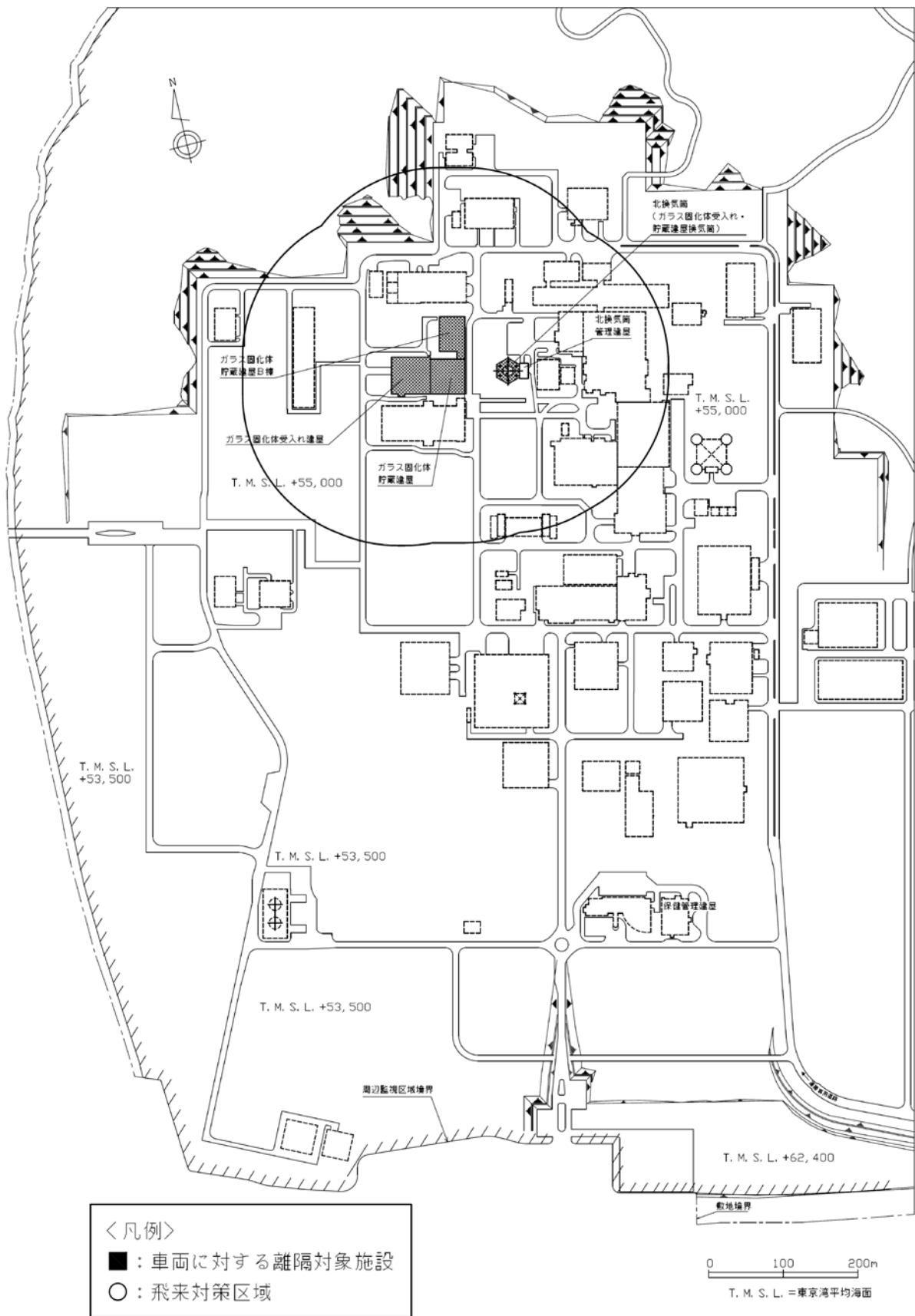
また、フジタモデルを適用した解析における不確実性を補うため、周辺防護区域内の退避場所に退避する車両については固縛の対象とする。

- 竜巻に対する運用管理を確実に実施するために必要な技術的能力を維持・向上させることを目的とし、教育及び訓練を定期的に行う。

【補足説明資料 8-1～8-5】

第8. 9表 (竜巻) 現地調査にて抽出した車両の諸元及び最大飛来距離

車両の種類	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (k g)	最大飛来距離 (m)
大型バス	12	2.5	3.8	12,100	130
トラック	8.5	2.2	2.5	3,790	160
乗用車 普通	4.4	1.7	1.5	1,140	150
乗用車 ワゴン1	4.8	1.8	1.5	1,510	90
乗用車 ワゴン2	5.2	1.9	2.3	1,890	170
軽自動車1	3.4	1.5	1.6	840	160
軽自動車2	3.4	1.5	1.5	710	170



第8.23図（竜巻） 車両に対する離隔対象施設と飛来対策区域

2 章 補足説明資料

第8条:外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)

廃棄物管理施設 安全審査 整理資料 補足説明資料				備考
資料No.	名称	提出日	Rev	
補足説明資料2-1	竜巻影響評価ガイドへの適合性	6/19	4	
補足説明資料3-1	設計対処施設の選定について	6/19	4	
補足説明資料3-2	竜巻に対して防護する必要のある開口部の選定について	4/17	2	
補足説明資料3-3	耐震Sクラス施設について	6/19	3	
補足説明資料4-1	竜巻検討地域の設定について	6/19	3	
補足説明資料4-2	竜巻検討地域の範囲設定について	6/19	1	
補足説明資料4-3	竜巻検討地域の設定の妥当性について	12/9	0	
補足説明資料4-4	ハザード曲線による竜巻最大風速(V_{B2})の計算について	6/19	4	
補足説明資料4-5	海上のFスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について	12/9	0	
補足説明資料4-6	竜巻発生数の確率分布(ポアソン, ポリヤ分布)がハザード結果に及ぼす影響について	12/9	0	
補足説明資料5-1	評価対象施設等の設計荷重について	6/19	3	
補足説明資料5-2	設計飛来物の設定	6/19	4	
補足説明資料5-3	敷地外からの飛来物の考慮について	4/17	2	
補足説明資料5-4	設計飛来物の設定における1次スクリーニングについて	4/17	3	
補足説明資料5-5	竜巻時に発生する降雹について	4/17	1	
補足説明資料5-6	空力パラメータについて	6/19	1	
補足説明資料5-7	荷重の組合せ一覧表	1/24	0	
補足説明資料6-1	ランキン渦モデルとフジタモデルの適用の考え方について	6/19	1	
参考資料1	フジタモデルの適用について	6/19	3	
参考資料2	竜巻による物体の浮上・飛来解析について	12/23	1	
補足説明資料7-1	竜巻随件事象の抽出及び設計について	4/17	2	

第8条:外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)

廃棄物管理施設 安全審査 整理資料 補足説明資料				備考
資料No.	名称	提出日	Rev	
補足説明資料7-2	外部電源喪失時における影響について	7/13	1	
補足説明資料8-1	車両の飛来防止対策について	6/19	4	
補足説明資料8-2	車両の退避について	6/19	3	
補足説明資料8-3	竜巻襲来までに要する時間の設定の妥当性について	4/17	2	
補足説明資料8-4	廃棄物管理施設 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)	4/17	2	
補足説明資料8-5	竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャストについて	12/9	0	

令和 2 年 6 月 19 日 R4

補足説明資料 2 - 1 (8 条 竜巻)

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>2. 設計の基本方針</p> <p>2.1 設計対象施設</p> <p>以下の(1)及び(2)に示す施設を設計対象施設とする。</p> <p>(1) 竜巻防護施設</p> <p>「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。</p> <p>(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>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> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>解説 2.1 設計対象施設</p> <p>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。</p> <p>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> </div>	<p>⇒竜巻防護対象施設としては安全上重要な施設を選定しており、耐震Sクラスの設備とはしていないが、事業許可基準規則第8条及び第11条に則った選定としている。</p> <p>なお、安全上重要な施設は耐震Sクラスの設備を包含している(安全上重要な施設＝耐震Sクラスの設備)。</p> <p>⇒破損又は転倒により、上記の竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼして安全機能を損なうおそれのあるものを「竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設」として選定している。</p> <p>⇒外殻となる建屋によって防護される竜巻防護対象施設については、外殻となる建屋を「竜巻防護対象施設を収納する建屋」として設計対処施設に選定している。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>2.2 設計の基本的な考え方</p> <p>2.2.1 設計の基本フロー</p> <p>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、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。</p>	<p>⇒設計の基本フローに従い、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を設定しており、また、機能・配置・構造計画等から設計対象施設を抽出し、竜巻防護対象施設の安全機能が維持される方針としている。</p>
<p>解説 2.2.1 設計の基本フロー</p> <p>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が設定された施設を対象に、</p>	

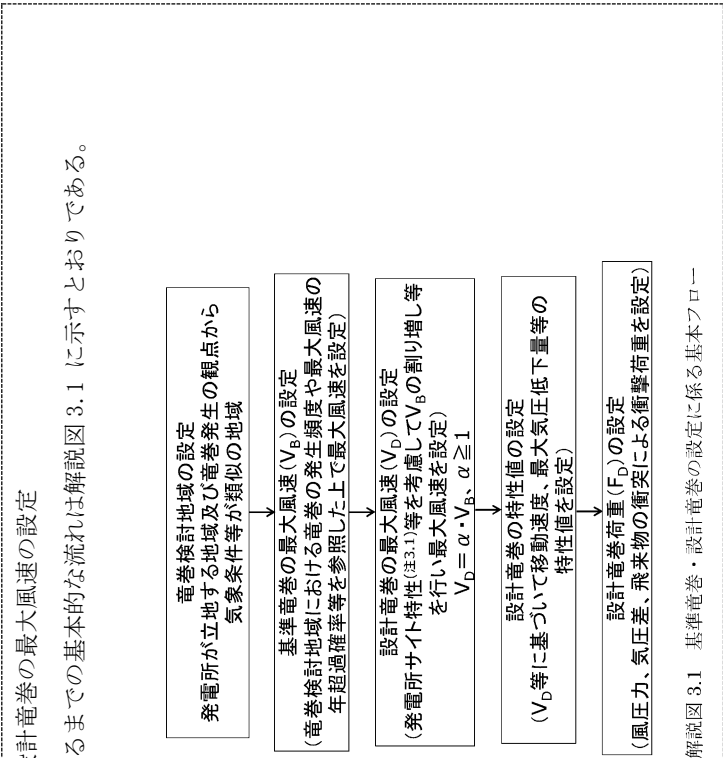
図 2.1 設計の基本フロー

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>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ている。</p> <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</p> <p>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>⇒設計竜巻荷重を以下の通りとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 風圧力による荷重 ・ 気圧差による荷重 ・ 飛来物の衝撃荷重 <p>⇒設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として以下のものを考慮することとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻防護対象施設等に常時作用する荷重及び運転時荷重 ・ 竜巻以外の自然現象による荷重（積雪）

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<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</p> <p>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 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>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋に収納され防護される竜巻防護対象施設 建屋による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。 ・ 外気と繋がっている竜巻防護対象施設 <p>設計荷重（竜巻）の影響を受けても安全機能を損なわない設計とする。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<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> <div style="border: 1px dashed black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p>解説 3.1 基準竜巻・設計竜巻の最大風速の設定</p> <p>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> <p>3.2 竜巻検討地域の設定</p> <p>竜巻検討地域は、原子力発電所が立地する地域及び竜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。</p>	<p>⇒ 「3.3 基準竜巻の設定」, 「3.4 設計竜巻の設定」 参照。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 3.2 竜巻検討地域の設定</p> <p>(1) 基本的な条件</p> <p>竜巻検討地域の設定にあたっては、IAEA の基準^(※1)が参考になる。IAEA の基準では、ある特定の風速を超過する竜巻の年発生頻度の検討にあたって竜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、竜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、竜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竜巻検討地域を設定することを基本とする。</p> <p>(2) 原子力発電所が海岸線付近に立地する場合の竜巻検討地域の設定</p> <p>解説図 3.2 に日本における竜巻の発生分布^(※2)を示す。解説図 3.2 より日本における竜巻の発生位置は、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竜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、海岸線から離れるに従って竜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、竜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 の範囲を目安に竜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、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえつつ竜巻検討地域の</p>	<p>⇒廃棄物管理施設を中心とした 10 万 km² (半径約 180 k m) を目安として 竜巻検討地域を設定している。</p> <p>⇒竜巻検討地域、日本海側及び太平洋側とで比較を行うことにより、竜巻検討地域における竜巻発生傾向が、日本海側、太平洋側のいずれとも異なることを確認している。</p> <p>⇒廃棄物管理施設が立地する地域の気候、竜巻発生観点からの特徴（観場）の類似性を考慮して竜巻検討地域を設定している。</p> <p>⇒類似の気候区分に分類される範囲（岩手県沿岸南部）については、半径 180 k m の範囲外であっても竜巻検討地域に含めた。</p> <p>⇒廃棄物管理施設は海岸線から約 5 ～ 10 k m の地点に立地しているが、竜巻の発生はほとんどが海岸線付近であることから、海岸線に沿った海側 5 k m、陸側 10 k m を竜巻検討地域として考慮している。</p>

<p>原子力発電所の竜巻影響評価ガイド</p>	<p>ガイドへの適合性の確認結果</p>																
<p>範囲を別途検討する必要がある。</p>	<div data-bbox="319 1164 1197 1814"> <p>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)</p> </div> <div data-bbox="702 1164 1133 1814"> <table border="1"> <caption>解説図 3.3 日本での海岸線付近における竜巻の発生状況 (※3) (注 3.2) (1961～2009年12月、規模：F0以上)</caption> <thead> <tr> <th>距離範囲 (km)</th> <th>年平均発生数 (個/km²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10 > 50 km 以内</td> <td>0.0001</td> </tr> <tr> <td>5 > 10 km 以内</td> <td>0.0002</td> </tr> <tr> <td>2 > 5 km 以内</td> <td>0.0004</td> </tr> <tr> <td>1 km 以内</td> <td>0.0006</td> </tr> <tr> <td>1 ~ 2 km 以内</td> <td>0.0008</td> </tr> <tr> <td>2 ~ 5 km 以内</td> <td>0.0004</td> </tr> <tr> <td>5 km 以上</td> <td>0.0001</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div data-bbox="1276 1792 1324 2016"> <p>3.3 基準竜巻の設定</p> </div> <div data-bbox="1332 985 1380 1993"> <p>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_B は最大瞬間</p> </div>	距離範囲 (km)	年平均発生数 (個/km²)	10 > 50 km 以内	0.0001	5 > 10 km 以内	0.0002	2 > 5 km 以内	0.0004	1 km 以内	0.0006	1 ~ 2 km 以内	0.0008	2 ~ 5 km 以内	0.0004	5 km 以上	0.0001
距離範囲 (km)	年平均発生数 (個/km²)																
10 > 50 km 以内	0.0001																
5 > 10 km 以内	0.0002																
2 > 5 km 以内	0.0004																
1 km 以内	0.0006																
1 ~ 2 km 以内	0.0008																
2 ~ 5 km 以内	0.0004																
5 km 以上	0.0001																

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>風速とする。</p> <p>(1) 基準竜巻の最大風速(V_B)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。</p> <p>(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。</p> <p>①過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})</p> <p>日本で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は、「日本」を「竜巻検討地域」に読み替えることができる。</p> <p>②竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})</p> <p>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。</p> <p>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^(※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。</p>	<p>⇒基準竜巻の最大風速は日本で過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) と 竜巻検討地域における竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) のうち、大きな風速を設定することとしている。</p> <p>⇒V_{B1} は、日本で過去 (1961 年から 2013 年 12 月) に発生した竜巻の最大風速 (92m/s) としている。</p> <p>⇒作成したハザード曲線において年超過確率が 10^{-5} に相当する風速 (約 39 m/s) を V_{B2} としている。</p> <p>⇒廃棄物管理施設においては、$V_B=V_{B1}=92\text{m/s}$ としている。92m/s に相当する年超過確率は、1.86×10^{-8} である。</p>
<p>解説 3.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定</p> <p>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</p> <p>本文に記載のとおり、日本で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。</p> <p>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</p>	<p>⇒V_{B1} は、日本で過去 (1961 年から 2013 年 12 月) に発生した竜巻の最大風速 (92m/s) としている。</p>

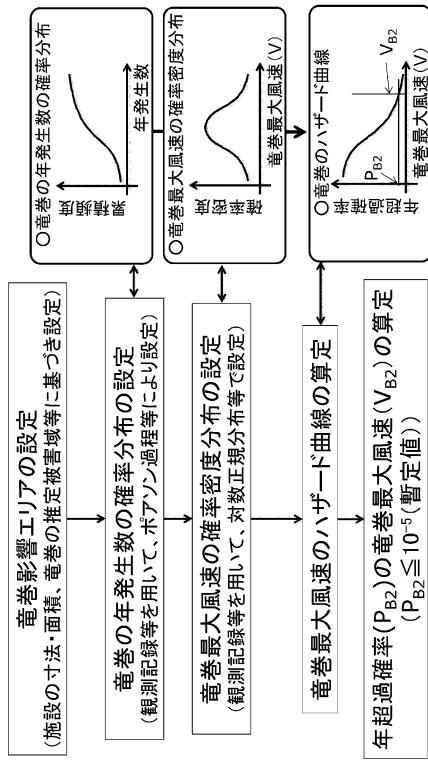
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果														
<p>データベース、研究成果等について十分に調査・検討した上で設定する必要がある。</p> <p>日本における過去最大級の竜巻としては、例えば、1990年12月に千葉県茂原市で発生した竜巻、2012年5月に茨城県常総市からつくば市で発生した竜巻等があげられる。竜巻検討地域の観測記録等に基づいてV_{61}を設定する場合において、これら過去最大級の竜巻を考慮しない場合には、その明確な根拠を提示する必要がある。</p> <p>竜巻による被害状況から推定された最大風速を参照して設定された藤田スケールを用いて基準竜巻の最大風速を設定する場合^(注3,3))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。</p> <p>解説表 3.1 藤田スケールと風速の関係^(注5)</p> <table border="1" data-bbox="715 1227 1008 1787"> <thead> <tr> <th>スケール</th> <th>風速</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>17～32m/s (約15秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F1</td> <td>33～49m/s (約10秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>50～69m/s (約7秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>70～92m/s (約5秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F4</td> <td>93～116m/s (約4秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F5</td> <td>117～142m/s (約3秒間の平均)</td> </tr> </tbody> </table> <p>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_{62})の算定 既往の算定方法(Wen&Chu^(注6)及びGarson et. al^(注7, 注8))に基づいてV_{62}を算定する方法について、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_{62}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^(注9)が参考になる。</p> <p>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</p>	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)	<p>⇒竜巻最大風速のハザード曲線の算定にあたっては、東京工芸大学委託成果を参考としている。</p>
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)														

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>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。</p> <p>(1) 竜巻影響エリアの設定</p> <p>V_{B2} の算定にあたっては、まず始めに V_{B2} 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を設置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。</p> <p>竜巻による被害域幅、被害域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、被害域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持たせることを原則とし、V_{B2} の算定に使用するデータ等には一貫性を持たせるように配慮する。</p> <p>(2) 竜巻の年発生数の確率分布の設定</p> <p>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算定し、そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設計で用いることとする。</p> <p>(3) 竜巻最大風速の確率密度分布の設定</p> <p>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</p>	<p>⇒廃棄物管理施設の竜巻影響エリアの設定にあたっては、設計対処施設を包含する円の面積としている。</p> <p>⇒竜巻影響エリアを円形とし、竜巻の移動方向に依存性が生じないようにしている。</p> <p>⇒竜巻検討地域における53年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを参考に、確率密度分布については竜巻ガイド及び東京工芸大学委託成果を参考に、対数正規分布に従うものとして設定している。また、各々の確率密度分布を設定する際に使用するデータには一貫性を持たせている。</p> <p>⇒竜巻は気象現象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動(標準偏差)が大きい分布となり、東京工芸大学委託成果にポリア分布への適合性が良いことが示されている。したがって、ハザード曲線の評価に当たって使用する年発生数の確率分布は、ポリア分布を採用する。</p> <p>⇒竜巻検討地域として設定した陸側10km及び海側5kmの範囲について、1km範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定し、ハザード曲線を算定している。</p> <p>⇒竜巻検討地域における53年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを参考に、確率密度分布については竜巻ガイド及び竜巻ガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参考に、対数正規分布に従うものとして設定</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>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_{B2} 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。</p> <p>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_{B2} 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。</p> <p>(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分布及び竜巻最大風速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。</p> <p>(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。</p>	<p>している。</p> <p>⇒竜巻検討地域を 1 k m 範囲ごとに区切って確率密度分布を算定し、これらを用いて竜巻最大風速のハザード曲線を算定している。</p> <p>⇒F 階級の中央値の風速を定義し、超過確率の観測値に最も合致する分布形となるよう算定している。</p> <p>⇒T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が V_0 以上となる確率を求め、ハザード曲線を求めている。また、風速の積分範囲の上限値は、ハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120 m/s に設定している。</p> <p>⇒竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は、竜巻ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速とし、39m/s としている。</p>



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

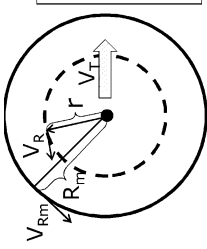
解説 3.3.3 日本版改良藤田スケールの適用について

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にて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_B 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。

⇒ V_B の設定においては、JEFスケールによるデータは使用せず、Fスケールによるデータのみを使用している。

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>3.4 設計竜巻の設定</p> <p>以下の基本的な方針に基づいて設計竜巻の最大風速(VD)及び特性値を設定する。ここで、V_0は最大瞬間風速とする。</p> <p>(1) 設計竜巻の最大風速(V_0)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(VB)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_0は、V_Bを下回らないものとする。</p> <p>(2) 設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速(V_0)、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。</p> <p>解説 3.4 設計竜巻の最大風速(V_0)及び特性値の設定</p> <p>解説 3.4.1 設計竜巻の最大風速(V_0)の設定で考慮する地形効果による竜巻の増幅特性</p> <p>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(参9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_0)を設定する。</p> <p>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(参10、参11)が、V_0の設定においては、そのような減衰の効果は考慮しない。</p> <p>解説 3.4.2 設計竜巻の特性値の設定</p> <p>解説 3.4.2.1 概要</p> <p>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_0)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。</p> <p>(1) 移動速度(V_T)</p> <p>(2) 最大接線風速(V_{Rm})</p>	<p>⇒廃棄物管理施設の敷地周辺は廃棄物管理事業変更許可申請書添付書類三</p> <p>1.1に記載のとおり平坦であり、本来は地形効果による増幅を考慮する必要はないが、竜巻に対する設計に当たっては、蓄積されている知見の少なさといった不確定要素を考慮し、設計及び運用に安全余裕を持たせるために、設計竜巻の最大風速を100m/sとしており、基準竜巻(92m/s)を上回る設定としている。</p> <p>⇒設計竜巻の設定において、竜巻の減衰効果は考慮していない。</p> <p>⇒左記(1)～(5)に示される各特性値を設定している。</p>

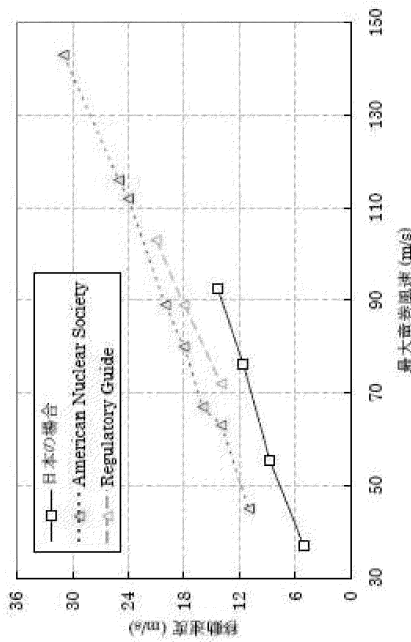
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(3) 最大接線風速半径 (R_m)</p> <p>(4) 最大気圧低下量 (ΔP_{max})</p> <p>(5) 最大気圧低下率 ($dp/dt)_{max}$</p> <p>(1)～(5)の各特性値については原則として、十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定したものを、その根拠の明示を条件として用いる。ただし、設定に十分な信頼性を有した観測記録等がない場合には、解説3.4.2.2及び3.4.2.3に示す方法で各特性値を設定することができる。</p> <p>解説3.4.2.2 設計竜巻の特性値の設定に係る基本的な考え方</p> <p>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^(※4)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。</p> <p>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。</p> <div data-bbox="1005 1075 1212 1702" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">  <p>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、R_m: 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)</p> </div>	<p>⇒設計竜巻の特性値は、ランキン渦モデルを仮定した解説3.4.2.3に基づく設定方法に従い設定している。</p>

解説図3.5 ランキン渦モデルの概要

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 3.4.2.3 設計竜巻の特性値の設定</p> <p>(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T) の設定</p> <p>設計竜巻の移動速度 (V_T) は、以下の算定式を用いて V_0 から V_T を算定する。</p> $V_T = 0.15 \cdot V_0 \dots (3.1)$ <p>ここで、V_0 (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^(※3)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^(※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 F2～F3、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。</p> <p>本ガイドでは、設計竜巻の最大速度 (V_0) が一定の場合、移動速度が遅い方が、最大気圧低下量 (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、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。</p>	<p>⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。</p> <p>移動速度 (V_T) : 15 m/s</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド



解説図 3.6 竜巻の移動速度と最大風速の関係^(※3)

(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{rm}) の設定

設計竜巻の最大接線風速 (V_{rm}) 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_{rm} を算定する。

$$V_{rm} = V_0 - V_T \dots (3.2)$$

ここで、 V_0 (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^(※3)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。

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

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

⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。

最大接線風速 (V_{rm}) : 85 m/s

⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。

最大接線風速半径 (R_m) : 30 m

⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。

最大気圧低下量 (ΔP_{max}) : 89 hPa

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$ の設定</p> <p>設計竜巻の最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$ は、米国 NRC の基準類(参4)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}) 及び最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$ を設定する。</p> $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max} \dots (3.5)$ <p>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。</p> <p>4. 施設的设计</p> <p>4.1 概要</p> <p>設置許可段階の安全審査において以下を確認する。</p> <p>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)</p> <p>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。</p>	<p>⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。</p> <p>最大気圧低下率 $((dp/dt)_{max})$: 45 hPa/s</p> <p>⇒ガイドに従い、設計竜巻荷重及び組み合わせ荷重を設定している。</p> <p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・建屋に収納され防護される竜巻防護対象施設 ・建屋による防護により、設計荷重 (竜巻) の影響を受けない設計とする。 ・外気と繋がっている竜巻防護対象施設 <p>設計荷重 (竜巻) の影響を受けても安全機能を損なわない設計とする。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>4.2 設計対象施設</p> <p>「2.1 設計対象施設」に示したとおりとする。</p> <p>4.3 設計荷重の設定</p> <p>4.3.1 設計竜巻荷重の設定</p> <p>「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」、「気圧差による圧力」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。</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>解説 4.3.1 設計竜巻荷重の設定</p> <p>解説 4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定</p> <p>解説 4.3.1.1.1 概要</p> <p>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。</p> <p>解説 4.3.1.1.2 基本的な考え方</p> <p>(1) 風圧力の算定に用いる風力係数</p> </div>	<p>⇒ 「2.1 設計対象施設」参照。</p> <p>⇒ 「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」参照。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>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。</p> <p>(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力</p> <p>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。</p> <p>よって、本ガイドでは、設計竜巻の水平方向の最大風速(V_h)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。</p> <p>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_h 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。</p> <p>解説 4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定</p> <p>設計竜巻の最大風速(V_h)による風圧力(P_h)の算定について以下に示す。</p> <p>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_h)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。</p> <p>なお、(4.2)式の V_b 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> $P_h = q \cdot G \cdot C \cdot A \cdots (4.1)$ <p>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。</p>	<p>⇒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設計対象施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速に基づいて算出した鉛直方向の風圧力による荷重についても考慮した設計としている。</p> <p>⇒ガイドに示される式により風圧力を算定することとしている。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p> $q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_0^2 \dots (4.2)$ 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。 </p> <p> 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。 </p> <p> 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⁽⁸⁾⁽¹²⁾を参考としている。 </p> <ul style="list-style-type: none"> 完全に閉かれた構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とみなせる。 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 	<p>⇒風圧力の算定に用いるガスト影響係数$G=1.0$としている。</p> <p>⇒風力係数は、施設の形状や風圧力が作用する部位に応じて設定することとしている。</p> <p>⇒ガイドに示される式により気圧差による圧力を設定することとしている。</p> <p>⇒外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける設備並びに竜巻防護対象施設を収納する建屋の壁及び屋根においては、設</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>る。この圧力差により、閉じた施設の隔壁（構築物等の屋根・壁及びびタングの頂部・胴部等）に外向きに作用する圧力が生じるとみなせる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 <p>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</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 建屋・構築物等 <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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） <p>(2) 設備</p> <p>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。</p>	<p>計竜巻による気圧低下によって生じる設計対処施設の内外の気圧差による圧力荷重を考慮し、より厳しい結果を与える「閉じた施設」を想定して評価を行うこととしている。例えば、開口が存在する建屋の構造健全性評価においては「閉じた施設」を想定することで気圧差の影響を加味して保守的に評価している。</p> <p>⇒建屋（竜巻防護対象施設を収納する建屋）については、気圧差による荷重を含む設計荷重（竜巻）に対して安全機能を損なわない設計とすることとしている。</p> <p>⇒建屋（竜巻防護対象施設を収納する建屋）の開口部について網羅的に調査を実施し、竜巻防護対象施設が損傷するおそれのある箇所がないことを確認している。また、外気と隔離されている区画の隔壁等（天井等）については、気圧差を含む複合荷重に対して影響評価を行うこととしている。</p> <p>⇒気圧差の影響を受けることが想定される設備（建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設）については、気圧差による荷重を受けても安全機能を損なわない設計とすることとしている。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>・ 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）</p> <p>・ 圧力差の影響を受け得る計器類や空調装置等</p> <p>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</p> <p>解説 4. 3. 1. 3. 1 概要</p> <p>設計竜巻の最大風速 (V_h) 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。</p> <p>解説 4. 3. 1. 3. 2 基本的な考え方</p> <p>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がある。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の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。</p> <p>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外からの飛来物による衝撃荷重を上回る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。</p> <p>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⁽⁸⁾⁽¹³⁾を参考とした。</p> <p>① 大きな運動エネルギーをもつ飛来物（自動車等）</p> <p>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）</p> <p>③ 開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物（砂利等）</p>	<p>⇒空調系ダクト類や影響を受ける施設について調査し、影響を受ける可能性のある施設については竜巻防護対象施設として抽出し、影響評価を行うこととしている。</p> <p>⇒ガイドを参考に実施した現地調査の結果やガイドに例示された飛来物を検討することにより、設計飛来物を設定している。</p> <p>また、ガイドを参考として設計飛来物の衝撃荷重を算出することとしている。</p> <p>⇒ガイドを参考に実施した現地調査の結果やガイドに例示された飛来物を検討することにより、設計飛来物を設定している。</p> <p>⇒設計飛来物の設定にあたっては、<u>再処理事業所外</u>から飛来するおそれのあるものとして風力発電施設のブレードについても<u>再処理事業所内</u>への到達の可能性を検討したうえで除外している。</p> <p>⇒設計対象施設に衝突する可能性のある飛来物のうち、寸法、質量、形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮するとともに、<u>竜巻防護対策</u>によって防護できない可能性のあるものを<u>固定</u>、<u>固縛</u>、<u>建</u></p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定</p> <p>(1) 基本的な考え方</p> <p>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 (${}_H V_{\text{limax}}$) は、非定常な乱流場を数值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_W) を設計飛来物の最大水平速度として設定してもよい。</p> <p>設計飛来物の最大鉛直速度 (${}_V V_{\text{limax}}$) 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^(※4)を参考に設定した下式により算定してもよい。</p> ${}_V V_{\text{limax}} = (2/3) \cdot {}_H V_{\text{limax}} \cdots (4.3)$ <p>ここで、${}_H V_{\text{limax}}$ は、設計飛来物の最大水平速度を表す。</p> <p>(2) 設計飛来物の設定例</p> <p>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 (${}_H V_{\text{limax}}$) は、設計竜巻の最大風速 (V_W)=100 (m/s) とした条件下で解析的に算定した結果^(※3)である。また、解説表 4.1 の最大鉛直速度 (${}_V V_{\text{limax}}$) は、米国 NRC の基準類^(※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。</p> <p>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。</p>	<p>屋収納又は敷地から<u>撤去</u>することによって飛来させないことを前提とした上で、鋼製材を設計飛来物としている。</p> <p>⇒設計飛来物の最大水平速度は、ランキン渦モデルを仮定し「竜巻による物体の浮上・飛来解析コード」を用いて算出した結果及びガイドに記載された値を比較し、より大きい方を特性値として設定している。</p> <p>⇒設計飛来物の最大鉛直速度は、ガイドに示される米国 NRC の基準類を参考に設定し、最大水平速度の 2/3 としている。</p> <p>⇒設計対処施設に衝突する可能性のある飛来物のうち、寸法、質量、形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮するとともに、竜巻防護対策によって防護できない可能性があるものを固縛、撤去することによって飛来させないことを前提とした上で、鋼製材を設計飛来物としている。</p> <p>⇒開口部の洗い出しにおいては、建屋図面及び現地確認を行い、全ての開口部を抽出している。なお、設計飛来物よりも小さい開口部はないことを確認している。</p>

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 (V_D=100(m/s)の場合)

飛来物の種類	棒状物		板状物		塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック	
サイズ (m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	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	
質量 (kg)	8.4	135	540	2300	4750	
最大水平速度 M _{VHmax} (m/s)	49	51	30	60	34	
最大鉛直速度 M _{VMmax} (m/s)	33	34	20	40	23	

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。

解説 4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ

設計対象施設の設計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。

⇒竜巻ガイドを参考に、衝突時の荷重が大きくなる向きで設計飛来物が設計対象施設に衝突した場合の衝撃荷重を算出することとしている。また、貫通評価においても、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行うこととしている。
 ⇒設計飛来物による衝撃荷重は、設計飛来物の形状、剛性等の機械的特性に基づいて適切に設定する。

⇒ガイドに従って設計竜巻荷重の組合せを考慮することとしている。

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>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</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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>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。</p> <p>(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</p>	<p>⇒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こととしている。</p> <p>⇒設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として以下のものを考慮することとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・竜巻防護対象施設等に常時作用する荷重及び運転時荷重 ・竜巻以外の自然現象による荷重（積雪）

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>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。</p> <p>(2) 構造健全性の確認</p> <p>「(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。</p> <p>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)設計対象施設が終局耐力等の許容限界^(注4.2)に対して妥当な安全余裕を有している。</p> <p>② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>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)に対して妥当な安全余裕を有している。</p> <p>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)</p> <p>4.4.3 設備の構造健全性の確認</p> <p>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。</p> <p>(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定</p> <p>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。</p>	<p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻防護対象施設を収納する建屋 <p>設計荷重(竜巻)に対して施設内の竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。設計飛来物の衝突に対しては、貫通、裏面剥離を防止し、竜巻防護対象施設を設置する区画の構造健全性を確保することにより、竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設 <p>設計荷重(竜巻)による影響を受けても竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(2) 構造健全性の確認</p> <p>「(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。</p> <p>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。</p> <p>②竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>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。</p> <p>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)</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、原子力発電所の区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>ガイドへの適合性の確認結果</p> <p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋に収納され防護される竜巻防護対象施設 ・ 建屋による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。 ・ 外気と繋がっている竜巻防護対象施設 ・ 設計荷重（竜巻）の影響を受けても安全機能を損なわない設計とする。 ・ 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設 ・ 設計荷重（竜巻）による影響を受けても竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。 <p>⇒その他の確認事項がないか区面等を用いて検討し、確認事項がないことを確認した。</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>5. 竜巻随伴事象に対する考慮</p> <p>5.1 概要</p> <p>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</p> <p>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。</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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>(3) 外部電源喪失</p> <p>設計竜巻、設計竜巻と同時発生する雷・雹等、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>⇒廃棄物管理施設の配置をもとに、各々の施設への竜巻の影響を検討し、随伴事象を検討している。</p> <p>⇒竜巻随伴事象として火災、溢水、外部電源喪失を想定し、これらの事象に対しても竜巻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している。</p> <p>⇒竜巻により屋外にある危険物貯蔵施設等の損傷、漏えい及び防油堤内での火災の発生を想定しても、竜巻防護対象施設の安全機能に影響を与えない設計とすることとしている。</p> <p>⇒再処理事業所内の屋外タンクの破損による溢水を想定しも、溢水が竜巻防護対象施設を収納する建屋の開口部まで到達しないよう施設を配置することとしている。</p> <p>⇒竜巻防護対象施設には、外部電源の給電を受けるものはないため、設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷・雹等、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による外部電源喪失が発生</p>

竜巻影響評価ガイドへの適合性

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>6. 附則</p> <p>この規定は、平成25年7月8日より施行する。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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>しても、竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことはない。</p>

令和 2 年 6 月 19 日 R4

補足説明資料 3 - 1 (8 条 竜巻)

設計対処施設の選定について

1. 設計対処施設の選定方針

設計竜巻から防護する施設（竜巻防護対象施設）は、安全上重要な施設とする。これらの施設を第1図～第3図に示す選定フローに従い、竜巻による風圧力、気圧差及び飛来物に対する設計対処施設として選定するとともに竜巻防護対象施設を収納する建屋を設計対処施設に選定する。また、建屋に収納される竜巻防護対象施設のうち第4図に示す選定フローに従い選定される設計荷重（竜巻）に対して十分な耐力を有しない建屋に収納される竜巻防護対象施設及び開口部を有する室に設置される竜巻防護対象施設のうち第5図に示す選定フローに従い選定される竜巻防護対象施設は、建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設として選定する。

また、安全上重要な施設以外の安全機能を有する施設については、当該施設の破損等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせる可能性がある施設又はその施設の特定の区画を、竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として選定する。

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設としては、竜巻防護対象施設等を除く構築物、系統及び機器の中から、竜巻防護対象施設等に対し、倒壊による機械的影響を及ぼし得る施設及び付属施設の破損等による機能的影響を及ぼし得る施

設を以下のとおり選定する。

竜巻防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設としては、建物・構築物の高さと同施設等との距離を考慮して、破損又は倒壊により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせるおそれがある施設を竜巻防護対象施設に機械的影響を及ぼし得る施設として選定する。

竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設としては、竜巻防護対象施設の付属設備のうち屋外にあるもので、風圧力、気圧差及び飛来物の衝突による破損等により竜巻防護対象施設の安全機能を損なわせるおそれがある施設を竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設として選定する。なお、その他の安全機能を有する施設で竜巻防護対象施設の付属設備のうち屋外にあるものに該当する施設はないことから、竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設はない。

2. 設計対処施設の選定結果

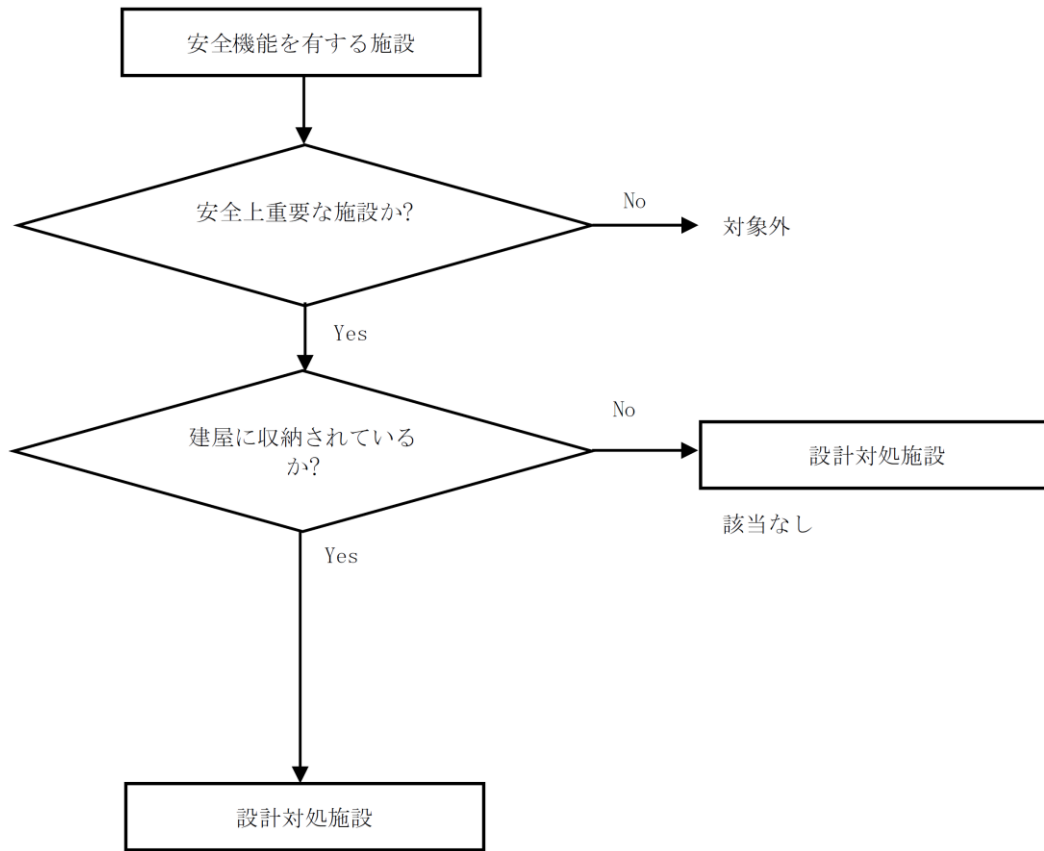
廃棄物管理事業変更許可申請書 添付書類五の「第 1.1 -1 表 安全上重要な施設」に基づいて、設計対処施設の選定を行った結果を第 1 表に示す。また、竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の選定結果を第 2 表に示す。

3. 設計対処施設と設計項目

上記 2. の結果から得られた竜巻に対する設計対処施設及びその設計項目を第 3 表に示すとともに、竜巻防護対象施設を収納する建屋及び竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る

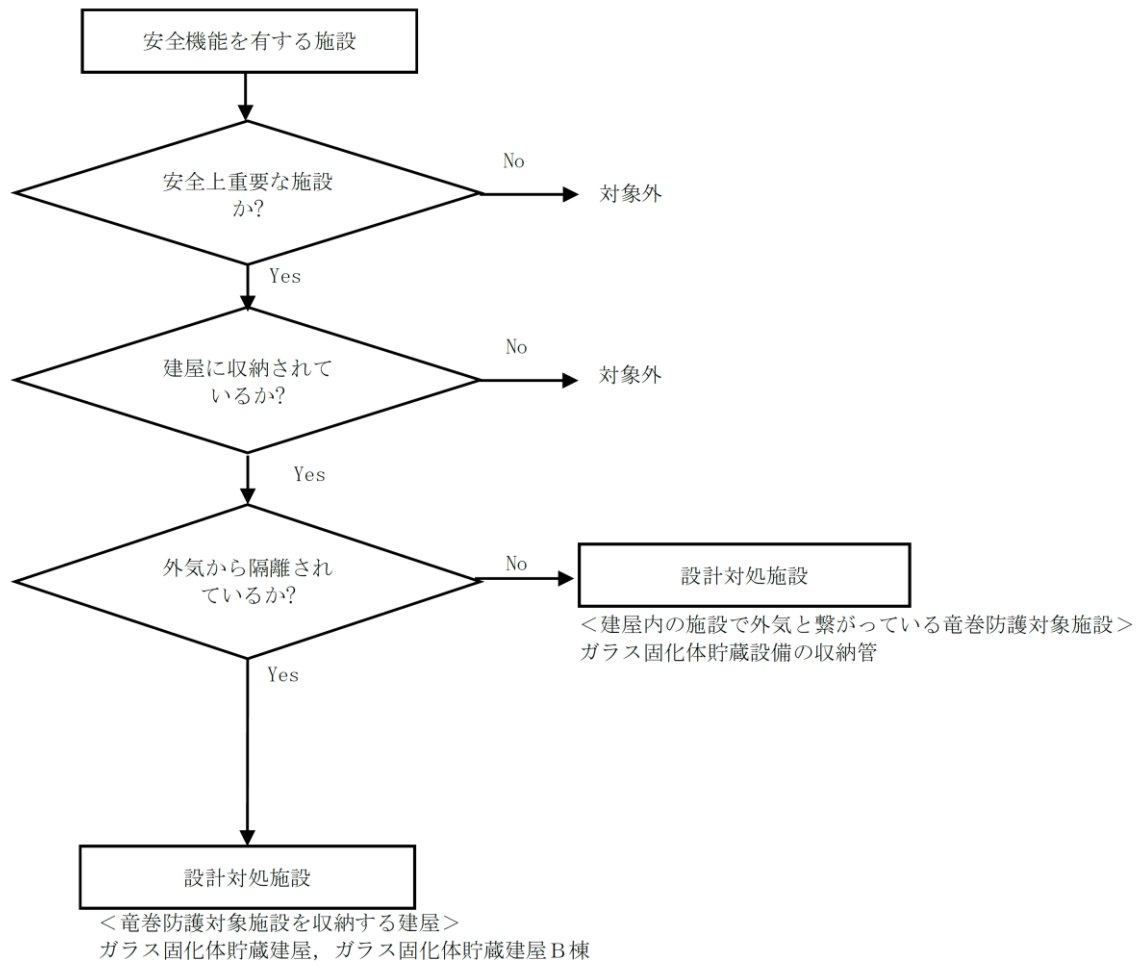
施設の配置を第6図に示す。

以 上

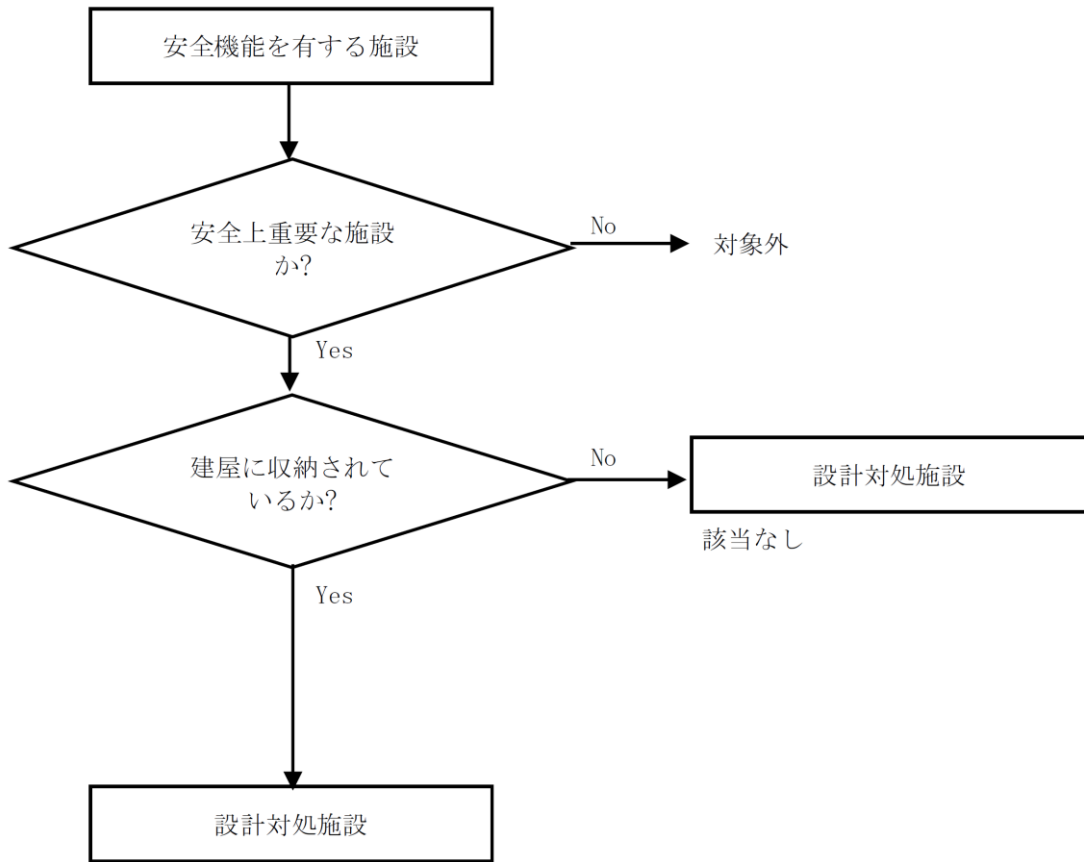


< 竜巻防護対象施設を収納する建屋 >
 ガラス固化体貯蔵建屋， ガラス固化体貯蔵建屋 B 棟

第 1 図 風圧力に対する設計対処施設の選定フロー

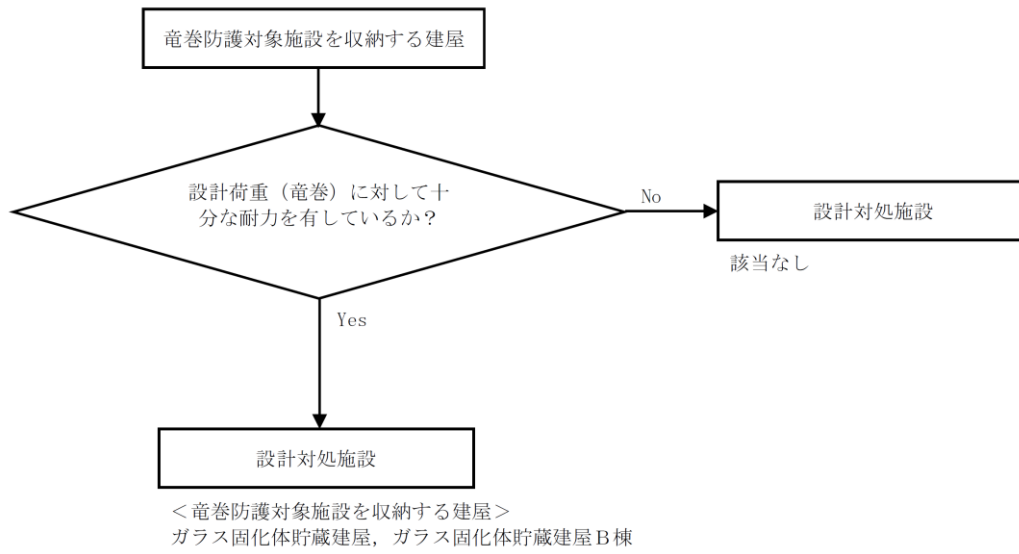


第 2 図 気圧差に対する設計対処施設の選定フロー

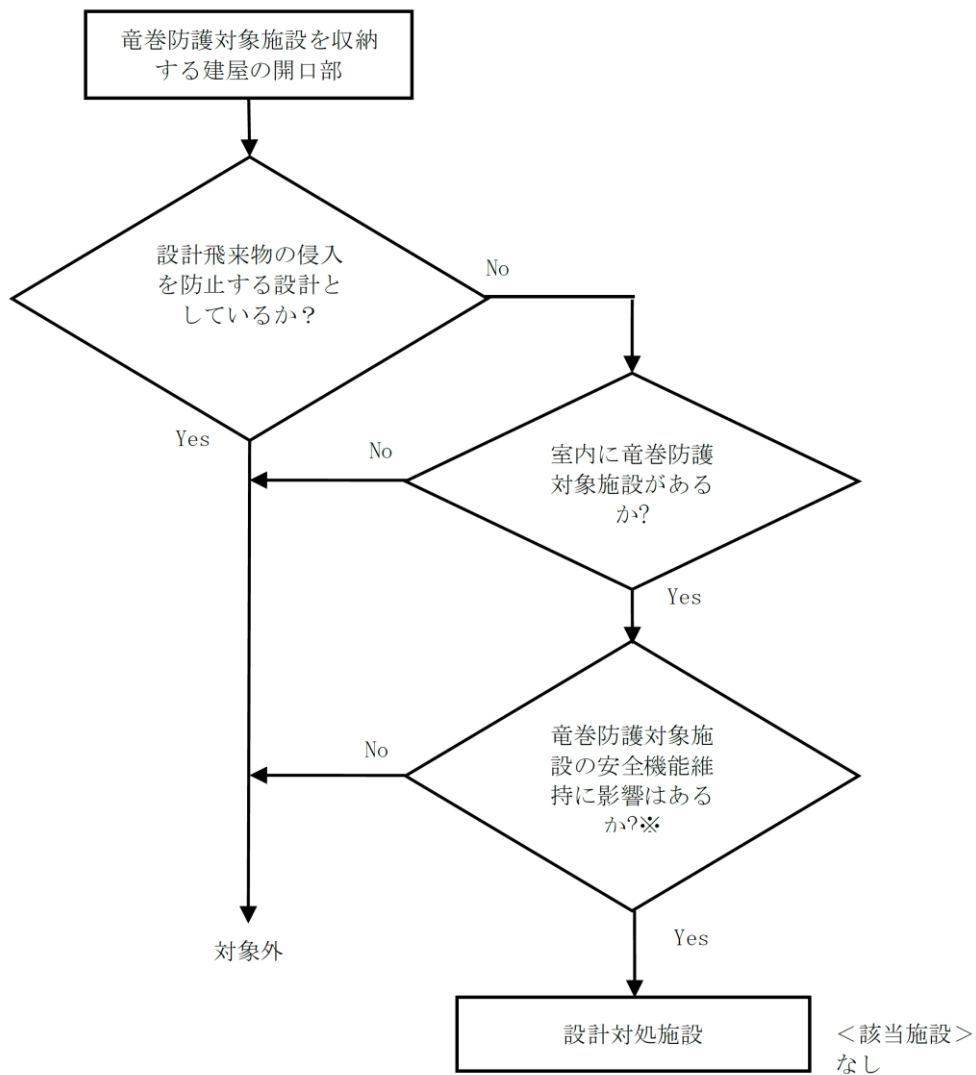


<竜巻防護対象施設を収納する建屋>
 ガラス固化体貯蔵建屋，ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第3図 飛来物に対する設計対処施設の選定フロー



第4図 建屋の耐力に関する設計対処施設の選定フロー



※設計飛来物が開口部を通じて室内へ侵入した場合に、安全上重要な施設へ衝突する可能性の有無を確認する。

第 5 図 開口部に対する設計対処施設の選定フロー

第 1 表 竜巻防護対象施設の選定結果一覧

建屋	安全上重要な施設	(竜巻) 設計項目		
		風圧力	気圧差	飛来物
ガラス固化体貯蔵 建屋	収納管	×	○	×
	通風管	×	×	×
	貯蔵建屋床面走行クレー ンのしゃへい容器	×	×	×
	貯蔵区域しゃへい	×	×	×
	ガラス固化体検査室しゃ へい	×	×	×
ガラス固化体貯蔵 建屋 B 棟	収納管	×	○	×
	通風管	×	×	×
	貯蔵建屋床面走行クレー ンのしゃへい容器	×	×	×
	貯蔵区域しゃへい	×	×	×

○：評価対象 ×：評価対象（ただし，当該設備を収納する建屋が評価対象）

—：評価対象外

第2表 波及的影響を及ぼし得る施設の検討結果一覧

設計対処施設	周辺の施設	判定	備考
ガラス固化体貯蔵建屋	ガラス固化体受入れ建屋	○	
	ガラス固化体貯蔵建屋 B 棟	—	設計対処施設
	北換気筒(ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒)	○	
	第1ガラス固化体貯蔵建屋	—	設計対処施設
ガラス固化体貯蔵建屋 B 棟	ガラス固化体受入れ建屋	○	
	ガラス固化体貯蔵建屋	—	設計対処施設
	北換気筒(ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒)	○	
	ユーティリティ建屋	(1)	離隔距離(約 19m) > 建屋高さ(約 17m)

<判定>

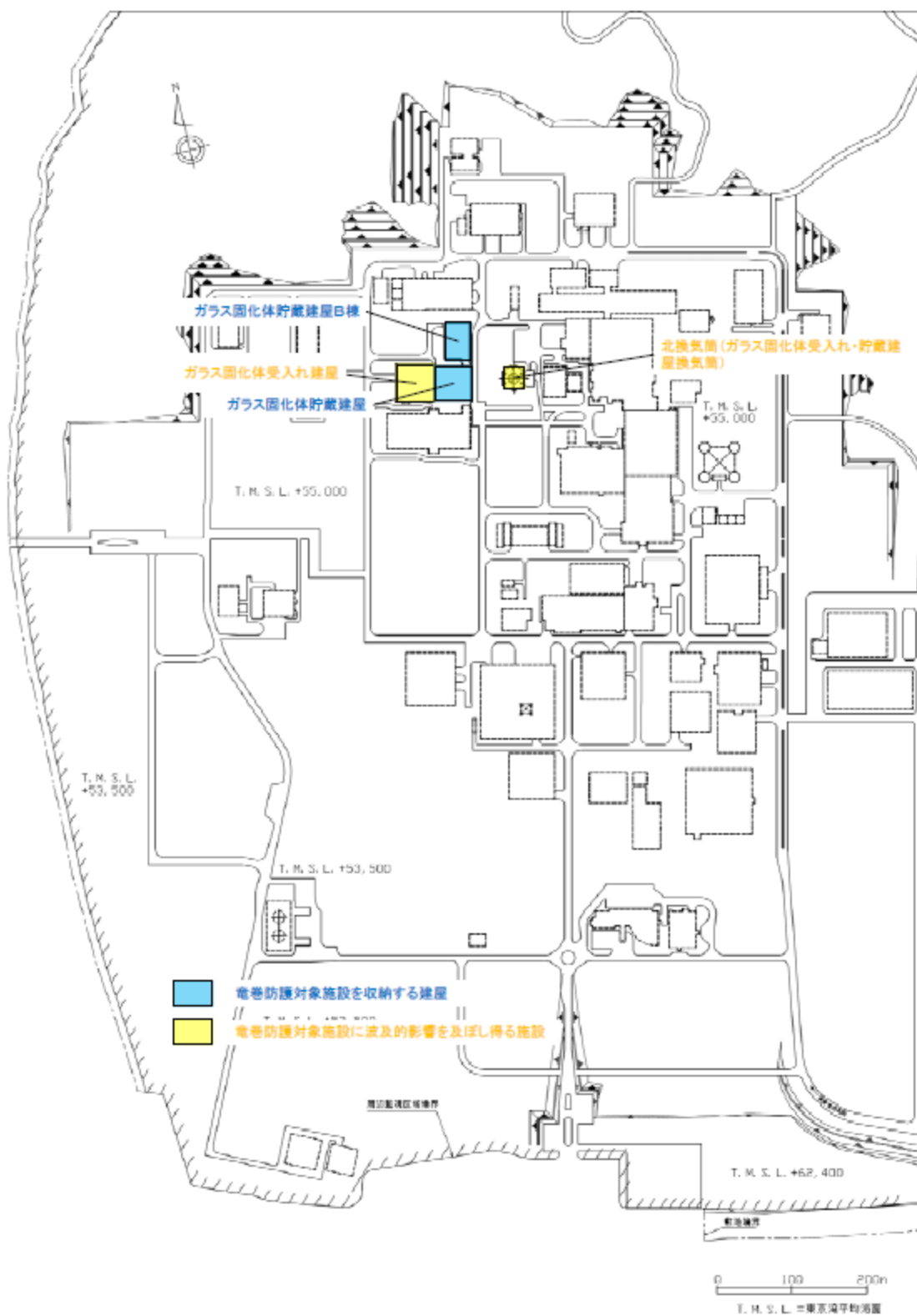
○：竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

(1)：「設計対処施設への距離 > 建屋・構築物の高さ」の条件を満たすため、波及的影響を及ぼすおそれのないもの

第3表 設計対処施設と設計項目

設計対処施設		設計項目		
		風圧力	気圧差	飛来物
竜巻防護対象施設を 収納する建屋	・ガラス固化体貯蔵建屋	○	○	○
	・ガラス固化体貯蔵建屋B棟	○	○	○
竜巻防護対象施設に 波及的影響を 及ぼし得る施設	・北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）	○	—	○
	・ガラス固化体受入れ建屋	○	○	○
建屋内の施設で 外気と繋がっている 竜巻防護対象施設	・ガラス固化体貯蔵設備の収納管	—	○	—

凡例) ○：設計対象 —：設計対象外



第 6 図 設計対処施設の配置

令和 2 年 4 月 17 日 R2

補足説明資料 3 - 2 (8 条 竜巻)

竜巻に対して防護する必要のある開口部の選定について

1. 選定方針

建屋に設置される開口部は，第1図に示す選定フローに従って竜巻防護対象施設への影響の有無を検討し，影響を受ける竜巻防護対象施設については，「建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設」として選定する。

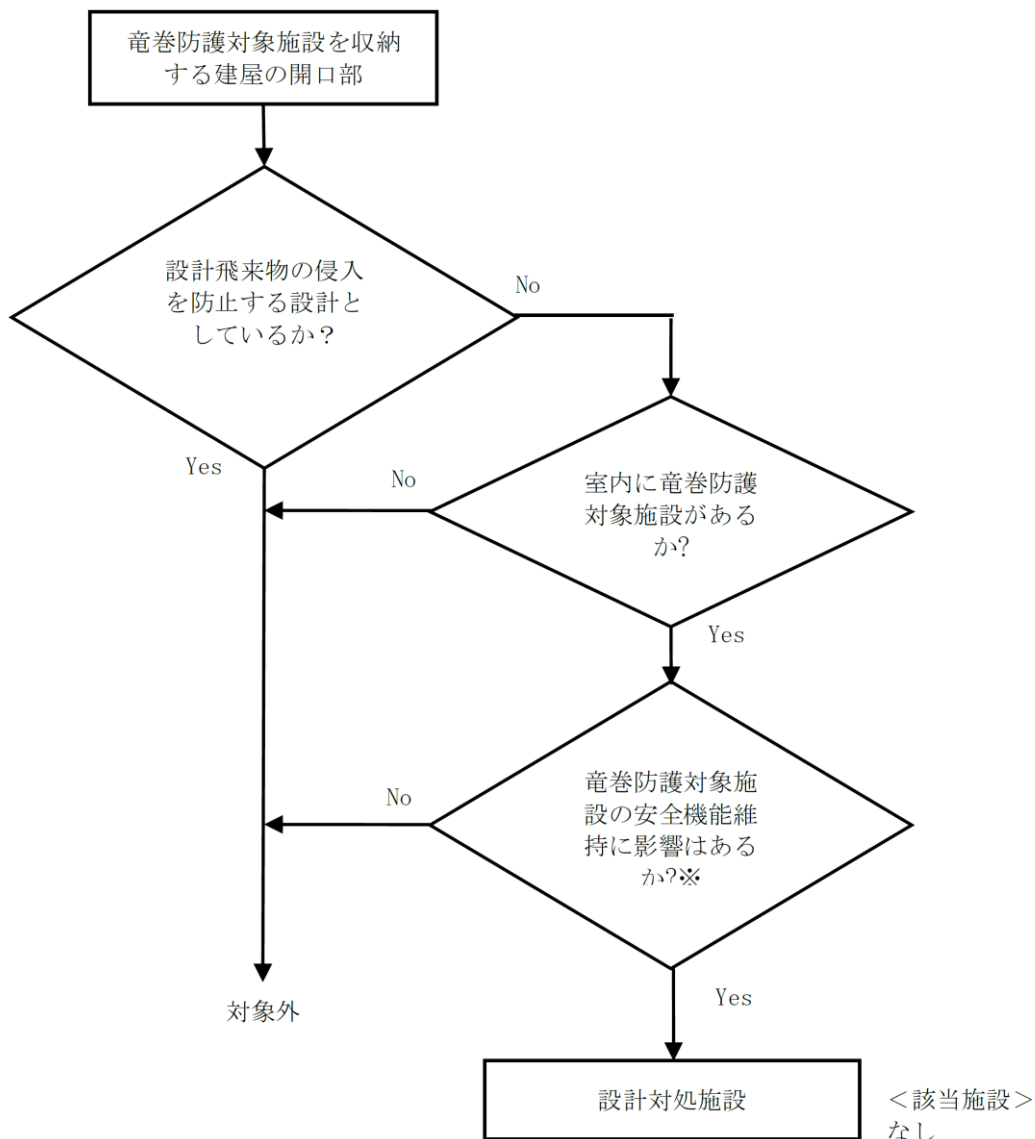
具体的には，開口部を有する室に竜巻防護対象施設が設置されているか現地調査又は図面によって確認し，設置されている場合には，開口部からの飛来物侵入により竜巻防護対象施設に影響を与えるおそれがあるか検討する。影響を与えるおそれがあると判断した開口部は防護対策を施す対象とするとともに，影響を受ける竜巻防護対象施設を，「建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設」として選定する。

2. 設計対処施設の選定結果

第1図に示す選定フローに従い選定した開口部及び，「建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設」の選定結果を第1表に示す。

結果として，廃棄物管理施設には竜巻に対して防護する必要のある開口部はない。

以 上



※設計飛来物が開口部を通じて室内へ侵入した場合、安全上重要な施設へ衝突する可能性の有無を確認する。

第 1 図 開口部に対する設計対処施設の選定フロー

第1表 建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設の選定結果

建屋	階層	開口部番号	安全上重要な施設		安全機能への影響	
			部屋番号	機器名称	有無	備考
廃棄物管理施設 ガラス固化体 貯蔵建屋	1	SSD03		なし	無	
	1	SSD08		なし	無	
	1	SSD01		なし	無	
	R	SSD01		なし	無	
	R	-(第2給気口)		なし	無	
	1	-(第1貯蔵区域冷却空気入口シャフト)		収納管、通風管	無	開口部から安全上重要な施設への直線には十分な厚さをもつコンクリート壁があり、飛来物が安全上重要な施設に影響を及ぼすおそれはない。また、冷却空気流路は十分な面積を有しており、飛来物により冷却空気流路が閉塞することはない。
	1	-(第2貯蔵区域冷却空気入口シャフト)		収納管、通風管	無	開口部から安全上重要な施設への直線には十分な厚さをもつコンクリート壁があり、飛来物が安全上重要な施設に影響を及ぼすおそれはない。また、冷却空気流路は十分な面積を有しており、飛来物により冷却空気流路が閉塞することはない。
	R	-(第1貯蔵区域冷却空気出口シャフト)		収納管、通風管	無	開口部から安全上重要な施設への直線には十分な厚さをもつコンクリート壁があり、飛来物が安全上重要な施設に影響を及ぼすおそれはない。また、冷却空気流路は十分な面積を有しており、飛来物により冷却空気流路が閉塞することはない。
	R	-(第2貯蔵区域冷却空気出口シャフト)		収納管、通風管	無	開口部から安全上重要な施設への直線には十分な厚さをもつコンクリート壁があり、飛来物が安全上重要な施設に影響を及ぼすおそれはない。また、冷却空気流路は十分な面積を有しており、飛来物により冷却空気流路が閉塞することはない。
廃棄物管理施設 ガラス固化体 貯蔵建屋B棟	1	SSD09		なし	無	
	1	SSD12		なし	無	
	1	SSD02		なし	無	
	1	SSD03		なし	無	
	1	SSD06		なし	無	
	1	SSS07		なし	無	
	R	SSD11		なし	無	
	2	-(外気取入れ)		なし	無	
	2	-(清浄区域排気)		なし	無	
	1	-(第3貯蔵区域冷却空気入口シャフト)		なし	無	
	1	-(第4貯蔵区域冷却空気入口シャフト)		なし	無	
	R	-(第3貯蔵区域冷却空気出口シャフト)		なし	無	
	R	-(第4貯蔵区域冷却空気出口シャフト)		なし	無	

■については商業機密の観点から公開できません。

令和 2 年 6 月 19 日 R3

補足説明資料 3 - 3 (8 条 竜巻)


耐震Sクラス施設について


「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下「竜巻ガイド」という。）においては、竜巻及びその随件事象等によって施設の安全性を損なわない設計であることを確認する施設（以下「竜巻防護対象施設」という。）は「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，機能）及び建屋，構築物等とされている。

これに対して、廃棄物管理施設の竜巻影響評価においては安全上重要な施設を竜巻防護対象施設として選定しているが、廃棄物管理施設の耐震Sクラス施設は全て安全上重要な施設であるため、竜巻ガイドで要求される竜巻防護対象施設を網羅している。

耐震重要度分類及び廃棄物管理施設の安全上重要な施設の関係

耐震重要度分類	廃棄物管理施設
Sクラス	安重
Bクラス	非安重
Cクラス	非安重

 : ガイドに基づき設定した竜巻防護対象施設の範囲

 : 廃棄物管理施設における竜巻防護対象施設の範囲

また、竜巻ガイドにおいて、耐震Sクラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設についても設計対処施設として評価することを要求されているが、これについても上述の竜巻防護対象施設（安全上重要な施設）に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させるおそれがある施設を選定している。

以 上

令和 2 年 6 月 19 日 R3

補足説明資料 4 - 1 (8 条 竜巻)

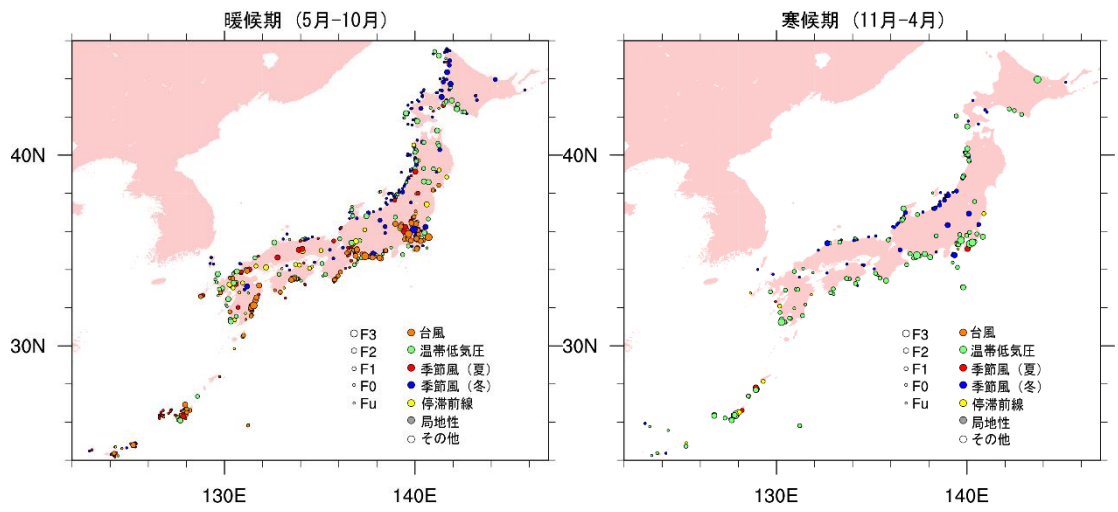
竜巻検討地域の設定について

1. 総観場に基づく気象条件

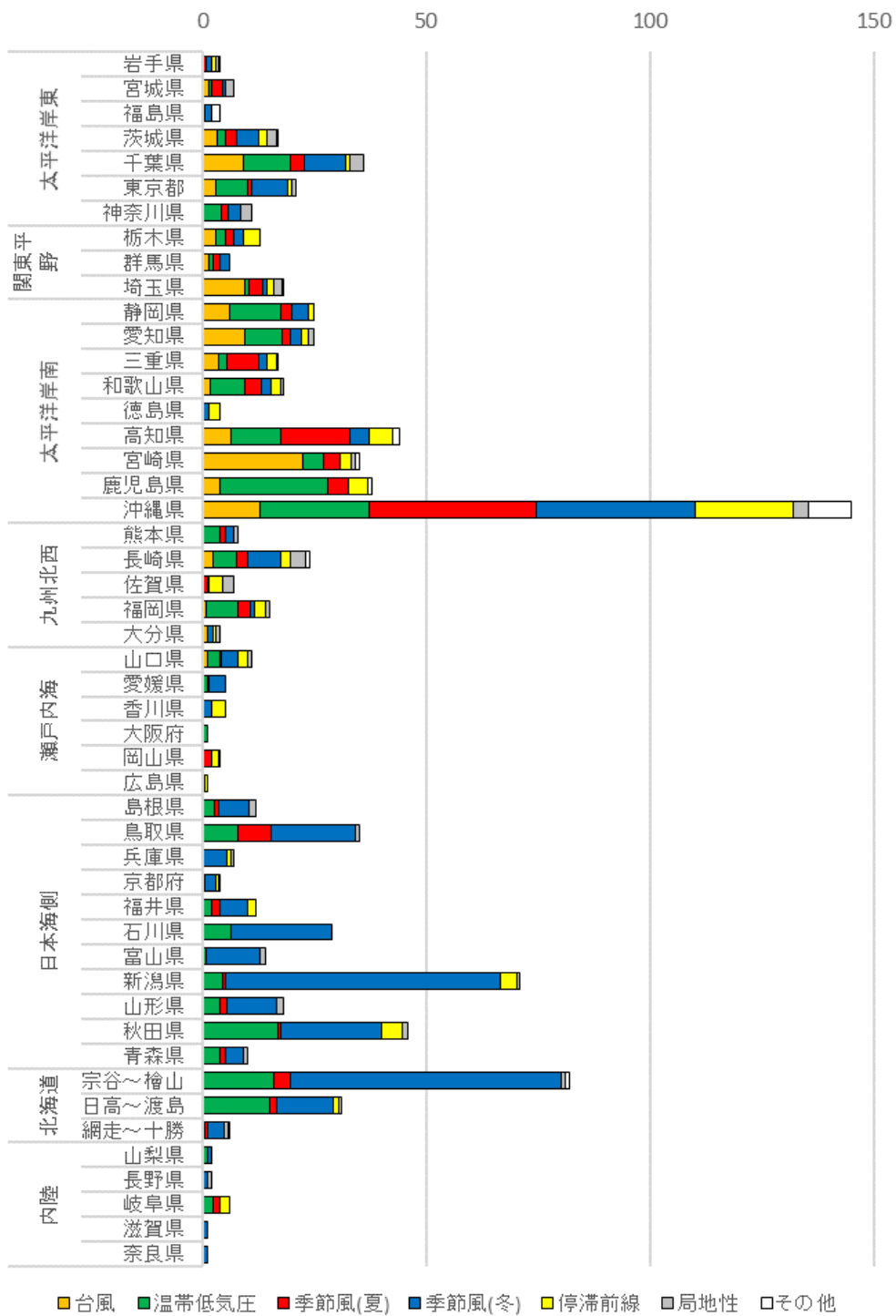
竜巻発生時の総観場は、東京工芸大学委託⁽¹⁾成果を参考に、気象庁「竜巻等の突風データベース」の総観場を、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して7種(台風, 温帯低気圧, 季節風(夏), 季節風(冬), 停滞前線, 局地性及びその他)に再編した総観場を用い、竜巻の発生要因別の地域分布の特徴を把握した。

「竜巻等の突風データベース」において1961年1月～2013年12月に発生位置が示された竜巻の季節別の竜巻発生位置を第1図に示す。また、各都道府県での要因別発生数及び発生要因比率をそれぞれ第2図及び第3図に示す。

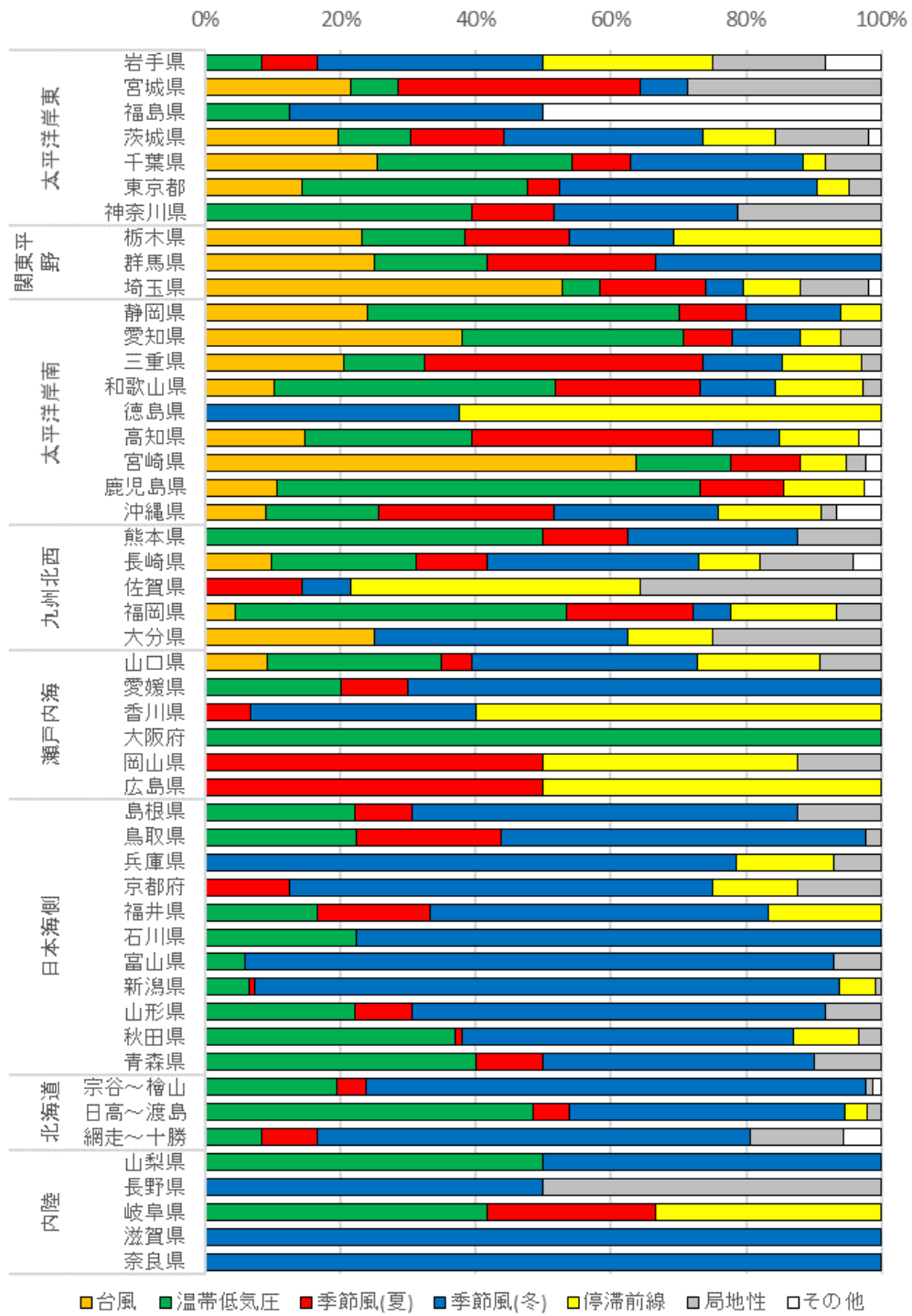
これらより、台風起因の竜巻は関東以西の太平洋側(特に東～南方向に開けた地域)で発生数が多く、F2及びF3スケールの竜巻も多いこと、温帯低気圧起因の竜巻は全国的に発生数が多く、F2及びF3スケールの竜巻もみられ、特に南～西方向に開けた地域はより発生数が多いことがわかる。また、季節風(夏)起因の竜巻は太平洋側や内陸を中心に、全国的に発生していること、季節風(冬)起因の竜巻は日本海側や関東以北で発生数が多いこと、停滞前線起因の竜巻は関東以西で発生していることがわかる。



第 1 図 季節別の竜巻発生位置（左：暖候期，右：寒候期）



第2図 各都道府県での要因別発生数



第3図 各都道府県での発生要因比率

2. 竜巻検討地域の設定

廃棄物管理施設が立地する地域の気候と竜巻発生観点での特徴を踏まえ、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 13061911 号 原子力規制委員会決定）を参考に以下の a. ～ d. の条件を考慮して竜巻検討地域を設定する。第 4 図に竜巻検討地域を示す。

- a. 立地地域の気候及び竜巻発生観点での特徴を踏まえ、青森県（竜飛岬より太平洋側）から岩手県を基本とする。
- b. IAEA の⁽²⁾基準を参考に、廃棄物管理施設を中心とする 10 万 km^2 （半径約 180 km ）の範囲を目安とし、その範囲に掛かる北海道南西部は、立地地域と同じ太平洋側に面していることを考慮して、竜巻検討地域に含める。
- c. 竜巻検討地域は、分水嶺および関口武による気候区分⁽³⁾を参考に設定する。
- d. 廃棄物管理施設が海岸線から約 5 km の位置に立地していること及び竜巻の発生がほとんど海岸線付近であることから、海岸線に沿った海側 5 km 及び陸側 10 km の範囲を考える。

設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために、竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率と、日本海側及び太平洋

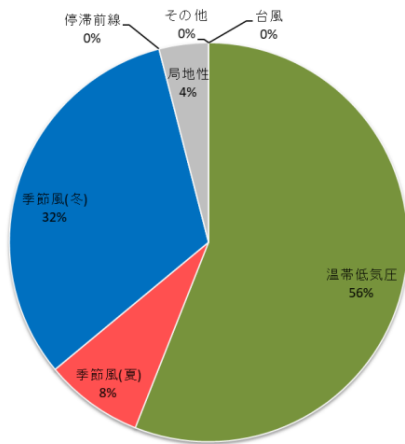
側における出現比率とを比較した結果を第5図に示す。

竜巻検討地域では、温帯低気圧起因の竜巻が多く、太平洋側で多くみられる台風起因の竜巻は確認されていない。一方、北海道～山口県の日本海側では季節風（冬）起因の竜巻が多く、台風起因の竜巻は確認されていない。また、茨城県以西の太平洋側では竜巻検討地域と比較して、台風、季節風（夏）及び停滞前線起因の竜巻が多い。

以上より、竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率は、日本海側及び太平洋側の出現比率とも傾向が異なっていることが確認できる。

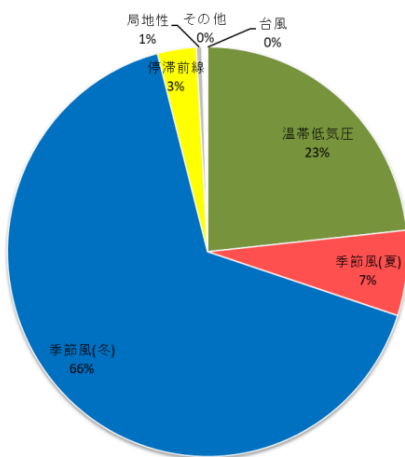


第4図 竜巻検討地域



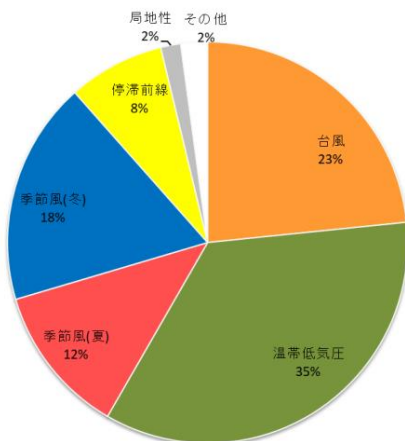
◆ 竜巻検討地域

- ・「温帯低気圧」を起源とする竜巻が多い。
- ・太平洋側で多くみられる「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



◆ 北海道～山口県の日本海側(223事例)

- ・「季節風(冬)」を起源とする竜巻が多い。
- ・「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



◆ 茨城県以西の太平洋側(372事例)

- ・竜巻検討地域と比較して、「台風」、「季節風(夏)」、「停滞前線」を起源とする竜巻が多い。
- ・太平洋側から暖かく湿った気流が、竜巻の親雲の発達を促すと考えられる。

第5図 竜巻検討地域等における竜巻の発生要因の出現比率

3. 参考文献

- (1) 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. 2011-02.
- (2) IAEA Safety Standards Series No. SSG-18: 2011. Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. IAEA.
- (3) 関口武. “日本の気候区分”. 東京教育大学地理学研究報告. 東京教育大学理学部地理学教室, 1959-03.

以 上

令和 2 年 6 月 19 日 R1

補足説明資料 4 - 2 (8 条 竜巻)

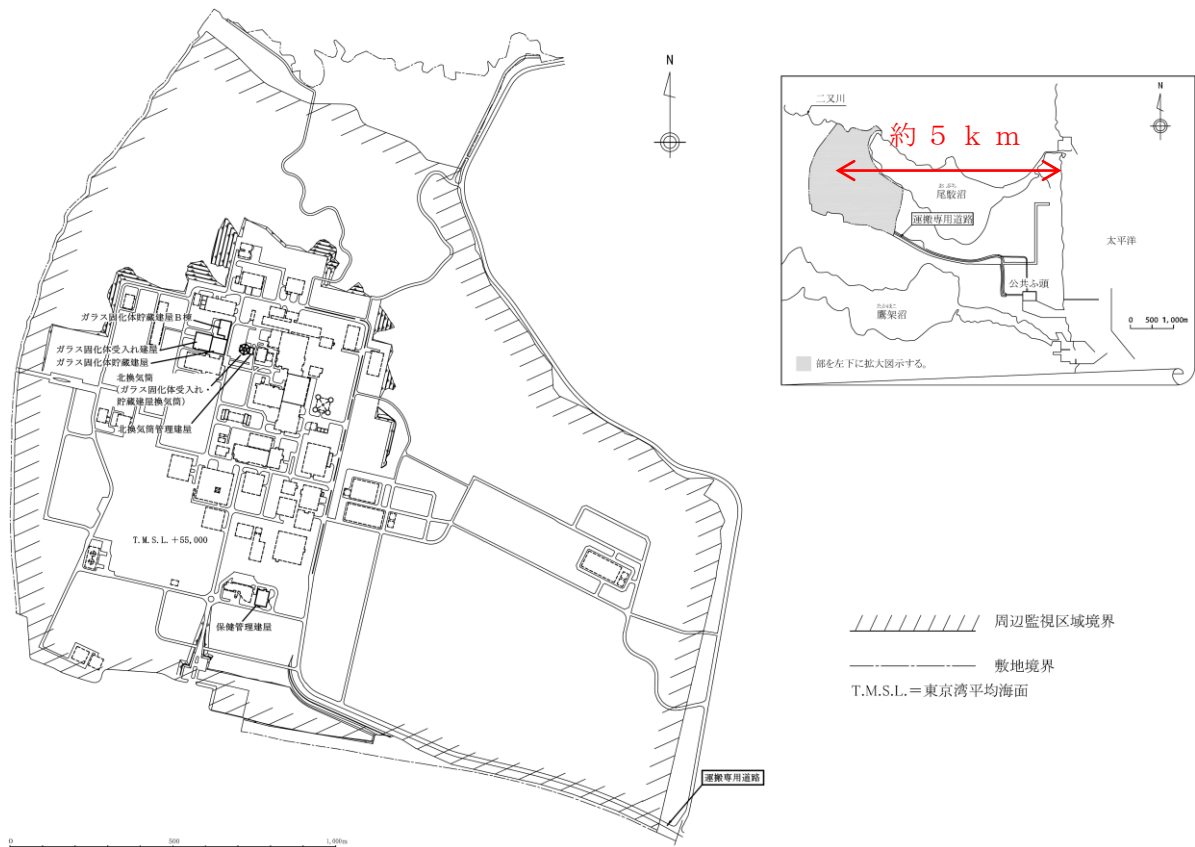
竜巻検討地域の範囲設定について

竜巻検討地域の設定は、「竜巻影響評価ガイド」を参考に、廃棄物管理施設が立地する地域の気候及び竜巻発生の観点での特徴を踏まえて実施する。

「竜巻影響評価ガイド」では、日本における竜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こと及び原子力発電所が海岸線付近に立地していることを前提に、竜巻検討地域を陸側及び海側それぞれ5 kmを目安とするとしているが、立地地点が海岸線から5 kmの範囲を逸脱する場合は、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえ竜巻検討地域を設定することを定めている。

廃棄物管理施設は第1図のとおり海岸線から5～10 km内陸に位置しており、ガイドにて示されている陸側及び海側5 kmの範囲を逸脱している。

したがって、廃棄物管理施設の竜巻検討地域は立地地点を包含する陸側10 kmをベースとし、海側5 kmも加えることにより、竜巻検討地域が保守的な設定となるよう考慮している。



第 1 図 廃棄物管理施設の配置図

「竜巻影響評価ガイド」(抜粋)

解説 3.2 (2) 原子力発電所が海岸線付近に立地する場合の
竜巻検討地域の設定

……海岸線から 5 km 以上離れた地域では、竜巻の発生数が急激に減少する傾向が見られる。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 5 km の範囲を目安に竜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を逸脱する地域に立地する場合は、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえつつ竜巻検討地域の範囲を別途検討する必要がある。

以上

令和元年 12 月 9 日 R0

補足説明資料 4 - 3 (8 条 竜巻)

竜巻検討地域の設定の妥当性について

1. 分水嶺によって竜巻検討地域を日本海側から区画することについて

I A E A の基準を参考に、廃棄物管理施設を中心とする 10 万 km^2 （半径約 180 km ）の範囲を竜巻検討地域の目安とした。ただし、当該範囲内の日本海側については、分水嶺を境界とし、竜巻検討地域には含めない。

洋上から流入した温暖湿潤な大気が山岳を越えようとした場合、空気塊の上昇に伴い気温が低下し、昇り斜面上空で空気塊が飽和して降水粒子が生成され、湿潤不安定な状態が解消されることから、山岳を乗り越えた大気は大きな竜巻を引き起こしがたい。よって、発生する竜巻の特性は分水嶺を境界にして大きく異なることになる。

1961 年～2013 年 12 月の期間の竜巻の集計によると、日本海側では季節風（冬）を起源とする竜巻がほとんどを占めるのに対し、竜巻検討地域では、季節風（冬）を起源とする竜巻は少なく、温帯低気圧を起源とする竜巻が多い。（第 1 図）

このため、竜巻検討地域は分水嶺で区画することは妥当と考えられる。

2. 東北太平洋側（福島以北～岩手）の総観場について

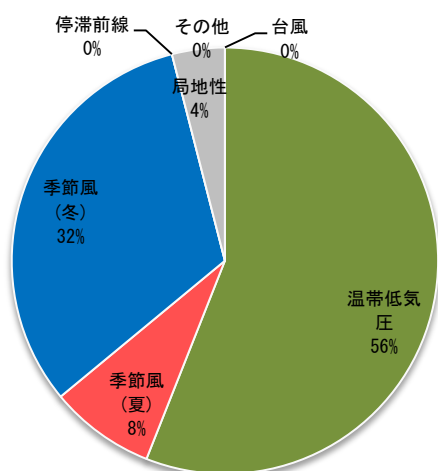
東北太平洋側（福島以北～岩手）までの地域は，立地地域から半径約 180 k m の範囲外であるため，竜巻検討地域に含めない。

なお，東北太平洋側の地域での発生数は他地域に比べて少なく，地域特有の総観場は見られない。茨城以西では台風及び暖気移流に伴う竜巻が多く，このことが F 3 規模の竜巻の多さにつながっているのに対し，東北太平洋側では台風由来の竜巻が少ないことで茨城以西とは異なる特徴があるので，竜巻検討地域に茨城以西を含めることも適当でない。

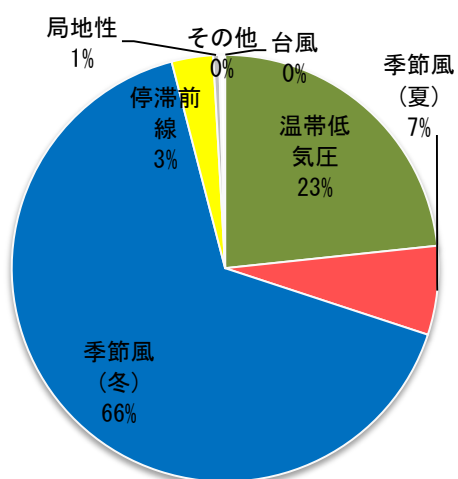
（第 2 図）

以 上

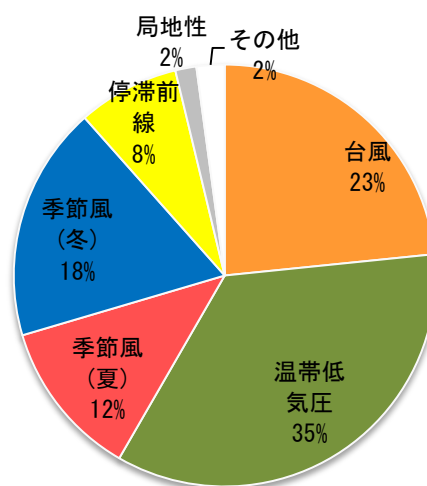
竜巻検討地域



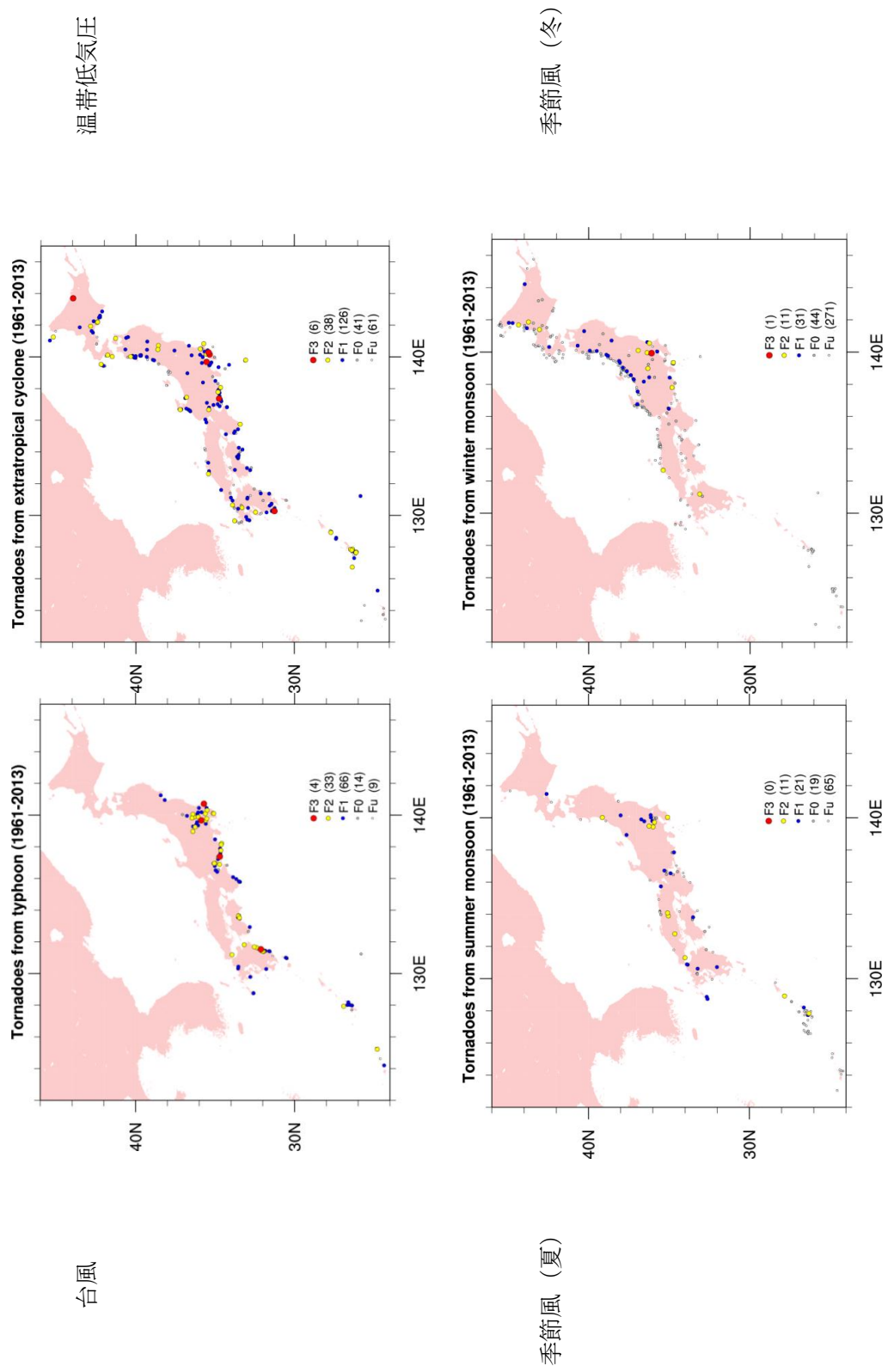
日本海側



太平洋側



第 1 図 竜巻検討地域等における竜巻発生要因の出現比率



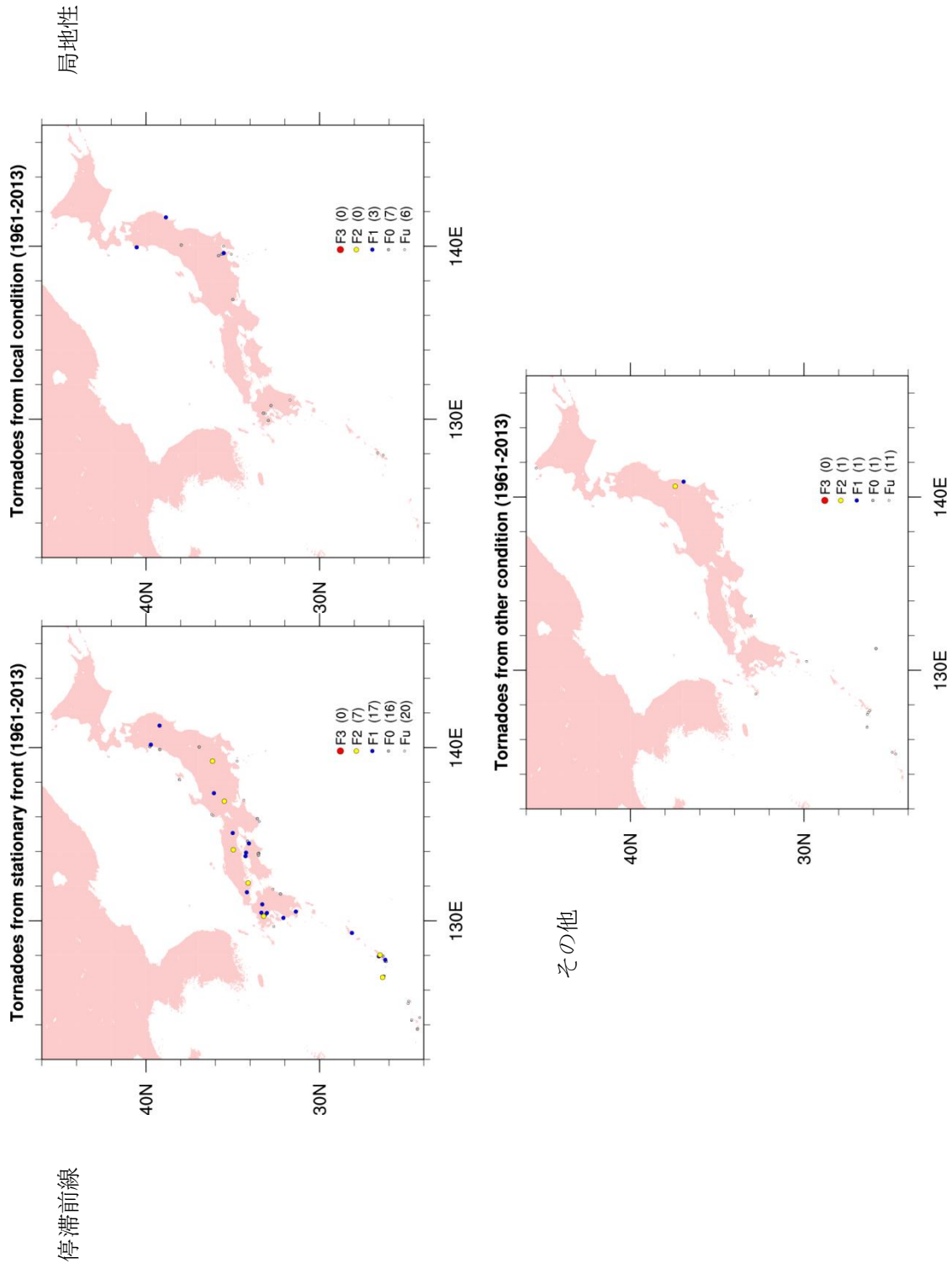
温帯低気圧

季節風 (冬)

台風

季節風 (夏)

第2図 竜巻の発生要因別地域分布



第2図 竜巻の発生要因別地域分布 (つづき)

令和 2 年 6 月 19 日 R4

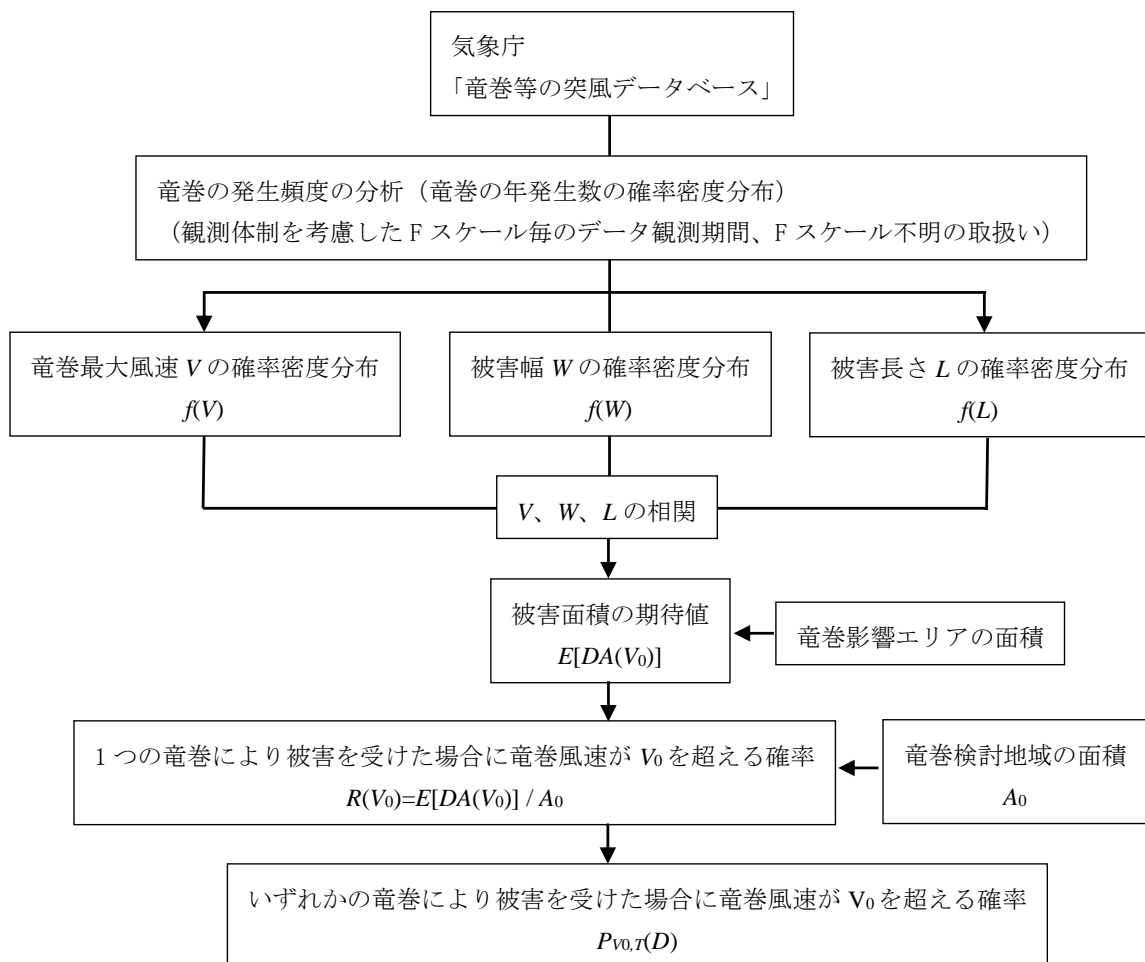
補足説明資料 4 - 4 (8 条 竜巻)

ハザード曲線による竜巻最大風速 (V_{B2}) の計算について

1. 評価フロー

竜巻ガイドの解説 3.3.2 に例示された $Wen \& Chu^{(1)}$ 及び $Garrison \ et \ al.^{(2)(3)}$ による最大風速 V_{B2} を算定する。具体的な算定方法については、東京工芸大学委託成果「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁴⁾ を参考とする。

第1図にハザード曲線の算定フローを示す。



第1図 ハザード曲線の算定フロー

2. 竜巻発生頻度の分析

(1) 竜巻発生頻度の補正

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1月～2013年12月のデータを用いて、竜巻の発生数を分析する。観測体制が段階的に強化されたため、観測データの精度には差がある。特に2007年以降の発生数は非常に多くなっている。したがって、観測データを以下の3つの期間に分け、補正を行う。

- a. 2007年1月～2013年12月（7年間）
- b. 1991年1月～2013年12月（23年間）
- c. 1961年1月～2013年12月（53年間）

上記3つの観測期間それぞれに対して、竜巻発生数、年間平均発生数及びその標準偏差をFスケール毎に調査した結果を第1表に示す。

擬似的な53年間のデータや統計量は以下を基本的な考え方として作成した。

- a. F 0 及び F スケール不明の竜巻については、観測体制が強化される前は見過ごされた可能性が高いことから、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- b. F 1 の竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- c. F 2 及び F 3 スケールの竜巻については、見逃される可能性が少ないため1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。

d. 53年間の発生数を上記 a～c の観測期間との比率から F スケールごとに推計する。

e. 陸上の F スケール不明竜巻については、被害が確認されなかったということであるため F0 竜巻とする。近年、確認数の多い海上の F スケール不明竜巻については、補足説明資料 4-5 に記載のとおり、(陸上+上陸) 竜巻の強度別発生頻度で按分することで保守的な評価となるようにする。

以上の分析結果を第 1 表に示す。竜巻検討地域において、53 年間に 25 個の竜巻が観測されたことに対し、95 個の竜巻が発生したと推定した。

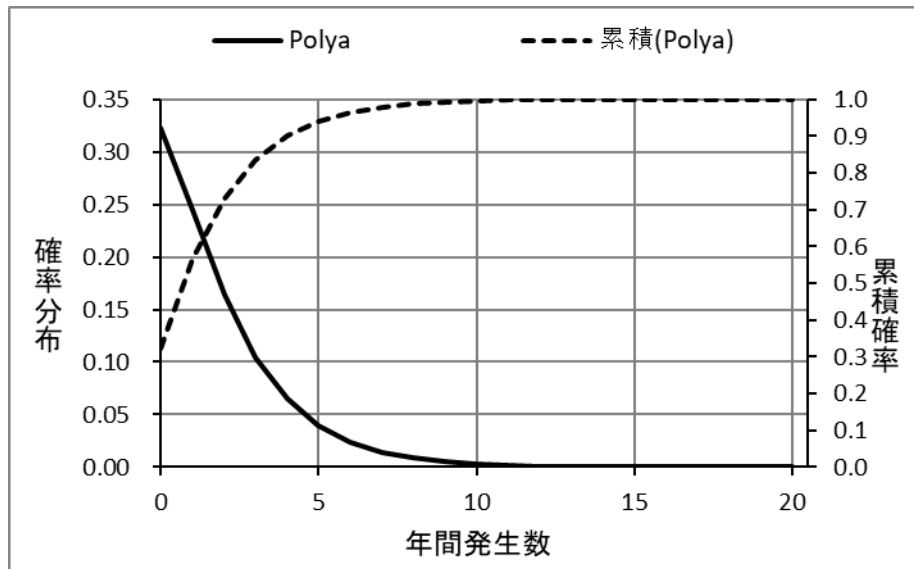
第 1 表 竜巻発生数の分析結果

	発生数の統計	(陸上+上陸) 竜巻						海上竜巻	総数	
		竜巻スケール						小計		不明
		F0	F1	F2	F3	F4	不明			
1961.01～ 2013.12 (53 年間)	期間内総数(個)	6	9	4	0	0	1	20	5	25
	年平均(個)	0.11	0.17	0.08	0.00	0.00	0.02	0.38	0.09	0.47
	標準偏差(個)	0.58	0.51	0.27	0.00	0.00	0.14	0.97	0.41	1.08
1991.01～ 2013.12 (23 年間)	期間内総数(個)	6	9	2	0	0	1	18	5	23
	年平均(個)	0.26	0.39	0.09	0.00	0.00	0.04	0.78	0.22	1.00
	標準偏差(個)	0.86	0.72	0.29	0.00	0.00	0.21	1.35	0.60	1.48
2007.01～ 2013.12 (7 年間)	期間内総数(個)	5	3	0	0	0	0	8	4	12
	年平均(個)	0.71	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	0.57	1.71
	標準偏差(個)	1.50	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	0.98	2.06

	発生数の統計	竜巻スケール						総数
		F0	F1	F2	F3	F4	不明	
疑似 (53年間) (按分後)	期間内総数(個)	57	32	6	0	0	0	95
	年平均(個)	1.07	0.58	0.11	0.00	0.00	0.00	1.76
	標準偏差(個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06
疑似 (53年間) (全竜巻)	期間内総数(個)	57	32	6	0	0	0	95
	年平均(個)	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00	0.00	1.79
	標準偏差(個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06

(2)年発生数の確率密度分布の設定

竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、竜巻は気象条件の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布となり、東京工芸大学委託成果にポリヤ分布への適合性が良いことが示されているため、ハザード曲線の評価に当たって使用する竜巻の年発生数の確率分布は第2図に示すポリヤ分布を採用する。



第2図 竜巻検討地域における竜巻発生数の確率密度分布と累積確率

3. 竜巻の被害幅及び被害長さの分析

被害幅及び被害長さについても発生数と同様に解析する。被害幅及び被害長さの解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べてかなり少ない。したがって、以下の手順で53年間の被害幅及び被害長さの統計量の分析を行った。

- a. 統計量を確保するために、1961年以降の観測データを使用し、被害幅及び被害長さのデータをFスケール別に抽出する。
- b. 抽出されたFスケール別の被害幅及び被害長さデータを大きい順に並び替え、53年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、擬似53年間のデータとする。
- c. 擬似53年間のデータについて平均値及び標準偏差を求める。

b.において、被害幅及び被害長さデータの大きい順からサンプリングすることにより、被害幅及び被害長さの平均値が大きくなるため、より保守的な評価となる。

第2表及び第3表に擬似53年間のデータを基に分析した被害幅及び被害長さの平均値及び標準偏差を示す。

第2表 被害幅の統計量

	竜巻幅 の統計 (m)	計	竜巻スケール					不明	総数
			F0	F1	F2	F3	F4		
1961_01～ 2013_12 (53年間)	期間内総数	15	4	9	2	0	0	10	25
	平均値 (m)	130	50	188	33	0	0		
	標準偏差 (m)	146	22	174	4	0	0		
疑似 (53年間) (全竜巻)	期間内総数	95	57	32	6	0	0	0	95
	平均値 (m)	102	50	207	33	0	0		
	標準偏差 (m)	123	19	166	3	0	0		

第3表 被害長さの統計量

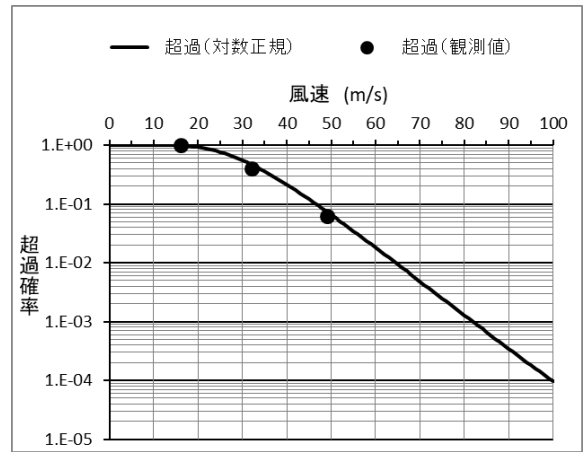
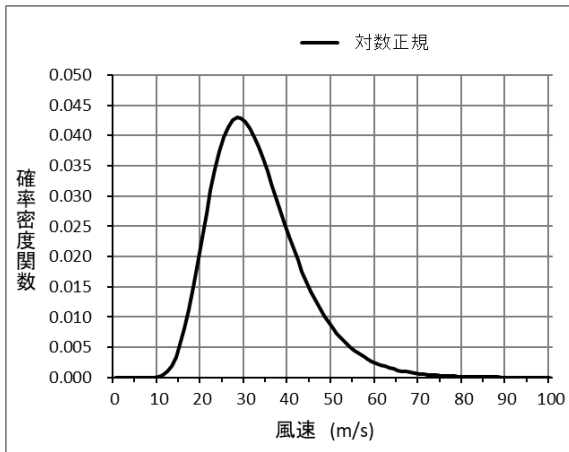
	被害長さ の統計 (km)	計	竜巻スケール					不明	総数
			F0	F1	F2	F3	F4		
1961_01～ 2013_12 (53年間)	期間内総数	16	4	9	3	0	0	9	25
	平均値 (m)	1,188	625	1,222	1,833	0	0		
	標準偏差 (m)	845	350	807	1,258	0	0		
疑似 (53年間) (全竜巻)	期間内総数	95	57	32	6	0	0	0	95
	平均値 (m)	934	632	1,303	1,833	0	0		
	標準偏差 (m)	692	307	781	1,125	0	0		

4. 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率密度分布及び相関係数

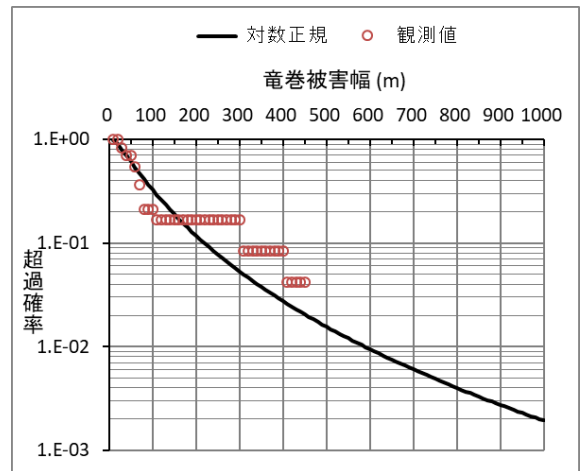
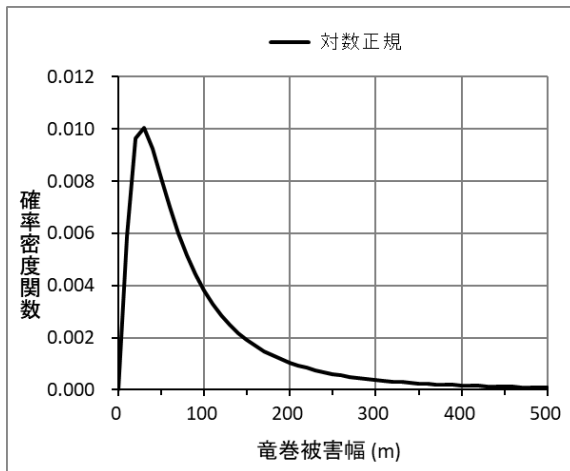
竜巻検討地域における竜巻の発生数，被害幅及び被害長さは，前記で評価した統計量を有する対数正規分布に従うものとする。第4表に統計量を示す。それぞれの確率密度分布については，第3図～第5図に示す。さらに，1961年以降の観測データのみを用いて，第5表に示すとおり竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。

第4表 発生数，被害幅及び被害長さの統計量

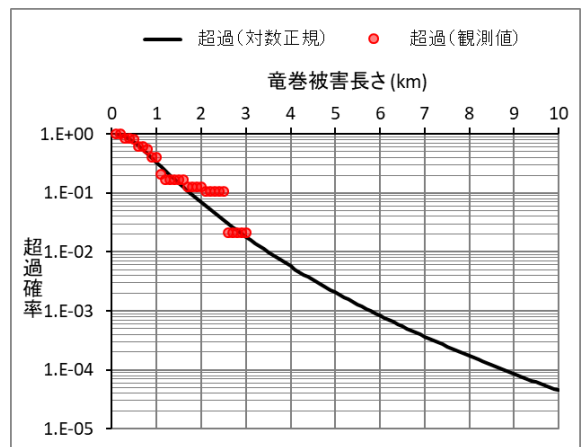
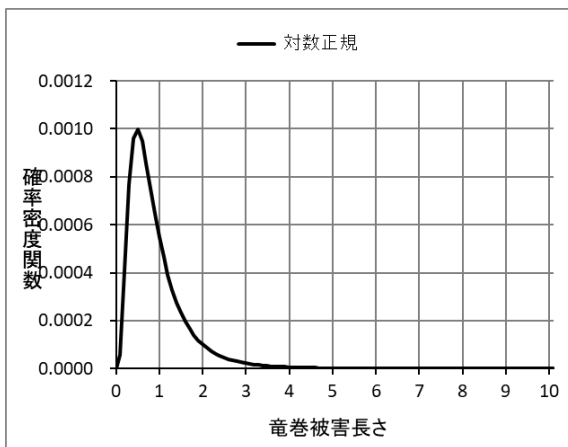
			計	竜巻スケール				
				F0	F1	F2	F3	F4
疑似 (53年間) (全竜巻)	発生数	期間内総数	95	57	32	6	0	0
		年平均(個)	1.79	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00
		標準偏差(個)	2.06	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00
	被害幅	期間内総数	95	57	32	6	0	0
		平均値(m)	102	50	207	33	0	0
		標準偏差(m)	123	19	166	3	0	0
	被害長	期間内総数	95	57	32	6	0	0
		平均値(m)	934	632	1,303	1,833	0	0
		標準偏差(m)	692	307	781	1,125	0	0



第3図 風速の確率密度分布（左）と超過確率（右）



第4図 被害幅の確率密度分布（左）と超過確率（右）



第5図 被害長さの確率密度分布（左）と超過確率（右）

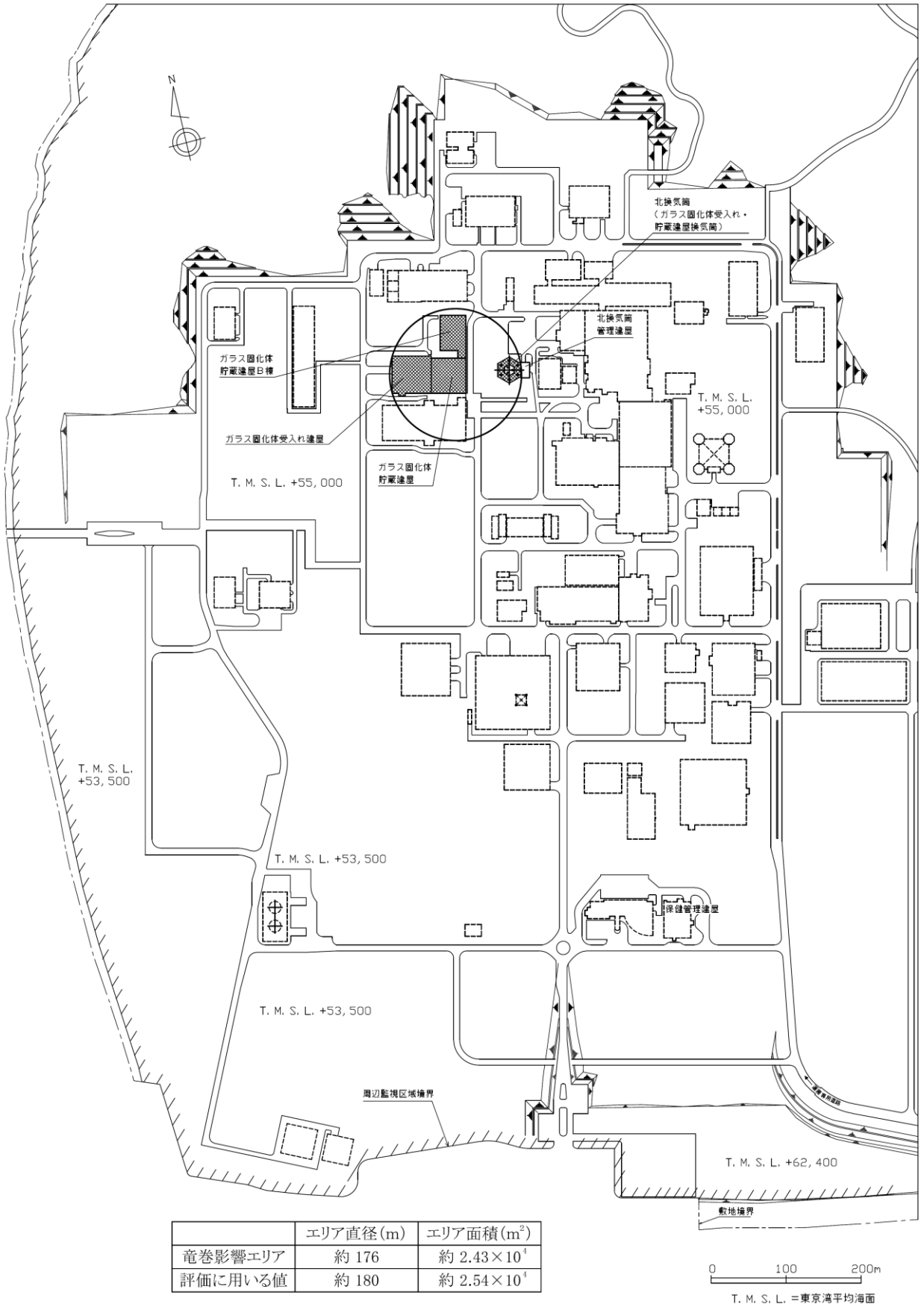
第 5 表 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数

相関係数（対数）	風速 (m/s)	被害幅 (m)	被害長さ (m)
風速 (m/s)	1.0000	0.0800	0.4646
被害幅 (m)	0.0800	1.0000	0.2418
被害長さ (m)	0.4646	0.2418	1.0000

5. 竜巻影響エリアの設定

廃棄物管理施設の設計対処施設を包含する円を設置面積とみなし、第6図に示すとおり竜巻影響エリアとして設定する。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。



第 6 図 竜巻影響エリア

6. ハザード曲線の算定方法

前記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び最大風速の確率分布をもとに、以下に示すとおり竜巻ガイドの解説 3. 3. 2 に例示された W e n & C h u 及び G a r s o n e t a l . の方法に沿って、ハザード曲線を算定する。

(1) 評価方法

D を評価対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、ある竜巻が評価対象構造物を襲い、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とする。また、ある竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とする。また、その期待値を $E[DA(V_0)]$ にて表す。

a. 前記に基づき、竜巻の最大風速 V 、被害幅 w 及び被害長さ l の統計値から、次式の 3 次元対数正規分布型の確率密度分布を与える。

$$f(V, w, l) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |\Sigma|^{1/2}} \frac{1}{Vwl} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right)$$

ここで、

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \ln(V) \\ \ln(w) \\ \ln(l) \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \mu_V \\ \mu_w \\ \mu_l \end{Bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} \\ \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_w^2 & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} \\ \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$$

である。

\mathbf{x} は最大風速、被害幅及び被害長さの対数値 $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ によるベクトル、 $\boldsymbol{\mu}$ は各統計値から評価した最大風速、被害幅及び被害長さの対数値の平均からなるベクトル、 Σ は $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ から評価した標準偏差 σ_V 、 σ_w 、 σ_l と相関係数 ρ_{Vw} 、 ρ_{wl} 、 ρ_{Vl} からな

る分散共分散行列である。

- b. 被災領域内には，竜巻の被害幅のうち風速が V_D を超える部分の幅を与える次式を考慮する。

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

ここで， V_{min} は，*G a l e i n t e n s i t y* と呼ばれ（*G a l e* は「非常に強い風」という意味），被害が発生し始める風速に位置付けられる。米国気象局 *N W S*（*N a t i o n a l W e a t h e r S e r v i c e*）では，34 ノット～47 ノット（ $17.5 \text{ m} / \text{ s} \sim 24.2 \text{ m} / \text{ s}$ ）とされ，また，気象庁が使用している風力階級では，風力 9 は大強風（*s t r o n g g a l e* : $20.8 \text{ m} / \text{ s} \sim 24.4 \text{ m} / \text{ s}$ ）と分類され，「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされていることを参考に， V_{min} を $25 \text{ m} / \text{ s}$ とした。なお，この値は *F 0*（ $17 \text{ m} / \text{ s} \sim 32 \text{ m} / \text{ s}$ ）のほぼ中央値に相当する。

- c. 得られた平均と分散共分散行列を基に，竜巻影響エリアの代表幅 D_0 を考慮し，次式にて，被災面積期待値 $E[D A(V_0)]$ を算定する。

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

ここで、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ は、それぞれ竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価の対象構造物を投影した時の長さである。

$$H(\alpha) = B|\sin \alpha| + A|\cos \alpha|$$

$$G(\alpha) = A|\sin \alpha| + B|\cos \alpha|$$

ここで、 α は竜巻の移動方向であり、 A と B は評価対象構造物（四角形）の寸法である。

一方、設計対処施設では、竜巻影響エリアを円形で設定しているため、 H 及び G ともに竜巻影響エリアの直径で一定（竜巻の移動方向に依存しない。）となる。

S は竜巻影響エリアの面積（約 $2.54 \times 10^4 \text{ m}^2$ ）を表わす。円の直径を D_0 とした場合は、以下の式にて表わされる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)lf(V,w,l)dVdwdl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty lf(V,l)dVdl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)f(V,w)dVdw + S \int_{V_0}^\infty f(V)dV
\end{aligned}$$

ここで、 $f(V, l)$ 、 $f(V, w)$ 、 $f(V)$ は、多変量の対数正規分布である $f(V, w, l)$ をもとに各成分を抽出した関数

である。

- d. 竜巻検討地域の面積 A_0 (約 $18,000 \text{ km}^2$) 及び上記の被災面積期待値 $E[DA(V_0)]$ から、評価対象構造物が竜巻による被害を受け、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率 $R(V_0)$ を次式にて算定する。

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

- e. 前述のとおり、竜巻の年発生数の確率密度分布としては、ポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は次式で示される。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k)$$

ここで、 N : 竜巻の年発生数

v : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β : 分布パラメータであり次式で示される。

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

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

である。

発生数がポリヤ分布に従うものとし、年超過確率 P_{V_0} を以下の式により算出する。なお、年超過確率 P_{V_0} は、年被災確率が十分小さいことより、Garson et al. が示す近似式を用いて表すことができる。

$$P_{V_0} = 1 - [1 + \beta v R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left[1 - \frac{1}{\beta} (\beta v R(V_0)) + \dots \right] \approx v R(V_0)$$

$$= \frac{v}{A_0} E[DA(V_0)] = p E[DA(V_0)]$$

ここで、P は単位面積当たりの年被災確率である。

以上のことから、竜巻のように被災確率が非常に小さな現象に対しては、年超過確率は竜巻発生数の平均値のみに依存し、発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。

(2) ハザード曲線

前項で示した評価方法に基づいて、竜巻影響評価の対象構造物が、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が V_0 以上となる確率 $P_{V_0,T}$ を次式によって算出し、ハザード曲線を算定する。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta}$$

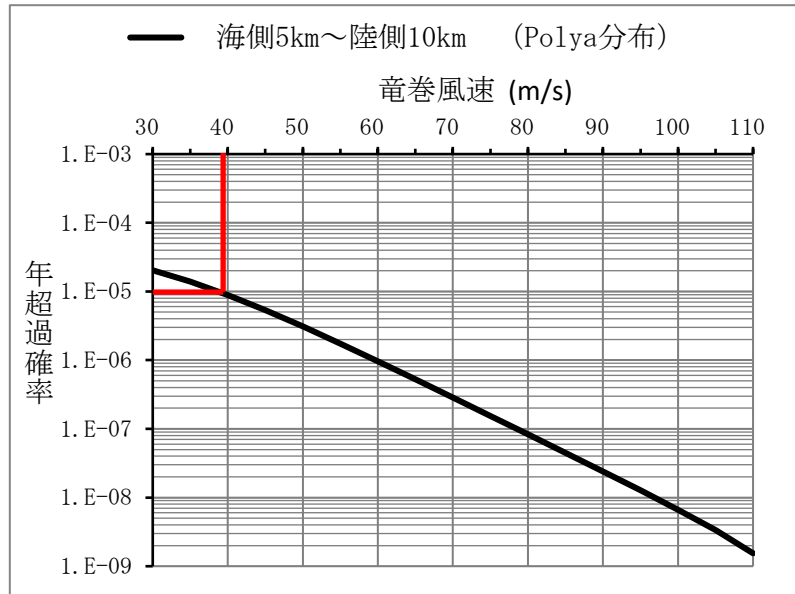
また、ハザード曲線の算定において、風速の積分範囲の上限値はハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定する。

7. 竜巻最大風速のハザード曲線

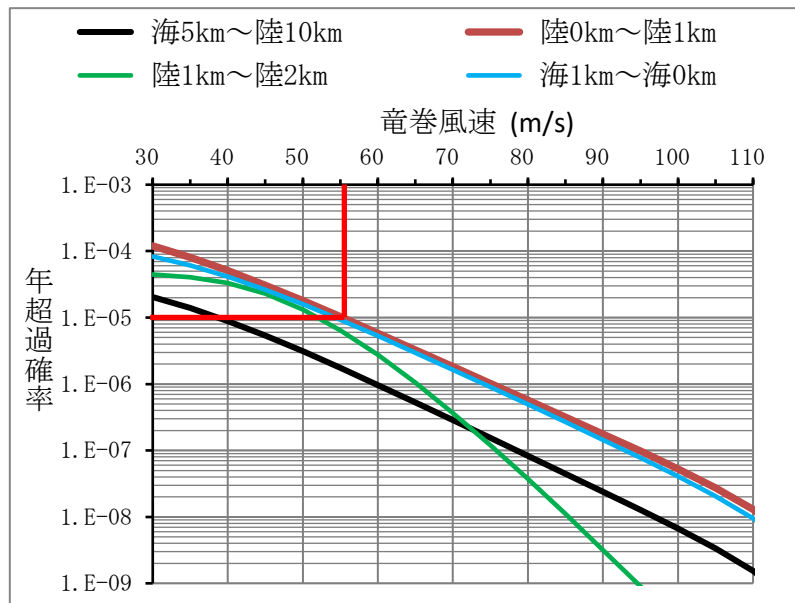
算定した竜巻最大風速のハザード曲線を、第7図に示す。

ハザード曲線により設定する最大風速 (V_{B2}) は竜巻ガイドを参考に、年超過確率 10^{-5} に相当する風速とし、 39m/s とする。

なお、竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに細分化した短冊状の範囲を対象にハザード曲線を求めた結果、陸側 0km から 1km までの 1km 幅領域における 56m/s が最大となるが、廃棄物管理施設は海岸線から陸側 1km の範囲にないため、本評価は参考とする。



(a) 竜巻最大風速のハザード曲線



(b) 竜巻最大風速のハザード曲線 (1 km 範囲) (参考)

第7図 竜巻検討地域でのハザード曲線

8. 参考資料

- (1) Yi-kwei Wen and Shin-Lung Chu. “Tornado Risks and Design Wind Speed” . Journal of the Structural Division, ASCE, 1973-12, Vol. 99, No. 12.
- (2) Robert C. Galson, C. Allin Cornell and Jose Morla Catalan. “Tornado Design Winds Based on Risk” . Journal of the Structural Division, ACSE, 1975-09, Vol. 101, No. 9.
- (3) Robert C. Galson, C. Allin Cornell and Jose Morla Catalan. “Tornado Risk Evaluation Using Wind Speed Profiles” . Journal of the Structural Division, ASCE, 1975-05, Vol. 101, No. 5.
- (4) 東京工芸大学. 平成 21～22 年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. 2011-02.

以上

令和元年 12 月 9 日 R0

補足説明資料 4 - 5 (8 条 竜巻)

海上の F スケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

53 年間の疑似データを推定する際に，海上で発生した F スケール不明竜巻（非上陸の海上竜巻）を，F スケールが判明している陸上竜巻（上陸竜巻を含む）の F スケールごとの発生比率で按分している。ここで，「沿岸部近傍での竜巻の発生特性は，陸上と海上とでは類似している」と仮定した。観測結果を基に，この仮定の妥当性について考察する。

以下では，陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）と海上で発生しその後上陸した竜巻（以下「上陸竜巻」という。），及び海上で発生し上陸しなかった竜巻（以下「海上竜巻」という。）を区別して考える。

表 1 及び図 1 は，陸上竜巻，上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して，「F 0＋不明」，F 1，「F 2 以上」の竜巻が占める割合を，過去 53 年間の竜巻データの分析から求めた。表 1 (a) 及び図 1 (a) は，全国の沿岸 15km 幅（海側 5km～陸側 10km）での分析結果である。陸上竜巻の場合，F スケール毎の割合はそれぞれ約 33，50 及び 17% であり，上陸竜巻との間に大きな差はない（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから，海上での F スケール不明竜巻の F スケールごとの発生割合は，上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないことは，海側と陸側の F スケールごとの発生割合が類似していること

を示唆している。したがって、海上での F スケール不明竜巻を、陸上竜巻（あるいは（陸上＋上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方、表 1 (b) 及び図 1 (b) は、竜巻検討地域における同様の分析結果であり、陸上竜巻と上陸竜巻の F スケールごとの割合には差があり、陸上竜巻では（F 0＋不明）竜巻の割合が大きい傾向にある。しかしながら、竜巻検討地域における（陸上＋上陸）竜巻の割合は全国の沿岸 15km 幅での割合とほぼ同じである。

したがって、海上の F スケール不明竜巻を（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、本竜巻検討地域のようにデータ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

以 上

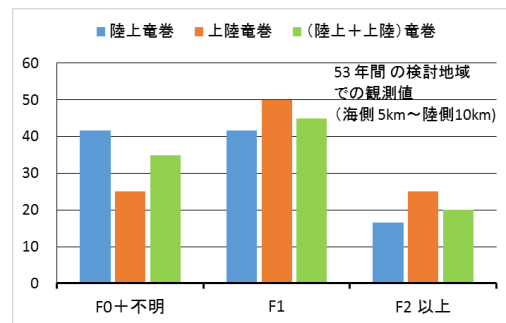
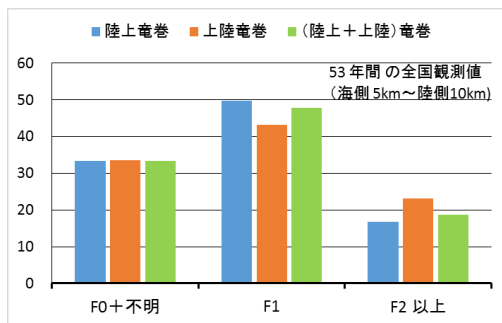
表 1 F スケール毎の竜巻発生数とその割合

(a) 全国沿岸 15 k m 幅 (海側 5 k m ~ 陸側 10 k m)

全国沿岸 53年間 (海5km~陸10km)	竜巻発生数の割合(%)			竜巻発生数(個)		
	F0+不明	F1	F2 以上	F0+不明	F1	F2 以上
陸上竜巻	33.3	49.8	16.8	95	142	48
上陸竜巻	33.6	43.2	23.2	42	54	29
(陸上+上陸)竜巻	33.4	47.8	18.8	137	196	77

(b) 竜巻検討地域の沿岸 15 k m 幅 (海側 5 k m ~ 陸側 10 k m)

検討地域 53年間 (海5km~陸10km)	竜巻発生数の割合(%)			竜巻発生数(個)		
	F0+不明	F1	F2 以上	F0+不明	F1	F2 以上
陸上竜巻	41.7	41.7	16.7	5	5	2
上陸竜巻	25.0	50.0	25.0	2	4	2
(陸上+上陸)竜巻	35.0	45.0	20.0	7	9	4



(a) 全国沿岸 15km 幅

(b) 竜巻検討地域の沿岸 15km 幅

図 1 F スケール毎の竜巻発生数の割合 (海側 5km ~ 陸側 10km)

令和元年 12 月 9 日 R0

補足説明資料 4 - 6 (8 条 竜巻)

竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）が
ハザード結果に及ぼす影響について

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

W e n & C h u⁽¹⁾は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となる確率の推定法を提案している。それによれば、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率密度分布はポアソン分布若しくはポリヤ分布に適合する。

$$\text{ポアソン分布： } P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (1)$$

$$\text{ポリヤ分布： } P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2)$$

ここで、Nは竜巻の年発生数、vは竜巻の年平均発生数、Tは年数である。また、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、V₀以上の竜巻風速に見舞われる確率 P_{v₀,T}(D)は次式で表される。

$$\text{ポアソン分布： } P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-vR(V_0)T] \quad (3)$$

$$\text{ポリヤ分布： } P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (4)$$

ここで、R(V₀)は、評価対象とする構造物が、ある一つ

の竜巻に遭遇し，竜巻風速が V_0 以上となる確率である。

2. ポアソン分布とポリヤ分布

ポアソン過程とは，ある現象がランダムに起こる場合に，今までの発生状況がそれ以降の発生に影響を与えず，かつ発生が時間的に一様に推移する現象を表す数学的モデルであり，以下のような仮定に基づいている。

- ① 事象は時間・空間のいかなる場所でもランダムに発生する。
- ② 与えられた時間・空間の区間内で，事象の発生は他の任意の区間に対して独立である。
- ③ 微小区間 Δt における事象発生確率は Δt に比例する。
 Δt の間に事象が 2 回以上発生する確率は無視できる。

ポアソン分布に従う現象例としては，交通事故件数，大量生産の不良品数，火災件数及び遺伝子の突然変異など数多くある。ポアソン分布の分散は平均値に等しいが，観測される現象の中には，その分散が平均値から外れている現象もある。

ポリヤ分布は，分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く， β が大きい場合は分散の大きな分布形を表し， $\beta \rightarrow 0$ のときにはポアソン分布に近づく。「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究⁽²⁾」成果では，陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び海上竜巻のいずれに対しても，ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

ポリヤ分布は、疫病の流行、ある単語を含む文書数を数える文書頻度などの言語処理などに活用されており、ある事象が起こった場合に、それによって周囲にも現象が起こりやすくなる現象（弱い伝播性）が考慮されている。竜巻の場合では、前線や台風により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する状況が考えられる。

3. 確率論から見た近似式

1. にて示した（3）及び（4）式に基づき、ポアソン分布とポリヤ分布に基づく竜巻ハザードを実際に計算すると、両者にほとんど違いが見られない。以下では、その理由について考察する。

ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となるような被害を受ける確率を $R(V_0)$ とすると、このような竜巻被害を受けない確率は次式で表される。

$$(\text{被害を受けない確率}) = 1 - R(V_0) \quad (5)$$

同様に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれの竜巻に対しても被害を受けない確率は、独立性を仮定し次式で表される。

$$(N\text{個の竜巻で被害を受けない確率}) = [1 - R(V_0)]^N \quad (6)$$

逆に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれかの竜巻によ

り被害（最低 1 回，最大 N 回）を受ける確率は次式となる。

$$\begin{aligned} & (\text{N 個のいずれかの竜巻で被害を受ける確率}) = \\ & 1 - [1 - R(V_0)]^N \end{aligned} \quad (7)$$

したがって，1 年間に N 個の竜巻が発生する確率を $P(N)$ とすると，これによる被害確率は，

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\}P(N) \quad (8)$$

となる。 $R(V_0)$ が十分小さければ，上式は次のように近似できる。

$$\{1 - [1 - R(V_0)]^N\}P(N) \approx R(V_0) \times N \times P(N) \quad (9)$$

ここで，次の近似を用いている。

$$[1 - R(V_0)]^N \approx 1 - N \times R(V_0) \quad (10)$$

竜巻被害の場合は通常 10^{-3} 以下であるから，式の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから，式より 1 年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \sum_{N=1}^{\infty} [R(V_0) \times N \times P(N)] = R(V_0) \sum_{N=1}^{\infty} [N \times P(N)] = vR(V_0) \quad (11)$$

すなわち，被害確率は竜巻発生数の平均値のみに依存し，標準偏差はもちろん，確率分布にも無関係であり，ポリヤ分布とポアソン分布によるハザードの結果は一致することが理解できる。

4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

3. では，確率論的な観点だけで近似式を誘導したが，ここでは，(3) 及び (4) の近似式を直接求め，上記の結果を検証する。

式 (8) の $P(N)$ としてポアソン分布を仮定し，

$$\begin{aligned} \{1 - [1 - R(V_0)]^N\}P(N) &= P(N) - [1 - R(V_0)]^N P(N) \\ &= P(N) - [1 - R(V_0)]^N \frac{v^N}{N!} \exp(-v) \\ &= P(N) - \frac{(v - vR(V_0))^N}{N!} \exp(-v) \end{aligned} \quad (12)$$

となることを考慮すると，(11) 式の厳密な式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
P_{V_0}(D) &= \sum_{N=1}^{\infty} \left\{ P(N) - \frac{(v - vR(V_0))^N}{N!} \exp(-v) \right\} \\
&= 1 - \exp(v - vR(V_0)) \exp(-v) = 1 - \exp(-vR(V_0))
\end{aligned} \tag{13}$$

すなわち，ポアソン分布によるハザード評価の（3）式が導かれる。ここで，次の関係式を用いている。

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \tag{14}$$

したがって，式（3）又は式（13）は，式（14）を用いると，

$$\begin{aligned}
P_{V_0}(D) &= 1 - \exp(-vR(V_0)) \\
&= 1 - \left(1 + \frac{(-vR(V_0))}{1!} + \frac{(-vR(V_0))^2}{2!} + \dots \right)
\end{aligned} \tag{15}$$

と表され， $R(V_0)$ が小さい場合は，次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx vR(V_0) \tag{16}$$

ポリヤ分布の場合も同様に，一般の二項定理を用いると，次式で近似できる。

$$P_{v_0}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta}\right) \beta v R(V_0) + \dots\right) \quad (17)$$

$$\approx v R(V_0)$$

以上のことから，竜巻のように1つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては，年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し，発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。

< 参考文献 >

- (1) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (2) 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, 独立行政法人原子力安全基盤機構

以 上

令和 2 年 6 月 19 日 R3

補足説明資料 5 - 1 (8 条 竜巻)

評価対象施設等の設計荷重について

設計対応施設の評価に用いる評価荷重について第1表に整理する。

第1表 設計対処施設の評価に用いる評価荷重一覧表

設計対処施設		設計竜巻荷重						
		W _w , W _p , W _m の選定※1				複合荷重の設定※2		
		設置場所	W _w	W _p	W _m	W _{T1}	W _{T2}	
				W _w	0.5W _p	W _m		
竜巻防護対象施設を収納する建物	・ ガラス固化体貯蔵建屋	屋外	○	○	○	○	○	○
	・ ガラス固化体貯蔵建屋B棟	屋外	○	○	○	○	○	○
竜巻防護対象施設に波及し得る施設	・ 北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）	屋外	○	×	○	○	○	○
	・ ガラス固化体受入れ建屋	屋外	○	○	○	○	○	○
建屋内の施設で外気と繋がる竜巻防護対象施設	・ ガラス固化体貯蔵設備の収納管	屋内	-	○	-	○	-	-

※1：表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。○：考慮する ×：考慮しない

※2：複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。○：実施ケース -：該当しないケース

以上

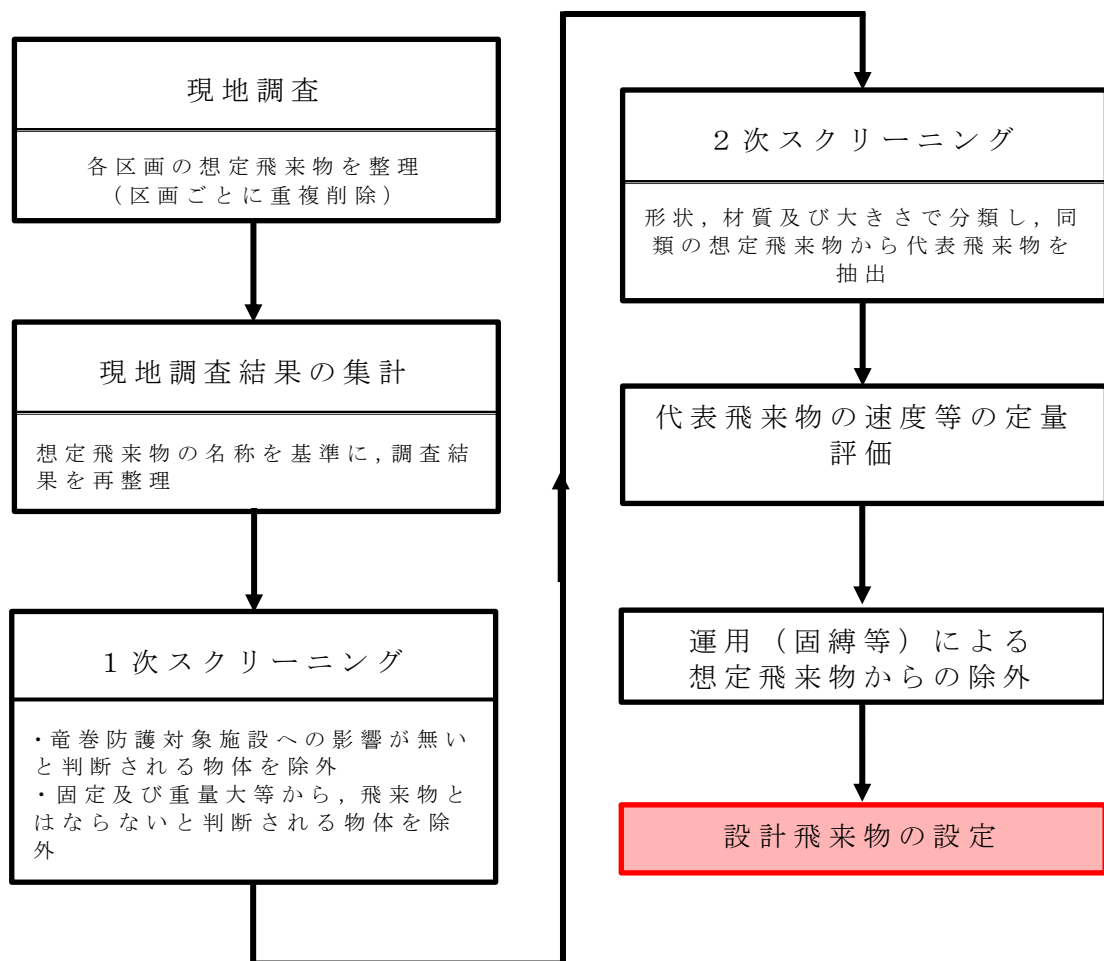
令和 2 年 6 月 19 日 R4

補足説明資料 5 - 2 (8 条 竜巻)

設計飛来物の設定

1. はじめに

設計飛来物の設定にあたっては、再処理事業所において、飛来物となる可能性のある対象物（以下「想定飛来物」という。）を現地調査し、これらの中から竜巻影響評価に用いる代表的な飛来物（以下「代表飛来物」という。）について定量評価を行った上で、設計飛来物の設定を行った。第1図に設計飛来物の設定フローを示す。



第1図 設計飛来物の設定フロー

第1表 現地調査結果の集計

1	仮設足場	26	仮設トイレ	51	航空障害灯	76	コンクリート ミキサ車
2	足場板	27	カラーコーン	52	高所作業車	77	コンテナ
3	足場階段	28	ガラス扉	53	鋼製足場	78	コンテナ (バンボディ)
4	LPガス 容器置場	29	仮囲い用 鉄板	54	鋼製階段	79	コンプレッサ
5	アスファルト 残材	30	換気口	55	鋼製カゴ	80	柵 (単管 パイプ)
6	アルミ製 ステップ	31	監視用電柱	56	鋼製架台	81	産廃コンテナ (鋼製)
7	アルミ製 はしご	32	看板	57	鋼製架台 (フレーム)	82	産廃ボックス (カゴ)
8	アルミ製蓋	33	看板 (合成樹脂 製)	58	鋼製材	83	室外機
9	アルミ フェンス	34	危険物倉庫	59	鋼製残材	84	室外機囲い
10	アンテナ	35	気象海象観測 ブイ	60	鋼製スリーブ	85	自動販売機
11	石	36	気象海象観測 ブイ架台	61	鋼製スロープ	86	しゃへいプロ ック用型枠
12	移動式タンク	37	気象海象観測 ブイ部品	62	鋼製朝礼台	87	砂利
13	埋込金物	38	救急車	63	鋼製箱	88	重機 (パワー ショベル)
14	液化酸素 タンク	39	給水車	64	鋼製バリケード	89	重機 (ホイール ローダ)
15	液化窒素 タンク	40	給油口	65	鋼製蓋	90	重機 (クローラ キャリア)
16	塩ビパイプ	41	重機 (杭打機)	66	鋼製フレーム	91	重機 (クローラ クレーン)
17	大型バス	42	クランプ	67	構台	92	重機用 バケット
18	覆工板	43	乗用車	68	鋼矢板 (廃材)	93	合成樹脂製 資材
19	ガードレール	44	グレーチング	69	コンクリート U字溝	94	合成樹脂製 タンク
20	ガードレール ポスト	45	重機 (ラフター クレーン)	70	コンクリート 残材	95	合成樹脂製 パレット
21	カーブミラー	46	軽トラック	71	コンクリート 試験体	96	合成樹脂製 蓋
22	加工台	47	ケーブル	72	コンクリート 製蓋	97	合成樹脂製 水タンク
23	ガスボンベ	48	木製ケーブル ドラム	73	コンクリート 製ポール	98	消火器
24	仮設小屋	49	鋼管	74	コンクリート 棒	99	消火器格納箱
25	仮設タンク	50	航空識別灯 管制器	75	コンクリート ポンプ車	100	消火栓

第 1 表 現地調査結果の集計（つづき）

101	昇降機カゴ	126	貯湯槽	151	バリケード部品 (合成樹脂製)	176	木製パレット
102	消防自動車	127	ディーゼル ポンプ	152	反射鏡	177	木製蓋
103	照明	128	鉄筋	153	ヒートポンプ チラ	178	モルタル ブロック
104	照明器具	129	形鋼	154	百葉箱	179	融雪制御盤
105	照明塔	130	鉄板	155	標識	180	ハンド パレット
106	水槽	131	電光掲示板	156	フェンス	181	リヤカ
107	制御盤	132	電信柱	157	フォークリフト	182	冷却器
108	設備機器	133	テント	158	合成樹脂製箱	183	レーダ
109	設備小屋	134	電話ボックス	159	合成樹脂製 バリケード	184	ワイヤ
110	側溝グレーチン グ	135	投光器	160	プレハブ小屋	185	ワイヤ メッシュ
111	側溝コンクリー ト製蓋	136	道路緩衝材	161	プレハブ倉庫	186	散水車
112	台車	137	土のう	162	分電盤	187	避雷針
113	タイヤ	138	トラック	163	木製板		
114	担架格納箱	139	トラック (ユニック)	164	ベンチ		
115	単管ごみ 置き場	140	ドラム缶	165	防雪フェンス		
116	単管製小屋	141	泥落とし機	166	ホース		
117	単管手摺	142	ネコ車	167	ホース格納箱		
118	鉄鋼パイプ	143	燃料タンク	168	ポンプ		
119	単管バリケード	144	配管	169	マンホール蓋		
120	脚立	145	配管用部品	170	水タンク		
121	タンク	146	配電盤	171	木・合成樹脂 廃材		
122	タンクローリ	147	バケツ	172	木製角材		
123	端子盤	148	発電機	173	木製朝礼台		
124	ダンプトラック	149	鋼製ハッチ	174	木製廃材		
125	貯水タンク	150	パラボナ アンテナ	175	木製箱		

2. 1次スクリーニング

1次スクリーニングでは、現地調査の集計結果のうち、想定飛来物が以下に示す条件を満たすものを設計飛来物の選定から除外する。

- ・強固に固定されている想定飛来物
- ・体積に対する重量が非常に大きく、設計飛来物とはならないと判断される想定飛来物
- ・強度及び剛性が低く、竜巻防護対象施設に与える影響が小さいと判断される想定飛来物

1次スクリーニングにおいて除外される想定飛来物を、第2表に示す。

第2表 設計飛来物から除外する想定飛来物

強固に固定されているため、あるいは、体積に対する重量が非常に大きい ため、設計飛来物とはならないと判断 されるもの		強度及び剛性が低く、竜巻防護対象施設に影響を 及ぼさないと判断されるもの		
				
構台	水槽	木・合成樹脂廃材	木製板	カラーコーン
				
貯湯槽	ヒートポンプ チラ	タイヤ	塩ビパイプ	木製朝礼台
				
換気口	室外機（業務用大型）	ベンチ	プレハブ小屋	ケーブル
				
ポンプ	重機（クローラ クレーン）	木製パレット	木製ケーブル ドラム	プレハブ倉庫
				
電話ボックス	危険物倉庫	ホース	木製蓋	合成樹脂製資材
				
設備機器	冷却器	標識（合成樹脂製）	ワイヤ	看板（合成樹脂製）

第2表 設計飛来物から除外する想定飛来物（つづき）

強固に固定されているため、あるいは、体積に対する重量が非常に大きいため、設計飛来物とはならないと判断されるもの		強度及び剛性が低く、竜巻防護対象施設に影響を及ぼさないと判断されるもの		
				
液化酸素タンク	電信柱	合成樹脂製タンク	テント	バリケード部品 (合成樹脂製)
				
重機（杭打機）	液化窒素タンク	看板（木製）	百葉箱	水タンク
				
コンプレッサ	監視用電柱	木製角材	パラボナアンテナ	土のう
				
制御盤	貯水タンク	仮設トイレ	アルミフェンス	フェンス
				
コンクリート製蓋 (固定されたもの)	照明塔	木製廃材	ガラス扉	合成樹脂製 パレット
				
端子盤	重機 (パワーショベル)	ワイヤメッシュ	木製箱	合成樹脂製蓋

■については核不拡散の観点から公開できません。

第2表 設計飛来物から除外する想定飛来物（つづき）

強固に固定されているため、あるいは、体積に対する重量が非常に大きいため、設計飛来物とはならないと判断されるもの		強度及び剛性が低く、竜巻防護対象施設に影響を及ぼさないと判断されるもの		
				
給油口	コンクリート試験体	仮設小屋	道路緩衝材	
				
避雷針	融雪制御盤			
				
配管	鋼製ハッチ			

注) 本表の写真は代表例を示す。

3. 2次スクリーニング

2次スクリーニングでは，1次スクリーニングで除外の対象とならなかった想定飛来物を対象に，飛来物の定量評価に資するためのスクリーニングを実施する。

2次スクリーニングの実施方針，手順を以下に示す。

- ・ 想定飛来物を棒状，板状及び塊状の3つの形状に分類する。
- ・ さらに，面積や重量などの観点から同類と見做せるものに分類し，代表飛来物を抽出する。その際，竜巻影響評価ガイドに例示された飛来物も代表飛来物とすることを考慮する。
- ・ 分類された想定飛来物から，定量評価に用いる代表飛来物を抽出する。抽出は，主として外形寸法に着目して実施する。いずれの分類にも属しない想定飛来物は，そのまま代表飛来物として選定とする。

第3表に棒状，板状及び塊状に分類した想定飛来物の代表を，それぞれ示す。各形状で代表とする想定飛来物は以下である。

棒状：鋼製パイプ／形鋼／角形鋼管／鋼管

板状：マンホール蓋／敷き鉄板／覆工板
























塊状：コンクリートU字溝／自動販売機／室外機／

コンテナ／産廃コンテナ／発電機／気象海象観測ブイ

第3表 2次スクリーニング結果まとめ

代表飛来物	棒状		板状	塊状	
複数の想定飛来物の代表として抽出した飛来物					
	角形鋼管	形鋼	敷き鉄板	室外機	自動販売機
					
	角形鋼管	鋼鉄パイプ	覆工板	発電機	コンテナ
					
コンクリート U字溝		マンホール蓋	気象海象観測ブイ	産廃コンテナ	

第3表 2次スクリーニング結果まとめ (つづき)

代表飛来物	棒状	板状	塊状		
単 独 で 代 表 と し て 選 定 し た 飛 来 物					
	コンクリート製 ポール	鋼製架台	乗用車	フォークリフト	高所作業車
					
	コンクリート棒	コンクリート製 蓋	トラック	クローラキャリア	コンクリート ポンプ車
					
	ガスポンベ	側溝コンクリート 製蓋	ホイールローダ	消防自動車	コンクリート ミキサ車
					
	鉄筋		ラフタークレーン	タンクローリ	ダンプトラック
					
			大型バス	散水車	ドラム缶
					
		砂利			

4. 代表飛来物の定量評価

4. 1 評価方法

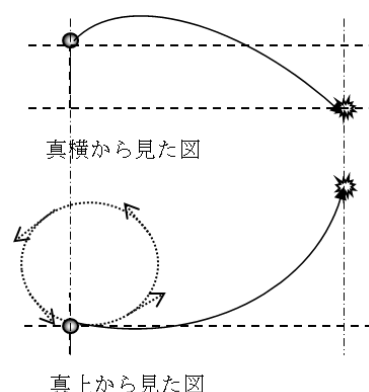
代表的な飛来物の速度，飛散距離および飛散高さは，竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を計算することで評価する。仮定する風速場は，鉛直方向には構造が変化しないランキン渦とする。その風速場の中で，質点系にモデル化した飛来物は，相対速度の2乗に比例した抗力を受けるものとする。この時，飛来物の運動は次式にて表される。

$$m\ddot{x}(t) = \frac{1}{2}\rho C_D A \left(V(x(t)) - \dot{x}(t) \right) |V(x(t)) - \dot{x}(t)| - mgJ$$

ここで、飛来物の質量を m ，代表面積を A ，抗力係数を C_D ，時刻 t での飛来物の位置を $x(t)$ ，速度を $\dot{x}(t)$ ，加速度を $\ddot{x}(t)$ ，時刻 t での飛来物位置での風速を $V(x(t))$ ，空気密度を ρ ，重力を g ，重力方向成分のみ 1 のベクトルを J とする。

なお，抗力係数 C_D は，3方向の面積で重みづけした平均とする。

具体的な飛散距離および飛散高さの評価においては，上式を離散化することで計算を行う。



第2図 飛来物の軌跡評価のイメージ

4. 2 評価条件

竜巻の最大風速，移動速度，旋回風速，最大半径（ R_m とする）及び空気密度は，第4表のとおりとする。

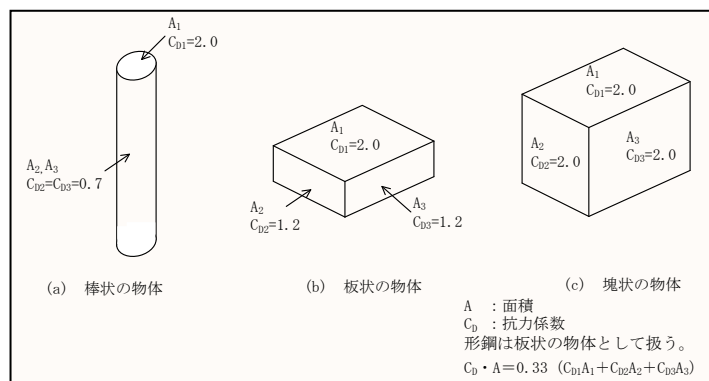
飛来物の初期位置は，水平方向には竜巻の中心より $2R_m$ の円の内部領域に，半径について $0.1R_m$ ごと，角度方向について5度ごとの位置にばら撒かれているものとする。鉛直方向には高さ40mの位置にあるものとする。初速は 0 m/s とする。

飛来物が高さ0mの位置に到達するまでの間の最大速度，最大高さ及び最大飛距離を算定する。

抗力係数は既往文献⁽¹⁾に基づいて，第3図のとおりとする。

第4表 飛来物評価時の竜巻諸元

最大風速（ m/s ）	100
移動速度（ m/s ）	15
旋回風速（ m/s ）	85
最大半径（ m ）	30
空気密度（ kg/m^3 ）	1.22



第3図 抗力係数

4. 3 評価結果

3項で選定した代表飛来物を対象に、竜巻速度が100m/sにおける飛来物の諸元を定量評価した結果を第5表に示す。

第5表 代表飛来物の諸元算定結果

代表飛来物	サイズ			質量 [kg]	空カバ ラメー タ	速度 [m/ s]	運動エネ ルギ [kJ]	備考
	幅 [m]	奥行 [m]	高さ [m]					
棒状 コンクリート製 ボール	4	4	16	1400	0.0022	38.610	1043.512	浮上・飛来解析の結果、 浮き上がらない。
コンクリート製 ボール	0.35	0.35	12	930	0.00218	38.475	688.351	浮上・飛来解析の結果、 浮き上がらない。
角形鋼管 (□-300×300)	0.30	0.30	6.1	492	0.0031	41.390	421.430	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
鉄筋 (D13)	0.013	0.013	12	11.9	0.00613	48.180	13.812	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
鉄筋 (D38)	0.038	0.038	12	107	0.002	37.647	75.825	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
形鋼 (H-300×300)	0.30	0.30	4.0	372	0.00275	40.460	304.484	浮上・飛来解析の結果、 浮き上がらない。
形鋼 (H-200×200)	0.20	0.20	5.0	250	0.00331	42.079	221.330	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
形鋼 (H-200×150)	0.15	0.19	6.0	179	0.00467	45.374	184.263	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
形鋼 (H-175×175)	0.18	0.18	5.0	202	0.00368	43.024	186.958	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
鋼管 (250φ)	0.27	0.27	6.0	254	0.00313	41.505	218.778	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
鋼管 (200φ)	0.22	0.22	6.0	181	0.00355	42.707	165.062	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
鋼製材	0.20	0.30	4.2	135	0.00652	51	175.568	設計飛来物とする。
角形鋼管 (□-100×100)	0.10	0.10	4.0	96.4	0.00339	42.280	86.162	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
棒状 コンクリート棒	0.16	0.16	2.0	123	0.00223	38.747	92.332	浮上・飛来解析の結果、 浮き上がらない。
鉄筋 (D38)	0.038	0.038	6.0	53.7	0.002	37.647	38.054	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
形鋼 (H-400×200)	0.20	0.40	1.7	111	0.00416	44.252	108.682	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
鋼管 (100φ)	0.11	0.11	5.0	61.0	0.00432	44.601	60.672	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
鉄筋 (D13)	0.013	0.013	6.0	5.97	0.00612	48.165	6.925	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
ガスボンベ	0.23	0.23	1.5	57.0	0.00332	42.105	50.526	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
鋼製パイプ	0.049	0.049	6.0	16.4	0.00145	51.826	22.025	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
鋼製パイプ	0.050	0.050	2.0	8.40	0.00572	49	10.085	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
棒状 コンクリート U字溝	0.40	0.45	2.0	290	0.00276	40.487	237.684	浮上・飛来解析の結果、 浮き上がらない。
板状 鋼板 (敷鉄板) 大	0.022	1.5	6.1	1600	0.00386	43.401	1506.917	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
鋼板 (敷鉄板) 小	0.022	1.5	3.0	802	0.0038	43.281	751.171	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
鋼製架台	0.20	2.6	2.8	1640	0.00323	41.854	1436.441	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
覆工板	0.19	1.0	3.0	640	0.0036	42.835	587.148	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
棒状 コンクリート板	0.15	1.0	1.5	540	0.00213	30	243.000	浮上・飛来解析の結果、 浮き上がらない。
覆工板	0.19	1.0	2.0	430	0.00364	42.931	396.260	飛散対策により、飛来物 にならないようにする。
マンホール蓋 (大)	0.060	0.98	0.98	88.0	0.00625	48.420	103.158	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
棒状 コンクリート製 蓋	0.10	0.50	0.80	96.0	0.00332	42.105	85.096	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
側溝コンクリート 製蓋	0.060	0.40	1.0	57.6	0.00522	46.551	62.409	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。
マンホール蓋 (小)	0.050	0.65	0.65	33.5	0.00738	50.395	42.539	浮き上がるが設計飛来物 による防護で対策可能。

第5表 代表飛来物の諸元算定結果（つづき）

代表飛来物	サイズ			質量 [kg]	空力パラメータ	速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ]	備考
	幅 [m]	奥行 [m]	高さ [m]					
空調室外機	0.25	0.30	0.80	10.0	0.03434	69.881	24.417	浮上による設計飛来物 が防護で対策可能。
ラフター クレーン（1）	2.6	3.5	11	26500	0.00192	36.622	17770.514	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
ラフター クレーン（2）	2.6	3.5	11	31900	0.0016	31.404	15730.069	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
消防自動車	2.5	3.4	9.5	16200	0.00266	40.185	13080.157	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
大型バス	2.5	3.8	12	12100	0.00469	45.420	12481.007	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
コンクリート ミキサ車	2.5	3.7	7.9	10200	0.00381	43.302	9562.822	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
ダンプトラック	2.5	3.3	7.7	10500	0.00336	42.207	9352.512	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
コンクリート ポンプ車	2.2	3.0	7.5	9170	0.00332	42.105	8128.430	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
タンクローリ	2.5	3.0	9.2	8660	0.00448	44.918	8736.324	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
高所作業車	2.2	3.6	7.4	7870	0.00431	44.580	7820.326	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
クローラキャリア	2.5	2.9	5.7	11500	0.00221	38.663	8595.259	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
発電機（大）	1.4	2.1	4.2	6060	0.00195	37.107	4172.096	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
ホイールローダ	2.3	3.0	6.2	7270	0.00365	42.955	6707.055	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
トラック	1.3	1.9	5.0	4750	0.0026	34	2745.500	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
フォークリフト	1.3	2.1	3.8	4350	0.0024	39.164	3336.056	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
フォークリフト	1.1	2.1	3.6	3600	0.00257	39.817	2853.708	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
トラック	2.2	2.5	8.5	3790	0.001	51.268	4980.833	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
気象海象観測 ブイ	2.5	2.5	8.0	4000	0.00479	50.562	5113.032	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
散水車	2.2	2.3	5.7	3420	0.00599	47.966	3934.261	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
コンテナ	2.4	2.6	6.0	2300	0.01051	60	4140.000	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
乗用車 ワゴン2	1.9	2.3	5.2	1890	0.00925	53.003	2654.806	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
発電機（中）	1.0	1.6	2.1	1640	0.00287	40.765	1362.664	浮上・飛来解析の結果、 浮上がらない。
乗用車 ワゴン1	1.5	1.8	4.8	1510	0.00819	51.510	2003.226	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
乗用車	1.3	1.6	3.1	1430	0.00517	46.430	1541.358	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
乗用車 普通	1.5	1.7	4.4	1140	0.00973	53.636	1639.788	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
発電機（小）	0.65	1.2	1.5	670	0.00354	42.680	610.230	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
乗用車 軽自動車1	1.5	1.6	3.4	840	0.01027	54.291	1237.955	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
コンテナ	2.3	2.4	3.7	1100	0.01389	58.083	1855.499	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
乗用車 軽自動車2	1.5	1.5	3.4	710	0.0117	55.782	1104.629	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
自動販売機（大）	0.74	1.4	1.8	365	0.00893	52.509	503.188	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
室外機 （オフィス用）	0.32	0.94	1.4	140	0.00984	53.770	202.385	浮上による設計飛来物 が防護で対策可能。
産廃コンテナ	1.1	1.9	1.9	260	0.01998	62.803	512.748	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
ドラム缶（軽油 200L入り）	0.59	0.59	0.89	188	0.0047	45.443	194.116	飛散対策により、飛来物 とならないようにする。
ドラム缶	0.60	0.60	0.90	24.0	0.03786	71.119	60.695	浮上による設計飛来物 が防護で対策可能。
砂利	0.040	0.040	0.040	0.18	0.01778	61.188	0.337	詳細は十分小さい。

塊状

5. 運用による想定飛来物からの除外

4項での評価結果から、運動エネルギー及び貫通限界厚さが鋼製材より大きな資機材については、固定、固縛、建屋収納又は敷地からの撤去を行うこととし、飛来物から除外する。(補足説明資料 8-4 参照。) また、竜巻の影響により分解された状態で飛来するものについては、鋼製材の評価に包絡されると考えられる。(補足説明資料 5-4 参照。)

車両については、竜巻の襲来が予想される場合に飛来物とならないよう固縛又は飛来対策区域外の退避場所へ退避することとし、飛来物から除外する。(補足説明資料 8-1～8-4 参照。)

6. 設計飛来物の設定

運動エネルギー及び貫通限界厚さが鋼製材よりも大きなものは5項のとおり飛来物としないことから、残りのもののうち、最も運動エネルギー及び貫通限界厚さが大きな鋼製材を設計飛来物として設定した。第6表に設計飛来物を示す。

第6表 設計飛来物

飛来物の種類	鋼製材
寸法 (m)	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m / s)	51
最大鉛直速度 (m / s)	34

設計飛来物による衝撃荷重は、設計飛来物の形状、剛性等の機械的特性に基づいて適切に設定する。

<参考文献>

- (1) 【JNES】東京工芸大学：竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度），平成23年2月

以上

令和 2 年 4 月 17 日 R2

補足説明資料 5 - 3 (8 条 竜巻)

敷地外からの飛来物の考慮について

1. はじめに

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの要求事項を踏まえ、再処理事業所の近隣に設置されている風力発電施設のブレードが設計竜巻によって飛来した場合を想定し、設計対処施設への到達の可能性の有無を確認した。

<原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの要求事項>

4. 3. 1 設計竜巻荷重の設定

解説 4. 3. 1. 3. 2 基本的な考え方

・・・(略)・・・

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の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。

2. 風力発電施設の概要

第1表 風力発電施設の概要

発電所名称	むつ小川原 ウィンドファーム
定格出力	1500 kW/ ⁽¹⁾ 基
ローター直径	64 ⁽¹⁾ m
ハブまでの高さ	68 ⁽¹⁾ m
設計対処施設 までの最短距離	約 1300m

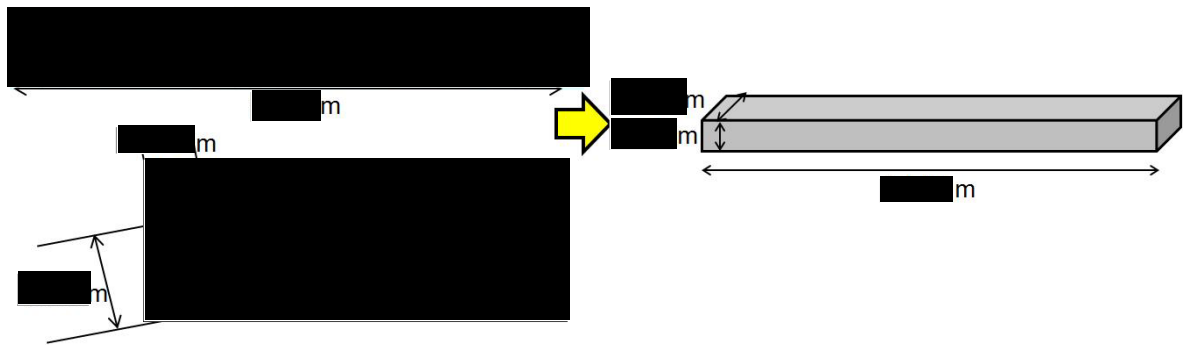
(1) むつ小川原ウィンドファームHPより



第1図 風力発電設備の寸法

3. 設計竜巻による飛来距離の評価

ブレードのサイズ及び重量の情報を用いて、設計竜巻（ランキン渦モデル，最大風速 100m/s ）による物体の浮上・飛来解析コード（TONBOS）による最大飛来距離の算出を行った。



第2図 風力発電機のブレード寸法

第2表 ブレードサイズ及び最大飛来距離

長さ	m
高さ	m
幅	m
重量	k g
最大飛来距離	約 m

風力発電施設から設計対処施設までの最短距離は、ブレードの最大飛来距離に比べて十分余裕があり、ブレードが設計対処施設へ到達することは考えられない。

■については商業機密の観点から公開できません。

4. まとめ

- ・ 再処理事業所外から飛来するおそれがあり，かつ，再処理事業所内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定されるものとして，むつ小川原ウィンドファームの風力発電施設のブレードがある。
- ・ むつ小川原ウィンドファームの風力発電施設から設計対処施設までの距離及び設計竜巻によるブレードの飛来距離を考慮すると，ブレードが設計対処施設まで到達するおそれはないことから，ブレードは設計飛来物として考慮しない。

以 上

令和 2 年 4 月 17 日 R3

補足説明資料 5 - 4 (8 条 竜巻)

設計飛来物の設定における1次スクリーニングについて

設計飛来物の設定において、1次スクリーニングでは、以下に示す条件を満たすものを設計飛来物の選定から除外する。

- ・竜巻防護対象施設への影響が無いと判断される物体
- ・固定、重量大等から、飛来物とはならないと判断される物体

このうち、「竜巻防護対象施設への影響がないと判断される物体」は、過去の主な竜巻の被害概要の調査結果等から、このような物品の状況について検討を行った結果より判断した。

以下に、平成2年以降の主な竜巻による被害概要の調査結果等に基づく検討結果を示す。

(1) 分解され小型軽量となる物品（屋外屋根及びガラス窓）

竜巻の被害概要調査結果において、分解され小型軽量となる物品として屋外屋根及びガラス窓が確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. 屋外屋根

第1図～第5図に屋外屋根の被害状況を示す。これらより、屋外屋根については、F0～F3の竜巻において、形を保ったままではなく、分解された状態で飛来していることが分かる。また、厚みが薄いことから形状が変形しており柔飛来物と見なせると考えられることから、衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については、設計飛来物である鋼製材の評価に包絡されると考えられる。



第1図 平成16年6月27日佐賀県で発生した
F2竜巻による屋外屋根の被害状況⁽¹⁾



屋外トイレ屋根の損傷



カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷



カーポート屋根の損傷

第2図 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生した

F2竜巻による屋外屋根の被害状況⁽²⁾



折板の損傷



カーポートの被害

第3図 平成21年10月8日茨城県土浦市で発生した
F1竜巻による屋外屋根の被害状況⁽³⁾



周囲の田に散乱した屋根ふき材

第4図 平成24年2月1日島根県出雲市で発生した
F0竜巻による屋外屋根の被害状況⁽⁴⁾



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



飛来物（鋼板製屋根材）の衝突 飛散した飛来物（鋼板製屋根材）



飛散した折板屋根の損傷状況



ガソリンスタンドの折板屋根の脱落 駐車場の折板屋根の著しい変形

第5図 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生した

F3竜巻による屋外屋根の被害状況⁽⁵⁾

b. ガラス窓

第6図～第11図に示すとおり，ガラス窓についてはF0～F3及びEF5の竜巻において損壊し，分解されていることが確認できる。分解された状態では小型軽量となっており，その影響は設計飛来物である鋼製材に包絡されると考えられる。



エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の
屋内壁面への突き刺さり

第6図 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生した
F2竜巻によるガラス窓の被害状況⁽²⁾



バスの窓ガラス破損

第7図 平成20年5月25日米国アイオワ州で発生した
EF5竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁶⁾



窓ガラスの損壊



窓ガラスの飛来物衝突痕

第 8 図 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市での F 1 (F 2)

竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁷⁾



倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



窓ガラスの損壊



出窓部の窓ガラスの損壊



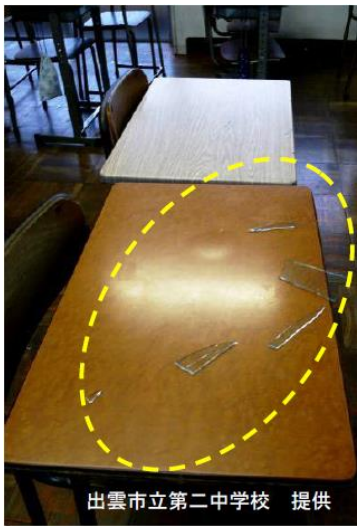
エントランスのガラス損壊

第 9 図 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した

F 1 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽³⁾



体育館窓ガラスの損傷



教室



廊下



屋外に面した窓ガラス

第 10 図 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した
F 0 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁴⁾



店舗の窓ガラスの被害状況



店舗の窓ガラスの被害状況



ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）



ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）

第 11 図 平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した

F 3 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁵⁾

(2) 再処理事業所内の屋外屋根及びガラス窓の状況

再処理事業所内における屋外屋根の状況を第12図、ガラス窓の状況を第13図に示す。再処理事業所内におけるこれらの物品の構造については、上記の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には同様の被害状況になると考えられ、飛来物としては設計飛来物の影響に包絡されると考えられる。



第12図 再処理事業所内における屋外屋根



第13図 再処理事業所内におけるガラス窓の状況

(3) 損傷するが飛散しない物品（樹木とフェンス）

竜巻の被害概要調査結果等における「損傷するが飛散しない物品」に関し、再処理事業所内に存在する物品としてシャッター、樹木、フェンス及び仮設足場が確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. シャッター

第14図～第18図にシャッターの被害状況を示す。これらより、シャッターについては、F1～F3及びEF5の竜巻において形状は変形しているが、固定部は外れていないことが確認できる。なお、外れて飛来物となったとしても、衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については、上記の屋外屋根と同様、設計飛来物である鋼製材の評価に包絡されると考えられる。



シャッターの外れ

第14図 平成20年5月25日米国アイオワ州で発生した
EF5竜巻によるシャッター被害状況⁽⁶⁾



シャッターの変形

第 15 図 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した
F 1 竜巻によるシャッターの被害状況⁽³⁾



シャッターの外れ

第 16 図 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した
F 1 (F 2) 竜巻によるシャッター被害状況⁽⁷⁾



消防団施設のシャッターの変形

第 17 図 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した
F 3 竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁵⁾



シャッターの外れ

第 18 図 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県で発生した
F 2 竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁸⁾

b. 樹木

第 19 図～第 25 図に樹木の被害状況を示す。これらより、樹木について、F 1～F 3 及び E F 5 の竜巻において幹の折損、根の引き抜き等が見られるが、折れた場合若しくは引き抜かれた場合のいずれにおいても、その場で倒壊しているのみであることが確認できる。これは、竜巻の風荷重により樹木が損壊を受けた後では、竜巻が既に通り過ぎているためと考えられ、樹木が飛来物となることは考えにくい。



倒木（倒れない樹木もあり）



倒木

第 19 図 平成 14 年 7 月 10 日群馬県境町で発生した

F 2 竜巻による樹木被害⁽⁹⁾



樹木の転倒



樹木の転倒

第 20 図 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した

F 2 竜巻による樹木被害状況⁽²⁾



樹木の折損

第 21 図 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した
E F 5 竜巻による樹木被害状況⁽⁶⁾



倒木

第 22 図 平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市で発生した
F 2 竜巻による樹木被害状況⁽¹⁰⁾



倒木

第 23 図 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した
F 1 竜巻による樹木被害状況⁽³⁾



樹木の折損



樹木の折損と鳥居の被害



樹木の被害



樹木の被害

第 24 図 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した
F 3 竜巻による樹木被害状況⁽⁵⁾



樹木の被害



樹木の倒壊による小屋組の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害

第 25 図 平成 25 年 9 月 2 日 埼玉県で発生した

F 2 竜巻による樹木被害状況⁽⁸⁾

C. フェンス

第 26 図～第 28 図にフェンスの被害状況を示す。これらより、フェンス類については、F 1～F 3 の竜巻において傾き、倒壊等が見られるが、樹木と同様にその場で倒壊しているのみであり、倒壊した後では、竜巻は既に通り過ぎていていると考えられていることから、竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考えにくい。



フェンスの著しい変形



フェンスの変形

第 26 図 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した
F 1 (F 2) 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁷⁾



フェンスの変形



道路標識の倒壊

第 27 図 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した
F 3 竜巻によるフェンス類の被害状況⁽⁵⁾



フェンスの倒壊



屋上フェンスの変形



フェンスの変形



フェンス支柱部の破損



看板の変形



フェンスの変形（工事中の建築物）



フェンスの倒壊

第 28 図 平成 25 年 9 月 2 日 埼玉県で発生した
F 2 竜巻によるフェンス類の被害状況⁽⁸⁾

d. 仮設足場

第 29 図に仮設足場の被害状況を示す。これにより，仮設足場については，F 2 の竜巻において倒壊していることが確認できる。各足場パイプは容易に分解せず，仮設足場はほぼ組まれた状態で倒壊しているため，飛来物となることは考えにくい。

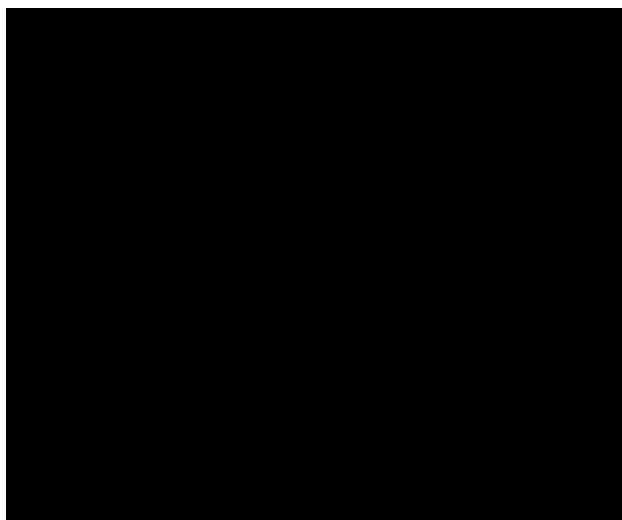
また，仮に倒壊して後に分解し飛来物となったとしても，その影響は設計飛来物である鋼製材に包絡されると考えられる。



第 29 図 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した
F 2 竜巻による仮設足場の被害状況⁽¹¹⁾

(4) 再処理事業所内のシャッター，樹木，フェンス及び仮設足場の状況


再処理事業所内におけるシャッターの状況を第 30 図に，樹木の状況を第 31 図に示す。上記の被害実績に示された樹木と大きく変わらないと考えられることから，竜巻通過時には，同様の被害状況になり，幹の折損若しくは根の引き抜きによりその場で倒壊するのみと考えられる。



第 30 図 再処理事業所内におけるシャッターの状況



第 31 図 再処理事業所内における樹木の状況

 については核不拡散の観点から公開できません。

再処理事業所内におけるフェンスの状況を第 32 図に示す。上記にて示した被害にあったフェンスの構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり変形若しくは倒壊するのみと考えられる。



第 32 図 再処理事業所内におけるフェンスの状況

再処理事業所内における仮設足場の状況を第 33 図に示す。上記にて示した被害にあった仮設足場の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり変形若しくは倒壊するのみと考えられる。



第 33 図 再処理事業所内における仮設足場の状況

■については核不拡散の観点から公開できません。

以上より，シャッター，樹木，フェンス及び仮設足場は，竜巻により損傷若しくは倒壊するが，飛散せず設計飛来物としての選定は不要と判断した。

< 参考文献 >

- (1) 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」(平成16年7月13日)
- (2) 「2006年台風13号被害調査報告-延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害-」(平成18年10月10日)
- (3) 「平成21年10月8日茨城県土浦市竜巻被害調査報告」(平成21年10月13日)
- (4) 「平成24年2月1日島根県出雲市で発生した突発被害調査報告」(平成24年2月14日)
- (5) 「平成24年(2012年)5月6日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」(ISSN1346-7328 国総研資料第703号 ISSN0286-4630 建築研究資料第141号平成25年1月)
- (6) 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」(平成20年6月9日)
- (7) 「平成21年7月27日群馬県館林市竜巻被害調査報告」(平成21年8月17日一部修正)
- (8) 「平成25年9月2日に発生した竜巻による埼玉県越谷市、北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害(速報)」(国土交通省国土技術政策総合研究所独立行政法人建築研究所平成25年9月10日一部修正)
- (9) 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」(平成14年7月26日独立行政法人建築研究所)
- (10) 「平成21年7月19日岡山県美作市竜巻被害調査報告」(平成21年8月4日)

(11) 「2006 年台風 13 号に伴って発生した竜巻による延岡市の
建物被害」

以 上

令和 2 年 4 月 17 日 R1

補足説明資料 5 - 5 (8 条 竜巻)

竜巻時に発生する降雹について

竜巻と同時に発生する自然現象のうち、降雹についての評価結果を示す。

雹は積乱雲から降る直径 5 mm 以上の氷の粒であり、文献⁽¹⁾より直径の上限は 10 cm，終端速度は 59 m/s として評価を実施した。この雹の質量は約 0.5 kg であり、運動エネルギーは約 0.9 kJ である。

直径 10 cm の雹と設計飛来物の運動エネルギーとの比較を第 1 表に示す。これより、雹の運動エネルギーは設計飛来物の運動エネルギーより十分小さく、雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡できると言える。

第 1 表 粒径 10 cm の雹と設計飛来物との比較

評価対象	運動エネルギー (kJ)
雹 (直径 10 cm)	0.9
設計飛来物 (鋼製材)	79

<参考文献>

(1) 小倉義光．一般気象学．第 2 版，東京大学出版会，1999．

以上

令和 2 年 6 月 19 日 R1

補足説明資料 5 - 6 (8 条 竜巻)

空力パラメータについて

空中での物体の飛散については以下の運動方程式が用いられる。

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

ここで、各変数は以下で定義される。

\mathbf{V}_M ：飛来物の速度ベクトル

\mathbf{V}_w ：風速ベクトル（竜巻の渦風速と移動速度の和）

ρ ：空気密度

$C_D A$ ：飛来物の抗力係数と見附面積の積の平均値

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

式（1）の右辺に現れる $C_D A/m$ は飛行定数とよばれる物体固有の空力パラメータであり、米国原子力規制委員会の基準類⁽¹⁾で引用されている文献⁽²⁾および原子力規制委員会「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁽³⁾で引用されている文献⁽⁴⁾と同様に以下の式で定義される。

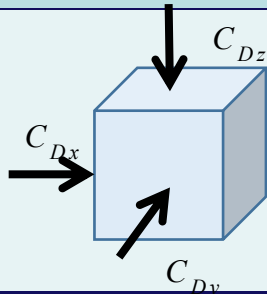
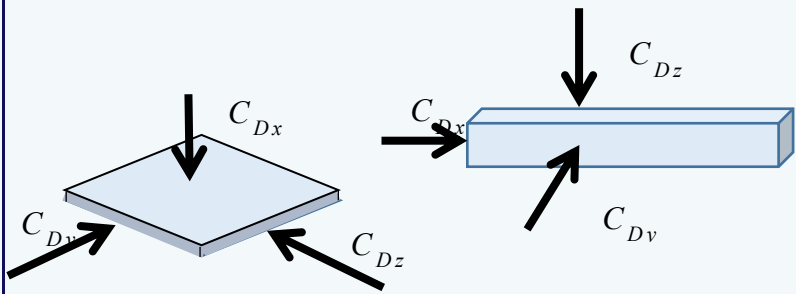
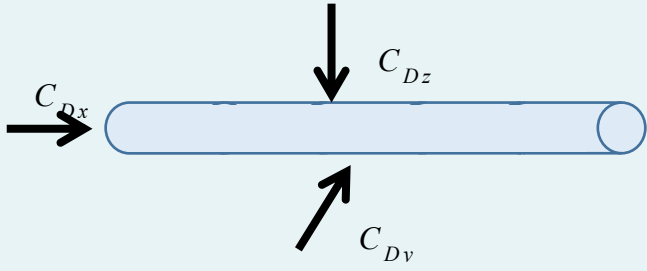
$$\frac{C_D A}{m} = c \frac{C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z}{m} \quad (2)$$

ここで、 c は定数（1 / 3）， C_{Dx} は空中での X 軸方向流れに対する抗力係数， A_x は X 軸方向流れに対する見附面積であり， C_{Dy} や A_y 等も同様である。 C_{Dx} 等の値は，物体が塊状，板状，棒状（円柱），棒状（円柱以外）によって表 1 のように定めら

れている。また，塊状，板状，棒状の分類は物体のアスペクト比によって，図1のフローで判定される。

表 1 空力パラメータ算出のための抗力係数値

(⁴文献に基づき作成)

物体形状	C_{Dx}	C_{Dy}	C_{Dz}	風向
塊状物体	2.0	2.0	2.0	
板状物体, 棒状物体 (円柱以外)	2.0	1.2	1.2	
棒状物体 (円柱)	2.0	0.7	0.7	

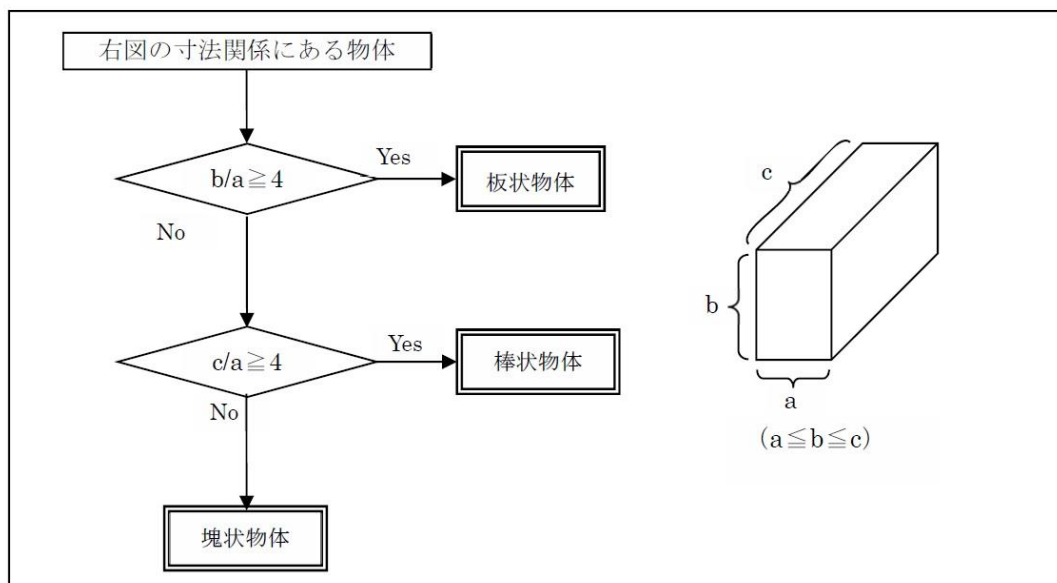


図 1 塊状，板状，棒状の判定フロー
 (文献の添付図 C-4-1 を引用)

< 参考文献 >

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants, Regulatory Guide 1.76, Revision 1 (2007).
- (2) Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind effects on structures: fundamentals and applications to design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ (1996).
- (3) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 原規技発第 13061911 号, 2013 (改正: 原規技発第 1812177 号, 2018).
- (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 (2011).
- (5) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン (2018/07/09 意見受付終了)

以 上

令和 2 年 1 月 24 日 R0

補足説明資料 5 - 7 (8 条 竜巻)

荷重の組合せ一覧表 (建物・構築物)

分類	荷重の種類	内容	長期荷重	短期荷重①	短期荷重②	短期荷重③	短期荷重④	短期荷重⑤
				(地震)	(風)	(竜巻)	(火山)	(雪)
常時作用している荷重	・固定荷重	構造物自体の重さによる荷重	○	○	○	○	○	○
	・機器配管荷重	建物に設置される機器及び配管の荷重	○	○	○	○	○	○
	・積載荷重	家具、什器、人員荷重のほか、機器・配管荷重に含まれない小さな機器類の荷重	○	○	○	○	○	○
	・土圧荷重(静土圧)	地下外壁に作用する土圧	○	○ (地震時土圧)	○	○	○	○
運転時の状態で施設に作用する荷重		運転時の状態で貯蔵区域に作用している温度による荷重	○	○	○	○	○	○
個別荷重	・積雪荷重	積雪深さに応じて算定する荷重	○ (190cm×0.70)	○ (190cm×0.35)	○ (190cm×0.35)	○ (190cm×0.35)	○ (150cm)	○ (190cm)
	・地震荷重	Ss,Sd,1/2Sd 及び静的地震力による荷重 地震時土圧、地震時水圧及び機器・配管系からの反力もこれに含まれる	○	○	○	○	○	○
	・風荷重	基準風速 34m/s(瞬間風速 45.4m/s 相当)に応じた算定する荷重	○	*1	○	○	○	○
	・竜巻荷重	設計竜巻(100m/s)による風圧力、気圧差及び飛来物の衝撃荷重	○	○	○	○	○	○
	・降下火砕物による荷重	降下火砕物の堆積量(55cm)に応じて算定する荷重	○	○	○	○	○	○

*1 風荷重の影響が地震荷重と比べて相対的に無視できないような構造、形状及び仕様の施設においては、組合せを考慮する。

また、風荷重の算定は、平均的な風荷重とするため、ガスト影響係数 $Gf=1$ とする。

注1 ある荷重の組合せ状態での評価が明らかに厳しいことが判明している場合には、その他の荷重の組合せ状態での評価は行わないことがある。

注2 屋外設備については、建物・構築物の荷重の組合せに準じることとする。

荷重の組合せ一覧表 (機器・配管系)

分類	荷重の種類	内容	長期荷重	短期荷重① (地震)		短期荷重② (竜巻)
運転時の状態 で施設に作用 する荷重	・死荷重(自重)*1	施設自体の重さによる荷重	○	○	○	○
	・圧力荷重	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重	○	○	○	○
	・機械荷重	当該設備に設計上定められた機械的荷重 (例:ポンプ振動、クレーン吊荷重等)	○	○	○	○
	・地震荷重	Ss, Sd, 1/2Sd, 静的地震力による荷重	-	○	○	-
個別荷重	・竜巻荷重	竜巻(気圧差)	-	-	-	○

*1 死荷重(自重)については、常時作用している荷重に分類されるが、規格上、運転時の状態で施設に作用する荷重の分類に属しているため本記載としている。

注1 ある荷重の組合せ状態での評価が明らかに厳しいことが判明している場合には、その他の荷重の組合せ状態での評価は行わないことがある。

注2 屋外施設については、建物・構築物の荷重の組合せに準じることとする。

令和 2 年 6 月 19 日 R1

補足説明資料 6 - 1 (8 条 竜巻)

ランキン渦モデルとフジタモデルの適用の考え方について

評価に使用する風速場モデルについて

ランキン渦モデルは米国原子力規制委員会の基準類で採用されており，利用実績が高く，非常に簡単な式で風速場を記述することができる。しかし，風速場が高さに依存しないため，地表面付近では非現実的な風速場となることがデメリットとしてあげられる。

フジタモデルはランキン渦モデルと比較して，解析プログラムが複雑であるが，観測に基づき考案され，実際に近い竜巻風速場をモデル化している。図6-1に風速場モデルを示す。1978年のGrand Gulf原子力発電所の竜巻被災や，平成18年の佐呂間町での竜巻被災における地上物の転倒または移動状況は，フジタモデルを用いると実際に確認された状況をよく再現することがわかっている（参考資料1）。

廃棄物管理施設の竜巻影響評価では，基本的にランキン渦モデルを採用する。

ただし，車両の固縛又は退避の運用において考慮する離隔距離の設定においては，車両が全て地表面にあることから，地表面の風速場をよく再現しているフジタモデルを採用する。

以上

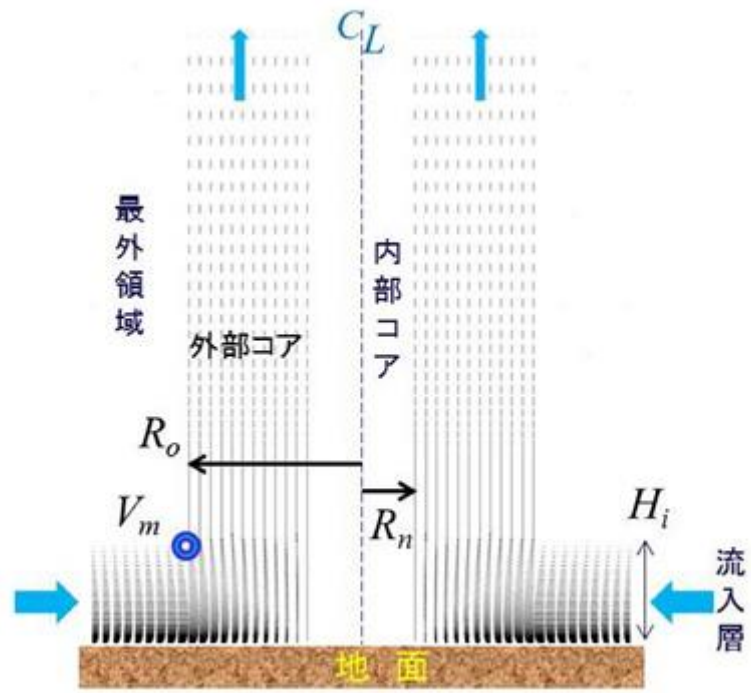


図 6 - 1 フジタモデルの風況イメージ

補足説明資料 6 - 1

参考資料 1 (8 条 竜巻)

フジタモデルの適用について

1. 概要

フジタモデルは、米国NRCの要望により藤田博士が開発した竜巻風速場の工学モデルであり、竜巻動画の写真図化分析、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査に基づき提案されたものである。ランキン渦と同様に代数式で風速場が表現されるが、数式はやや複雑である。

フジタモデルは、半径方向に3つの領域（内部コア・外部コア・最外領域）、高さ方向に2つの領域（流入層、非流入層）に分割して風速場をモデル化している。上昇流（ V_z ）は外部コアのみに存在し、地表面付近で竜巻中心に向かう強い流れ（ V_r ）があるほか、接線風速 V_θ は高さ依存性がある。

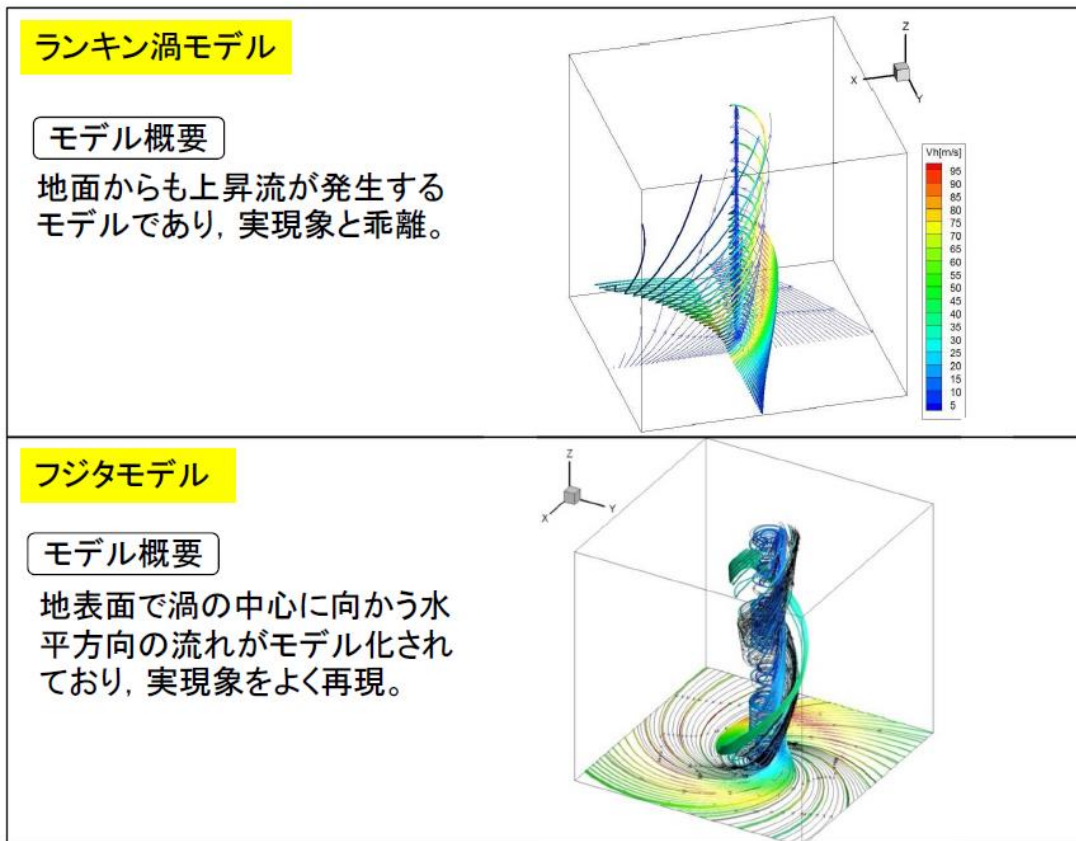
フジタモデルには以下の特徴がある。

- －観測に基づき考案され、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。
- －比較的簡単な代数式で風速場を表現しうる。
- －米国NRCの基準類でもランキン渦モデルと並列に参照されている。
- －ランキン渦モデルと比較して、風況をモデル化する上で解析プログラムが複雑（近年の計算機能力向上と竜巻評価コードの高度化により、問題点は解決された）。

具体的な工学モデルは参考資料2に示す。

竜巻の風速場モデルとして利用されている「ランキン渦モデル」、「フ

「ランキン渦モデル」の風況イメージを第1図に示す。



出典：原子力発電所の竜巻影響評価について ―設計風速および飛来物速度の評価― 改定4
2014年9月9日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会

第1図 「ランキン渦モデル」、「フジタモデル」の風況イメージ

2. フジタモデルの適用の可能性について

(1) 自動車飛散実績との比較

藤田スケール（以下、「Fスケール」という。）の風速条件で自動車の浮上・飛散をフジタモデルで計算した結果と、各Fスケールにおける実際の被災状況を比較すると、第1表及び第2表に示すとおりよく一致しており、フジタモデルは実際に近い竜巻風速場をモデル化していると言える。

第1表 竜巻による自動車飛散実績（Fスケール別）

Fスケール	風速[m/s]	自動車の被災状況
F 2	50～69	⁽¹⁾ cars blown off highway（自動車が道から ⁽²⁾ 吹き飛ばされる）
F 3	70～92	⁽¹⁾ cars lifted off the ground（自動車はも ⁽²⁾ ち上げられて飛ばされる）
F 4	93～116	cars thrown some distances or rolled ⁽¹⁾ considerable distances ⁽²⁾ （自動車は何十メートルも空中飛行する）

第2表 フジタモデルによる自動車の飛散評価結果 (江口ら)⁽³⁾

F スケール との対応	最大水 平風速 V_D [m/s]	竜巻接 線速度 V_m [m/s]	竜巻移 動速度 V_{tr} [m/ s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2 (静止)	69	59	10	1.0	1.4	0
F2 (走行) ※	89	59	30	23	25	0.9
F3 (静止)	92	79	13	23	34	1.1
F4 (静止)	116	99	17	42	59	3.1

※ 竜巻移動速度に対する自動車の相対走行速度を 20m/s (72km/h) と仮定し、竜巻の移動速度に加えた場合

(2) 1978年4月17日, Grand Gulf 原子力発電所の竜巻被災事例

過去に発生した竜巻による被害状況とフジタモデルによる再現計算との比較を文献調査した。

1978年4月17日, ミシシッピ州で建設中の Grand Gulf 原子力発電所に来襲した竜巻の規模は, 風速は F 2 相当の $56\sim 67\text{m/s}$ と⁽⁵⁾推定されるが, 変電設備で F 3 竜巻相当の被害が見られた。⁽⁴⁾

冷却塔の耐風設計風速は 40 m/s であり, これを $40\sim 70\%$ 超える風速にも耐えたが,⁽⁵⁾ 冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し, 建設中の冷却塔 (高さ 138 m) に衝突し, 一部が破損した。

Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散状況は, 次のように報告されている。

パイプを収納した木箱 (一部 2 段重ね) は浮上せず転倒しパイプが散乱するが, $7\sim 9\text{ m}$ にとどまる。 (*Pieces of pipe were scattered over a large area, but none travelled more than $25\sim 30\text{ ft.}$*)⁽⁵⁾

上に掲げる実際の Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散被害状況に対して, 工学モデルを用いた再現計算をして比較する。

計算条件は第 3 表のとおりとする。

第3表 Grand Gulf 原子力発電所パイプ飛散の計算条件

パイプ仕様	名称：Transite パイプ，材質：コンクリート・石綿製，長さ：8 ft.，直径（内径）：8 in.
計算での仮定	外径 9 in.，密度 1700 kg/m ³ ， →飛行定数 $C_d A / m = 0.008 \text{ m}^2 / \text{kg}$ ，物体高さ $d = 0.229 \text{ m}$
竜巻の条件	最大風速 $V_d = 67 \text{ m/s}$ ，最大接線風速 $V_m = 53.6 \text{ m/s}$ ， 移動速度 13.4 m/s，竜巻半径 $R_m = 45.7 \text{ m}$

計算結果は第4表のとおりであった。

第4表 Grand Gulf 原子力発電所パイプ飛散の計算結果

モデル	初期高さ (m)	飛散距離 (m)	飛散高さ (初期高さからの 浮上高さ)	最大水平速度 (m/s)
フジタモデル	1 *	1.2	浮上なし	4.9
ランキン渦モデル	40	227	0.34 m	40.9
ランキン渦モデル	1	42.6	0.34 m	30.7

* 2段重ねで配置されていた状況を踏まえ設定

再現計算結果と実際の被災状況の記録を比較すると、フジタモデルでは、初期高さから浮上しないとの結果が得られ、実際に確認された状況（浮上せずに転倒した木箱からパイプが散乱）を再現して

いると評価できる。

一方、ランキン渦モデルでは、飛散高さが初期高さを1 mとした場合においても実際に確認された状況とパイプの飛散状況に大きな差があり、地表面での風況場は過大な結果を与えることがわかった。

よって、竜巻対策を実施する上で、ランキン渦モデルを用いた場合は非常に過大な対策となるが、フジタモデルを用いた場合は実現象に即したより現実的な対策が可能といえる。

(3) 佐呂間竜巻（平成18年11月7日）による被災事例

a. 佐呂間竜巻の被害状況から確認されたパラメータを用いた飛来距離計算

平成18年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により工事事務所敷地内の車両が被災した事例について、実際の被災状況と、工学モデルによる飛来距離の計算結果を比較した。

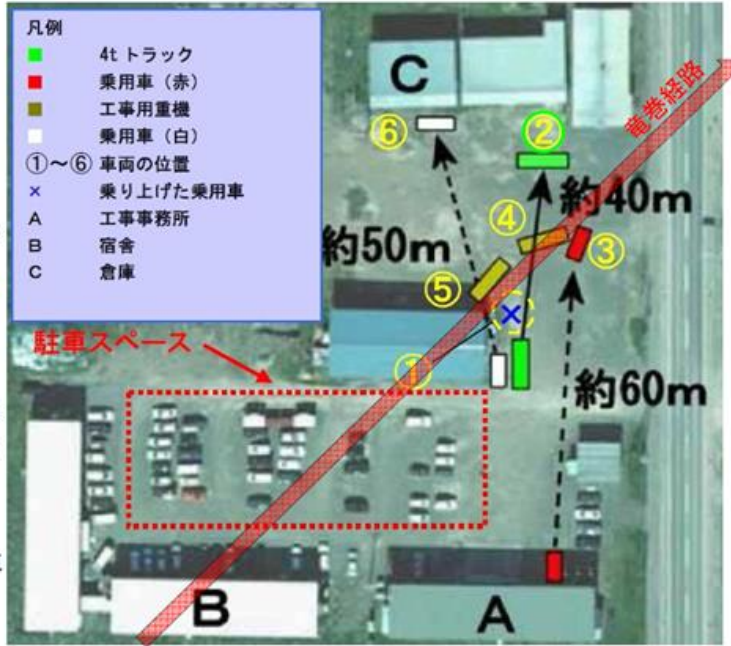
この被災事例では、工事事務所近傍に停車していた4トントラック（第2図の②）に乗車していた2名が竜巻来襲時の被災状況の一部（竜巻来襲前の車両位置等）を証言している。この2名は来襲直前に座席下に潜り込んだが直後に気絶し、着地点付近で車外に投げ出されたところを救出されている。

佐呂間竜巻による被害状況から確認されたパラメータを用い、解析コードにより飛来距離算定を行った結果、竜巻の移動経路と車両の位置関係に依存するが、確認された被害状況（4トントラック②の移動距離40m）と概ね合致した。

4tトラック②に乗車していた2名が竜巻来襲時の被災状況の一部(右図、工事事務所Aの飛散開始、車両②および⑥の竜巻来襲前の車両位置)を証言している。
この2名は来襲直前に座席下に潜り込んだが直後に気絶し、着地点付近で車外に投げ出されたところを救出されている。

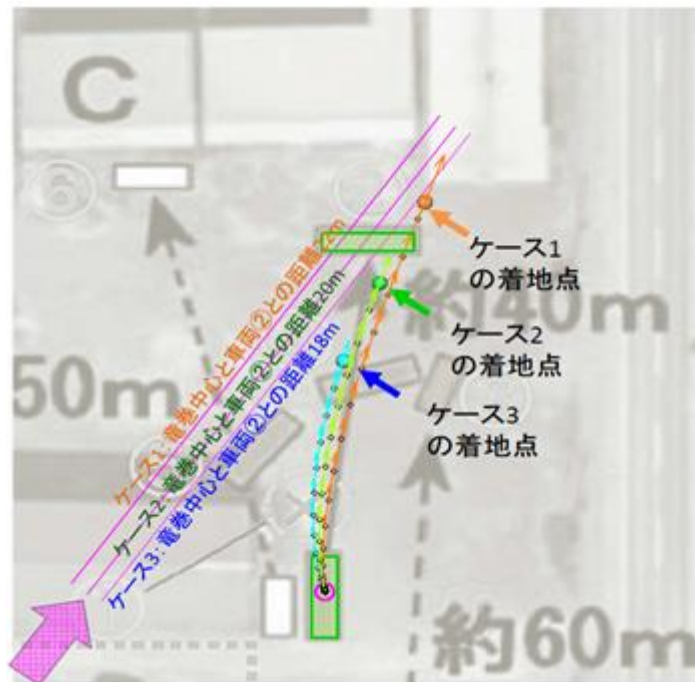
- ①乗用車×: 他の乗用車に乗り上げ(元の駐車位置は不明)
- ②4tトラック■: 竜巻経路の左側(約45°方向)に約40m移動
- ③乗用車■: 約60m移動(全壊・飛散した工事事務所Aの瓦礫とともに移動したものと考えられる)
- ④⑤重機: (元の駐機位置は不明)
- ⑥乗用車□: 竜巻経路の左側(約65°方向)に約50m移動(駐車位置横の倉庫は全壊・飛散)

周囲の建物や大型車両の影響が少ない4tトラック■を計算対象として選択



竜巻の前後に位置が確認された車両の移動状況[文献(3)](写真は被災前の航空写真。文献(4)で示されている竜巻経路を→で加筆。)

第2図 佐呂間竜巻による被災状況⁽⁶⁾⁽⁷⁾



第3図 佐呂間竜巻のパラメータを用いた飛来距離計算結果

第5表 佐呂間竜巻による飛来距離の算定条件と結果

条件	算定条件・結果	備考
空力パラメータ	$C_{La} / m = 0.0044$ $C_{DA} / m = 0.0056$	被災した4トントラックは車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D (8.1 m × 2.24 m × 高さ 2.5 m, 質量 4,000 kg) の仕様を採用した。物体が空中にある場合の抗力の算定には C_{DA} / m の値を用い、揚力の算定には $C_{La} / m = 0.0044$ に相当する条件を設定*。物体高さ $d = 2.5$ m とする。
竜巻と車両の位置関係	竜巻の進行方向の右側，中心移動経路から 18～22 m の位置	被害状況から推定される位置関係を入力条件として設定。現場の詳細が不明のため，18, 20, 22m の 3 パターンについて評価を実施した。
竜巻最大風速	92 m / s	被害状況から推定される風速 (F 3) を設定。
竜巻移動速度	22 m / s	被害記録から算定される移動速度を設定。
最大接線風速半径	20 m	被害状況から推定される最大接線風速半径を設定。
飛来距離	26～45 m	実際に確認された車両の移動距離 (約 40m) と概ね合致。

※竜巻は遠方から接近するため，参考文献(8)の風洞試験結果を参考として，「風速 60 m/s 以下では浮上・移動しない条件」を設定する。 $C_{La} / m = 0.0044$ は，風速 60m/s 以下では浮上/移動しない条件に相当する。

b. 佐呂間竜巻の条件を用いた場合の最大飛来距離の算定

佐呂間竜巻における被害状況から確認された各種パラメータを用いて、解析コードによる最大飛来距離の算定を行った。

最大飛来距離の算定においては、空力パラメータ（揚力の算定）に保守性を考慮した。

最大飛来距離の算定結果は 82m となり、実際に確認された車両の移動距離（約 40m）に比べて大きい算定結果が得られた。

第 6 表 佐呂間竜巻のパラメータを用いた場合の最大飛来距離の算定条件と結果

条件	算定条件・結果	備考
空力パラメータ	$C_{La} / m = 0.0056$ $C_{DA} / m = 0.0056$	揚力の算定においても C_{DA} / m の値を設定。
車両の位置関係	竜巻の進行方向に対して右側 90°，最大接線風速半径の真下付近	車両が竜巻の最大風速を受ける位置関係を設定。
最大風速	92 m/s	被害状況から推定される風速（F3）を設定。
移動速度	22 m/s	被害記録から算定される移動速度を設定。
最大接線風速半径	20 m	被害状況から推定される最大接線風速半径を設定。
最大飛来距離	82 m	

出典：原子力発電所の竜巻影響評価について ― 設計風速および飛来物速度の評価 ― 改定 4，2014 年 9 月 4 日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会

3. まとめ

フジタモデルは観測に基づき考案された竜巻風速場の工学モデルであり、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。1978年の Grand Gulf 原子力発電所の竜巻被災や、平成 18 年の佐呂間町での竜巻被災における地上物の転倒または移動状況は、フジタモデルを用いると実際に確認された状況をよく再現することがわかっている。

4. 参考文献

- (1) Fujita, T. T., Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP Research Paper 91 (1971), University of Chicago, Chicago, IL, p.42.
- (2) 気象庁 HP
- (3) 江口 譲, 杉本聡一郎, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014
- (4) J. R. McDonald, T. Theodore Fujita : His Contribution to Tornado Knowledge through Damage Documentation and the Fujita Scale, pp.63-72, vol.82, no.1, Bull. of Amer. Meteor. Soc., 2001
- (5) T. Fujita and J. R. McDonald : Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi, nuclear power plant site: Aerial and ground surveys. NNUREG/CR-0383, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1978.
- (6) 札幌管区气象台 : 災害時気象調査報告, 平成 18 年 11 月 7 日から 9 日に北海道 (佐呂間町他) で発生した竜巻等の突風, 災害時自然現象報告書 2006 年第 1 号, 2006
- (7) 建築研究所 構造研究グループ 奥田泰雄・喜々津仁密・村上知徳, 2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告, 2006 年 11 月 21 日
- (8) T. Schmidlin *et al.*, UNSAFE AT ANY (WIND) SPEED? Testing the Stability of Motor Vehicles in Severe Winds, pp.1821-1830, vol.83, no.12, Bull. of Amer. Meteor. Soc., 2002

以 上

令和元年 12 月 23 日 R1

補足説明資料 6 - 1

参考資料 2 (8 条 竜巻)

竜巻による物体の浮上・飛来解析について

(1) フジタモデルによる竜巻風速場

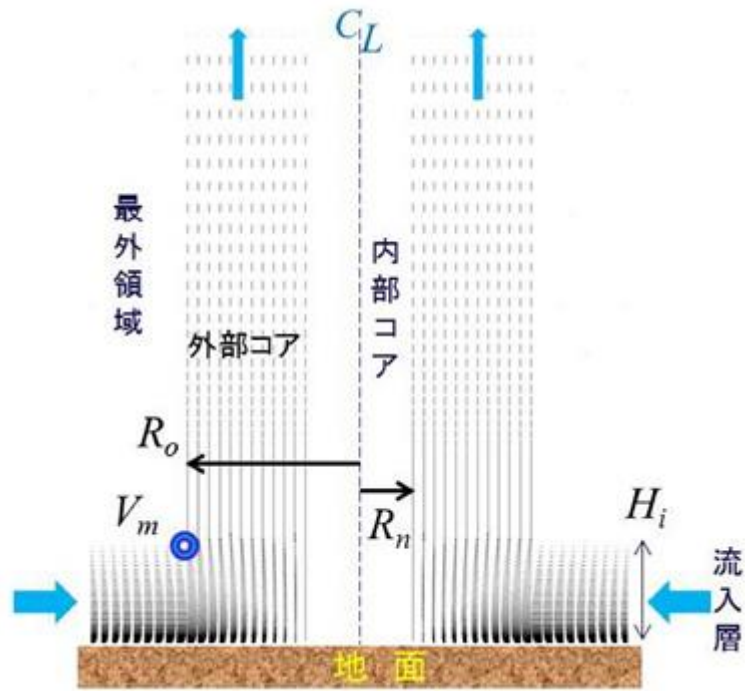
a. フジタモデルの概要

フジタモデルでは、参考資料 1 に示すように、竜巻を半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）に分割してモデル化している。

内部コアでは、中心周りに剛体回転運動するのみであり、上昇流はない。

外部コアでは、剛体回転運動と強い上昇流がある。

最外領域では、自由渦（ランキン渦モデルとほぼ同じ）として回転運動するが、地面付近で竜巻中心に向かう強い流れ（流入層）がある。



第1図 Fujitaモデルの風速領域（ $x-z$ 断面）

内部コア半径 R_n は外部コア半径 R_o に比例する。

$$R_n = nR_o \quad (1)$$

N は1以下の正の値であり，以下の経験式が与えられる。

$$N = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_o) \quad (2)$$

流入層の高さ H_i も外部コア半径 R_o に比例する。

$$H_i = iR_o \quad (3)$$

i は1以下の正値であり，以下の経験式で与えられる。

$$i = 0.55(1 - n^2) \quad (4)$$

b. 周方向風速

周方向風速 V_θ は以下のようにモデル化している。

$$V_\theta = F_r(r')F_h(z')V_m \quad (5)$$

ただし, $r' = r/R_0$, $z' = z/H_i$ (6) a, b

$F_r(r')$ 及び $F_h(z')$ は以下のとおり定義される。

$$F_r(r') = \begin{cases} r' & (r' < 1) \\ 1/r' & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$F_h(z') = \begin{cases} z'^{k_0} & (z' < 1) \\ \exp(-k(z' - 1)) & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (8)$$

定数 k_0 , k の値は, $k_0 = 1/6$, $k = 0.03$ としている。

c. 半径方向風速

半径方向風速 V_r は, 以下のように周方向風速 V_θ に比例する。

$$V_r = V_\theta \tan \alpha$$

$\tan \alpha$ は以下の関数にて与えられる。

$$\tan \alpha = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ \frac{\tan \alpha_0}{1-n^2} \left(1 - \frac{n^2}{r'^2}\right) & (n < r' < 1) \\ \tan \alpha_0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ただし, } \tan \alpha_0 = \begin{cases} -A_m(1-z'^{1.5}) & (z' < 1) \\ B_m \{1 - \exp(-k(z' - 1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (10)$$

$$B_m = \frac{3}{(k_0+1)(k_0+2.5)} k A_m \quad , \quad A_m = 0.75 \quad (11)$$

d. 上昇風速

上昇風速 V_z は以下のようにモデル化している。

$$V_z = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ V_m w_0 & (n < r' < 1) \\ 0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (12)$$

ただし,

$$w_0 = \begin{cases} \frac{3}{28} \cdot \frac{i}{1-n^2} A_m \left(16z'^7 - 7z'^8 \right) & (z' < 1) \\ \frac{iB_m \exp(-k(z'-1))}{k(1-n^2)} \{ 2 - \exp(-k(z'-1)) \} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (13)$$

e. 風速ベクトル

時刻 $t = 0$ で竜巻中心が原点に位置するものとし、竜巻が x 軸方向に移動速度 V_{tr} で移動すると仮定すると、時刻 t 、座標 (x, y, z) における風速場 V_w の各風速成分は以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \theta - V_\theta \sin \theta \\ V_r \sin \theta + V_\theta \cos \theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ただし、 θ は竜巻中心と各点を結ぶ線分が x 軸となす角であり、竜巻中心からの距離 r は以下で定義されるものである。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr}t)^2 + y^2} \quad (15)$$

(2) 飛来物の運動

a. 空中での運動

空中では平均抗力と重力のみが外力として作用するものとした。

ただし、地面付近では地面の存在により流れが非対称になること(地面効果)による揚力加速度 L を考慮した。

物体の空中での運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M| (V_w - V_M) - (g - L)K \quad (16)$$

V_M : 飛来物の速度ベクトル

ρ : 空気密度

$C_D A$: 飛来物の各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値

m : 飛来物の質量

g : 重力加速度

K : 鉛直上向きの単位ベクトル

地面効果による揚力加速度 L は、 $x-y$ 平面内の相対速度の 2 乗に比例し、さらに揚力は物体高さ d の 3 倍までの高さで減衰・消滅するものとし、揚力による加速度 L を以下のようにモデル化した。

$$L = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_L a}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right) \quad (17)$$

ただし、 $f\left(\frac{Z}{d}\right) = \frac{1 - (Z/3d)}{1 + (Z/d)}$, $Z = z - \frac{d}{2}$

C_L : 地上での揚力係数

a : 地上での物体の見附面積

$|_{x,y}$: x, y 成分のみの大きさ

$C_L a$ は風洞実験や数値シミュレーションで定められるが、本モデルでは $C_D A$ で代用することとした。

$$L = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right) \quad (18)$$

b. 地面での運動

地面効果による揚力加速度 L と重力が鉛直方向の外力として作用するものとし、揚力加速度 L が重力よりも大きい場合 ($L > g$) に物体が浮上し、空中運動に移行するとした。

c. 時間積分法

時刻 t における竜巻の風速場は式 (14) で与えられるので、式 (16) を時間積分することによって飛来物の速度 $V_M(t)$ と位置 $X_M(t)$ の時刻歴を求めることができる。

時刻 τ から $\tau + \Delta\tau$ における加速度が一定と仮定すると、

$$\frac{dV_M(t)}{dt} = A(\tau) \quad (19)$$

$A(\tau)$: 加速度ベクトル

となり、式 (16) は以下のようなになる。

$$A(\tau) = k|V_w(\tau) - V_M(\tau)|(V_w(\tau) - V_M(\tau)) - (g - L)K \quad (20)$$

ここで、 $k = \rho C_D A / 2m$ とした。

式 (19) を時間積分すると以下の速度式 $V_M(t)$ 及び物体の位置 $X_M(t)$ を得る。

$$V_M(t) = V_M(\tau) + A(\tau)(t - \tau) \quad (21)$$

$$X_M(t) = X_M(\tau) + V_M(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (22)$$

(21), (22) より、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度 $V_M(t)$ と位置 $X_M(t)$ は以下で与えられる。

$$V_M(\tau + \Delta\tau) = V_M(\tau) + A(\tau)\Delta\tau \quad (23)$$

$$X_M(\tau + \Delta\tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau)\Delta\tau + \frac{A(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (24)$$

(23), (24) の右辺は時刻 $t=\tau$ における既知の速度・位置の関数なので、時間積分を行うことができる。

出典： 江口 譲，杉本 聡一郎，服部 康男，平口 博丸，電力中央研究所報告「竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発」，電力中央研究所，平成 26 年 6 月

以 上

令和 2 年 4 月 17 日 R2

補足説明資料 7 - 1 (8 条 竜巻)

竜巻随件事象の抽出及び設計について

1. 概要

過去の竜巻被害事例及び廃棄物管理施設の配置から想定される竜巻の随件事象を検討し、廃棄物管理施設において考慮する必要がある事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出した。

2. 過去の竜巻被害について

1990年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。第1表に、1990年以降に日本で発生した最大級の竜巻であるF3クラスの竜巻を示す。

第1表 1990年以降のF3クラス竜巻

発生日時	発生場所	藤田 スケール	死者	負傷者	住宅 全壊	住宅 半壊
2012年5月6日	茨城県常総市	F3	1	37	76	158
2006年11月7日	北海道佐呂間町	F3	9	31	7	7
1999年9月24日	愛知県豊橋市	F3	0	415	40	309
1990年12月11日	千葉県茂原市	F3	1	73	82	161

竜巻被害の状況写真（第1～3図）から、竜巻被害としては風圧力及び気圧差による被害及び飛来物の衝突による損傷のみであり、また、竜巻の随件事象として電柱や電線の損傷による停電が発生していると判断される。



全壊した家屋



飛来物により被害を受けた住宅等



倒れた電柱(復旧作業時)



倒壊電柱に直撃された家屋

第1図 2012年5月6日茨城県にて発生した
F3竜巻による被害⁽¹⁾



全壊した工事事務所周辺



飛来物による被害を受けた建物



倒壊した道路標識支柱



道路側へ倒壊した電柱

第2図 2006年11月7日北海道にて発生した
F3竜巻による被害⁽²⁾⁽³⁾



残骸（飛散物）で埋め尽された道路



吹き飛ばされた建物



横転したバス



曲がった鉄筋（工事現場）

第3図 1990年12月11日千葉県にて発生した
F3竜巻による被害⁽⁴⁾

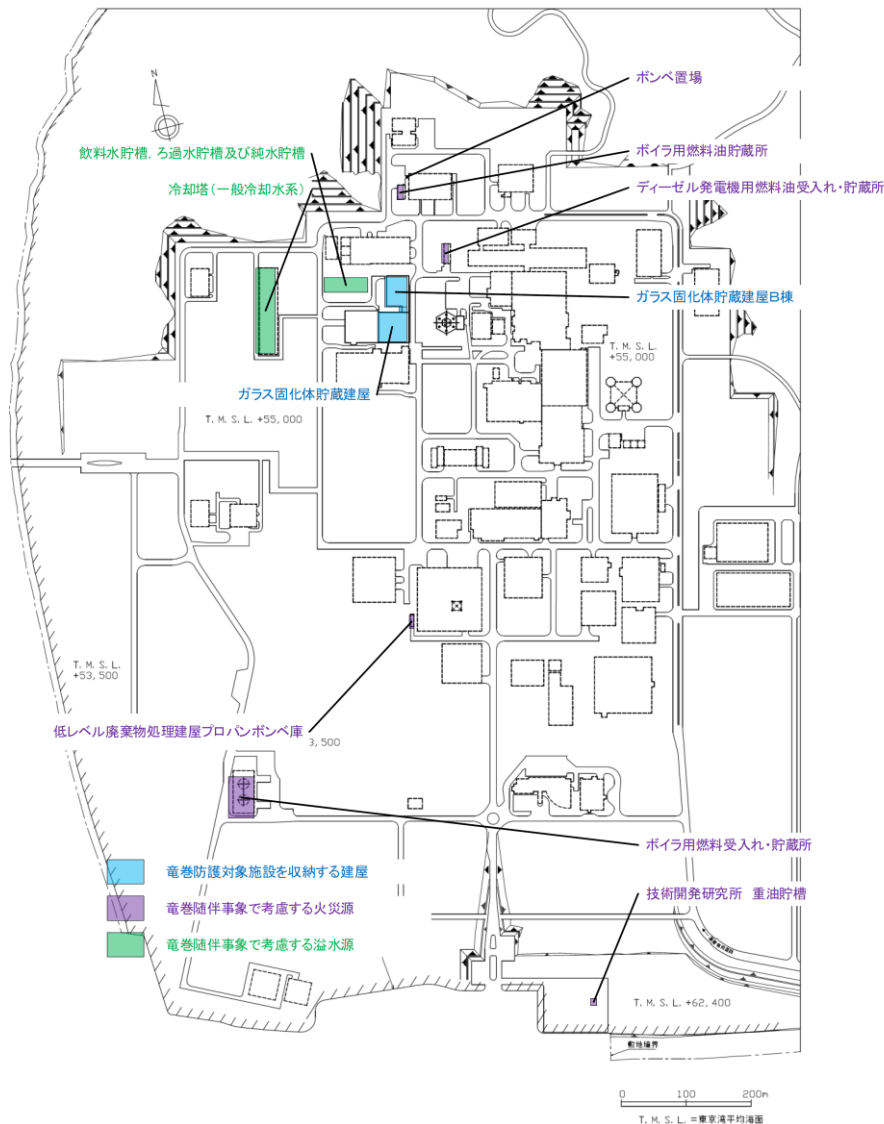
3. 廃棄物管理施設にて考慮すべき竜巻随伴事象

上述の過去の竜巻による被害事例及び廃棄物管理施設の配置から判断すると、廃棄物管理施設においては送電線等が竜巻による被害を受けることにより、外部電源喪失の発生が考えられる。さらに、屋外に油タンク及び水タンクが配備されていることから、飛来物の衝突により火災及び溢水が発生する可能性がある。なお、これらの事象は、竜巻ガイドでも容易に発生が想定されるものとして検討を要求されている。

これらを踏まえ、廃棄物管理施設の配置図に示される各施設に対して竜巻の荷重を考慮した場合にどのような事象が発生するかを検討した。検討結果を第4図に示す。

ただし、外部電源喪失については、竜巻防護対象施設において外部電源の給電を受けるものがなく、設計上考慮する竜巻と同時に外部電源喪失が発生しても、竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことがないため、検討から除外している。

以上のことから、廃棄物管理施設における竜巻随伴事象として、火災及び溢水を抽出する。



第4図 廃棄物管理施設の設計対処施設のうち竜巻防護対象施設を収納する建屋及び竜巻随伴事象の検討対象施設の配置図

4. 竜巻随件事象への進展の防止に対する設計

竜巻防護設計においては、前述のとおり竜巻随件事象として火災、溢水及び外部電源喪失を想定し、これらの事象が発生した場合においても、竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とすることとしている。

ここでは、竜巻随件事象としての火災、溢水及び化学薬品の漏えいへの進展を防止している設計について例を示す。

1) 火災

竜巻により屋外にある危険物貯蔵施設等（ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所、ディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所及びボイラ用燃料貯蔵所）が損傷し、漏えい及び防油堤内での火災が発生したとしても、火災源と竜巻防護対象施設の位置関係を踏まえて熱影響を評価した上で、竜巻防護対象施設の安全機能に影響を与えない設計とすることを「外部火災防護に関する設計」にて考慮する。

<設計の一例>

火災源となり竜巻防護対象施設に影響を与えることが考えられる試薬建屋に附属する屋外設備である硝酸ヒドラジン及び引火性の高い試薬類（T B P 及び n - ドデカン）の貯槽については、地下に設置することにより竜巻の影響を受けない設計とする。試薬建屋の内部に設置されている上記以外の試薬類については、貯槽の破損により漏えいが発生したとしても火災の発生及び進展に寄与することは考えられないことから、竜巻随件事象（火災）として想定する必要はない。（第2表参照）

2) 溢水

再処理事業所内の屋外タンク等の破損による溢水を想定しても、溢水が竜巻防護対象施設を収納する建屋の開口部まで到達しないよう施設を配置する。

<設計の一例>

再処理事業所の敷地内にある屋外タンク等が破損したと評価した場合においても、最大水位は約 0.10m であり、竜巻防護対象施設の外壁に設置した扉等の開口部は再処理事業所の敷地高さ E L . 55.0m より 0.3m 以上高い位置に設置されているため、竜巻防護対象施設に溢水が流入することはない。したがって、竜巻防護対象施設の安全機能に影響を及ぼすことはない。(再処理施設 安全審査 整理資料 第 11 条 溢水による損傷の防止 補足説明資料 11-3 参照)

3) 化学薬品の漏えい

試薬建屋には、再処理施設で使用する化学薬品を貯蔵している。これらの化学薬品について、竜巻随件事象への進展の可能性を評価し、第 2 表に整理した。結論として、試薬建屋に貯蔵される化学薬品のうち、竜巻の影響によって化学薬品の漏えい等の竜巻随件事象として想定すべきものはなかった。

第2表 試薬建屋に貯蔵する化学薬品と
竜巻随伴事象に対する考え方

化学薬品	考えられる随伴事象			設計上の考慮	随伴事象への進展の可能性
	火災	溢水	薬品漏えい		
T B P	○	○	○	地下階に設置するため、設計飛来物の衝突のおそれはない。	なし
n - ドデカン	○	○	○	同上	なし
硝酸ヒドラジン	○	○	○	同上	なし
硝酸	-	○	○	同上	なし
水酸化ナトリウム	-	○	○	同上	なし
硝酸ヒドロキシルアミン (HAN)	-	○	○	同上	なし
炭酸ナトリウム	-	○	-	地上階に設置されており、万一、設計飛来物により建屋外壁及び炭酸ナトリウム貯槽が損傷したとしても、炭酸ナトリウムは、地下階や排水設備へ流入することから、試薬建屋の外に漏れ出すことはない。	なし

< 参考文献 >

- (1) (財) 消防科学総合センター, 平成 24 年(2012 年)5 月 6 日茨城県つくば市竜巻災害写真報告, 2012
- (2) (財) 消防科学総合センター, 平成 18 年 11 月 7 日北海道佐呂間町竜巻災害写真報告, 2006
- (3) (社) 土木学会 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団, 平成 18 年 11 月 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査, 2007 年 4 月
- (4) 千葉県総務部消防地震防災課, 防災誌「風水害との闘い」第 3 章 90m 超えの突風に街が飛ばされた!ー茂原で最大スケールの竜巻が発生ー, 平成 22 年 3 月

以 上

令和 2 年 7 月 13 日 R1

補足説明資料 7 - 2 (8 条 竜巻)

外部電源喪失時における影響について

1. はじめに

竜巻随件事象の一つとして外部電源喪失があるが、廃棄物管理施設の竜巻防護対象施設である収納管、通風管及び遮蔽設備は電源の供給を必要としない静的機器であり、外部電源喪失の影響を受けることはない。したがって、外部電源喪失により竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことはない。

一方、事業許可基準規則の第十八条には予備電源に係る事項があり、以下の設備・機器を作動するために十分な容量及び信頼性のある電源系を設けることが求められているため、予備電源用ディーゼル発電機、直流電源設備及び無停電電源装置（以下「予備電源」という。）を設ける設計としている。

- ◆ 廃棄物管理施設の閉じ込めの機能及び冷却機能を監視する設備
- ◆ 放射線監視設備
- ◆ 火災等の警報設備，緊急通信・連絡設備，非常照明等の設備・機器

竜巻の影響によっては、外部電源喪失の発生が考えられるが、予備電源はガラス固化体受入れ建屋の地下階に設置されているため、その機能が喪失することは考えられない。ここでは、竜巻随件事象としての外部電源喪失の影響について確認を行った。

2. 設計基本方針及び対処の方針

安全機能を有する施設は、竜巻による影響に対して下記のいずれかにより、その安全機能を損なわない設計とすることを基本方針としている。

- ◆ 機械的強度を有することにより安全機能を損なわない設計とすること

- ◆ 代替設備・手段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修理を行うこと

ここでは、事業許可基準規則十八条にて予備電源の設置を要求されている設備・機器について、外部電源を喪失した場合の対処及び安全性への影響を整理し、第1表にまとめた。

第1表 予備電源及び予備電源の供給を受ける設備・機器における

外部電源喪失及び予備電源喪失時の対応

予備電源及び予備電源の供給を受ける設備	外部電源及び予備電源喪失時の対応	安全性への影響
予備電源	◆ 外部電源が喪失した場合には、予備電源により下記設備への給電がなされる。	⇒ 所定の設備への給電が継続されるため、安全性への影響はない。
廃棄物管理施設の閉じ込めの機能及び冷却機能を監視する設備	◆ 外部電源が喪失し、予備電源が利用可能な間は、制御室又は現場制御盤等により監視を継続。	⇒ 所定の監視が継続できるため、安全性への影響はない。
放射線監視設備	◆ 予備電源が利用可能な間は、制御室にて放射線監視設備（屋内・屋外モニタリング設備）の監視を継続。	⇒ 所定の監視が継続できるため、安全性への影響はない。
火災等の警報設備	◆ 予備電源が利用可能な間は、制御室にて監視を継続。	⇒ 所定の監視が継続できるため、安全性への影響はない。
緊急通信・連絡設備 (通信連絡設備)	◆ 所内通信連絡設備については、予備電源が利用可能な間は、通常の通信連絡設備による連絡が可能。所外通信連絡設備については、外部電源及び予備電源の喪失時においても使用が可能。	⇒ 所定の通信連絡設備の使用が継続できるため、安全性への影響はない。
非常照明等の設備・機器	◆ 予備電源が利用可能な間は、通常の非常照明等を利用して退避が可能。	⇒ 所定の非常照明等の使用が継続できるため、安全性への影響はない。

3. まとめ

予備電源及び予備電源の供給を受ける設備・機器は、竜巻の影響により外部電源が喪失した場合においても、機械的強度を有することにより安全機能

を損なわない設計とすることで、廃棄物管理施設の安全性に影響を及ぼさないことが確認できた。

以 上

令和 2 年 6 月 19 日 R4

補足説明資料 8 - 1 (8 条 竜巻)

車両の飛来防止対策について

0. 概要

車両は飛来防止対策を行うことにより、設計飛来物から除外する。車両の飛来防止対策は、固縛又は退避を必要とする区域（以下、「飛来対策区域」という。）を設定し、当該区域内の車両の運用を管理することにより行う。

飛来対策区域は車両の最大飛来距離を 170m、最大飛来距離に安全余裕を考慮した、車両が衝突しないよう離隔対象施設から離す距離（以下、「離隔距離」という。）を 200m、離隔距離をとるべき、車両の衝突を防止する対象として選定する施設（以下、「離隔対象施設」という。）を選定した上で設定する。

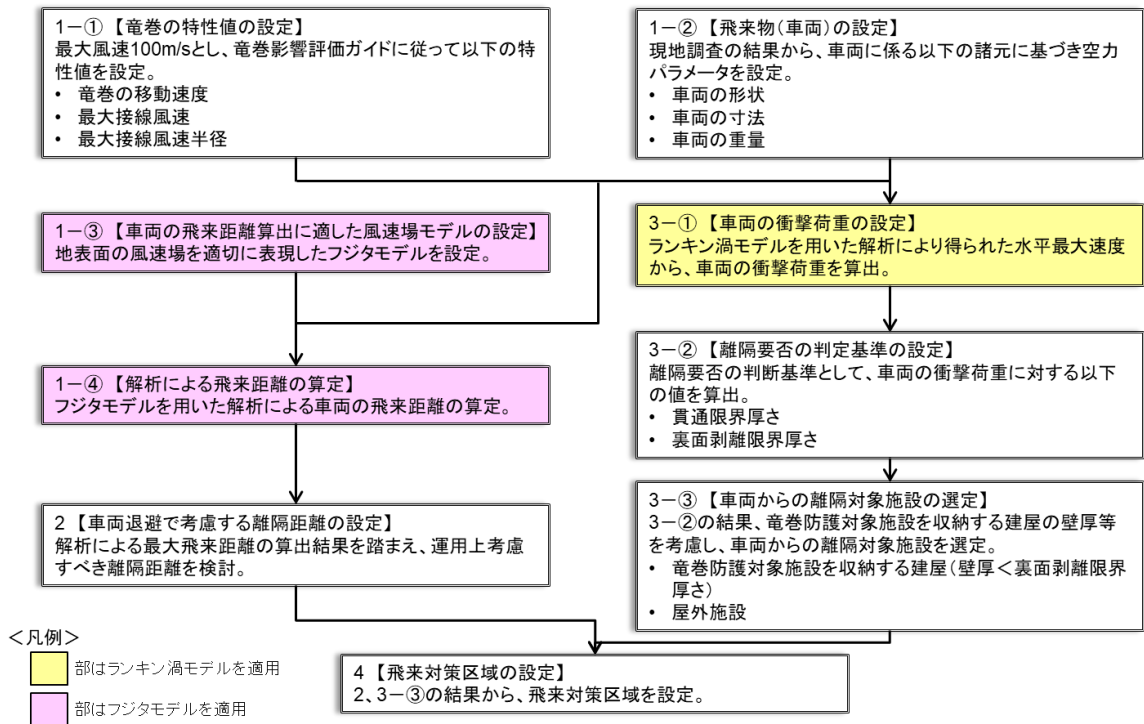
飛来対策区域設定に関する全体フローを第 1 図に示す。

車両の飛来距離の算定においては風速場モデルとしてフジタモデルを適用した上で安全余裕を考慮する。

離隔対象施設は、ランキン渦モデルを用いて算出した車両の衝撃荷重に基づき選定する。

また、フジタモデルを適用した解析における不確実性を補うため、周辺防護区域内の車両は固縛又は退避の対象とする。

飛来対策区域内の車両は、飛来物とならないように固縛又は周辺防護区域外への退避を実施する事を手順に定める。



第1図 飛来対策区域設定に関する全体フロー

1. 車両の飛来距離

1. 1 竜巻の特性値の設定

竜巻影響評価ガイドに基づいて、最大風速 $V_D = 100 \text{ m/s}$ の竜巻の特性値を以下のとおり設定する。

なお、これら特性値は、風速場モデルに依存しないため、フジタモデルにも適用することができると考えられる。

(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T (m/s))

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以下のとおり設定する。

$$V_T = 0.15 \times V_D = 15$$

(2) 最大接線風速 (V_{Rm} (m/s))

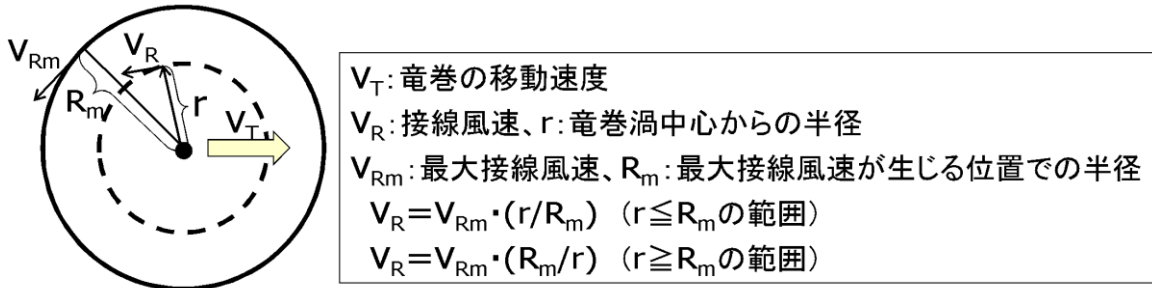
米国 NRC の基準類を参考として以下のとおり設定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T = 85$$

(3) 最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m (m))

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に準拠して以下の値を用いる。

$$R_m = 30$$



第2図 竜巻の特性値の設定について⁽¹⁾

1. 2 飛来物（車両）の設定

現地調査にて抽出した車両を対象とし、より飛来しやすい形状である塊状物体の形状係数を用いて空力パラメータを算出する。

第1表 現地調査で抽出した車両の諸元と空力パラメータ

車両の種類	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータ $C_D A/m$ (m^2/kg)
大型バス	12	2.5	3.8	12100	0.0047
トラック	8.5	2.2	2.5	3790	0.0080
乗用車 普通	4.4	1.7	1.5	1140	0.0097
乗用車 ワゴン1	4.8	1.8	1.5	1510	0.0082
乗用車 ワゴン2	5.2	1.9	2.3	1890	0.0092
軽自動車1	3.4	1.5	1.6	840	0.0102
軽自動車2	3.4	1.5	1.5	710	0.0116

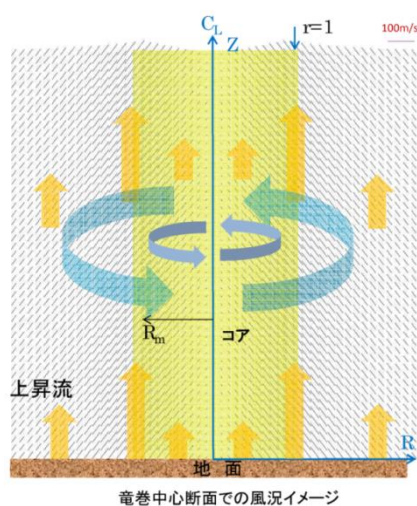
1. 3 解析に適した風速場モデルの選定

ランキン渦モデルは、地面からも上昇流が発生するモデルとなっており、実現象と乖離している。また、風速分布は高さに依存せず、竜巻全域に上昇流が存在する。

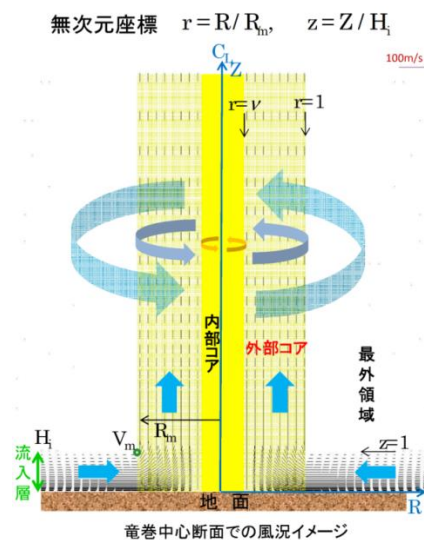
フジタモデルは、実際に近い竜巻風速場として、地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れをモデル化している。また、接線風速は高さ依存性があり、上昇流は外部コアのみに存在する。

フジタモデルは、NRCの要請により藤田博士が開発した竜巻風速場の工学モデルである。フジタモデルの詳細な報告は、米国エネルギー省向けにまとめられており、米国NRCの規準類にも引用されている。NRCは両モデルを比較し、より単純なランキン渦モデルを選択している。

廃棄物管理施設は平坦な地形に立地しており、かつ、再処理事業所内の車両は地表面にあるため、車両の飛来距離算定においてはフジタモデルを適用する。



第3図 ランキン渦モデル⁽²⁾



第4図 フジタモデル⁽²⁾

第2表 飛来物評価モデルの比較⁽²⁾

モデル名	メリット	問題点	評価
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> 非常に簡単な式で風速場を記述することができる。 NRCガイドで採用されており、利用実績が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 上昇流が全領域に存在し、飛来物が落下しにくい。 風速場が高さに依存しないため、<u>地面付近では非現実的な風速場となる。</u> 	○
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> 観測に基づき考案されたモデルであり、<u>実際の風速場に近い。</u> 比較的簡単な代数式で風速場を表現しうる。 NRCガイドでもランキン渦モデルと並列に参照されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ランキン渦モデルと比較して、風況をモデル化する上で解析プログラムが複雑。(近年の計算機能力向上と竜巻評価コードの高度化により、問題点は解決された) 	◎
非定常乱流渦モデル (LES)	<ul style="list-style-type: none"> 風速の時間的な変動(乱れ)をある程度模擬している。 	<ul style="list-style-type: none"> 人為的な計算条件を用いるため、<u>実際の竜巻を必ずしも再現していない。</u> 膨大な計算機資源が必要であり、実務での評価には不向きである。 	△

1. 4 解析による飛来距離の算定

算定方法の概要及び算定結果を以下に示す。

- ・フジタモデルに基づいて竜巻を内部コア、外部コア及び最外領域の3つの領域に分割して風速場を設定する。

内部コアは、中心周りの剛体回転運動を考慮し、上昇流はない。外部コアは、剛体回転運動及び上昇流を考慮する。最外領域は、自由渦と地面付近で中心に向かう流れ（流入層）を考慮する。

竜巻の3つの領域に応じて、周方向風速、半径方向風速及び上昇風速を定義し、風速ベクトルを設定する。

車両が空中にあるときは平均抗力と重力、車両が地面付近にあるときには浮き上がり（揚力）を考慮し、物体の運動方程式を定義する。与えられる風速ベクトル及び運動方程式の時間積分より、車両の速度及び位置の時刻歴データを得る。

算定に用いたパラメータ及び車両の飛来距離の算定結果は第3表のとおりである。

第3表 算定に用いたパラメータ及び車両の
飛来距離の算定結果

解析に用いたパラメータ値		車両の飛来距離、飛来高さの算定結果		
最大風速 V_D (m/s)	100	車両の種類	最大飛来距離 (m)	最大飛来高さ (m)
移動速度 V_T (m/s)	15	大型バス	130	7.5
最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	85	トラック	160	11
最大接線風速半径 R_m (m)	30	乗用車 普通	150	6.0
初期設定位置高さ (m)	0	乗用車 ワゴン 1	90	4.5
		乗用車 ワゴン 2	170	12
		軽自動車 1	160	7.0
		軽自動車 2	170	8.5

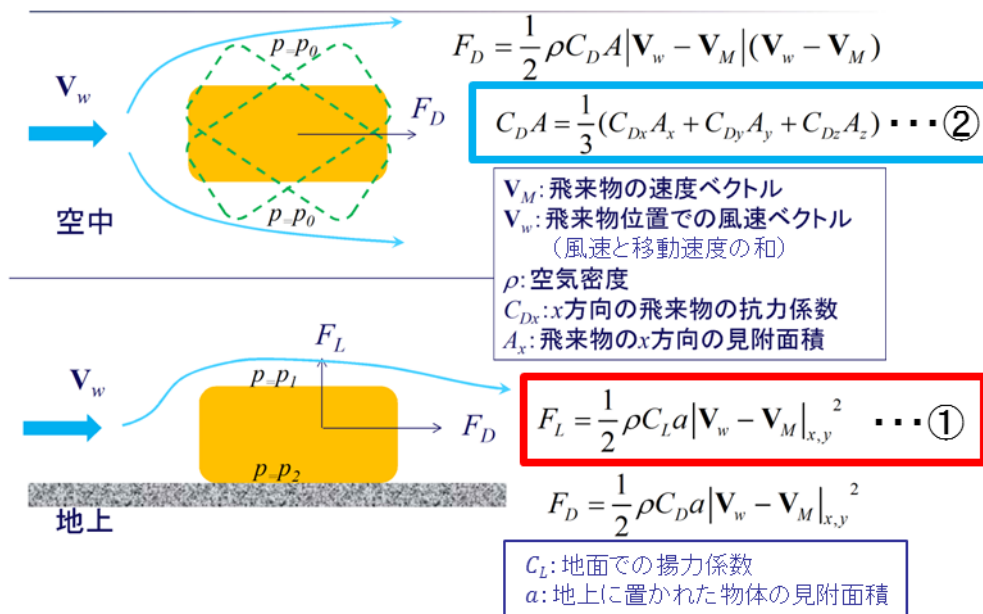
1. 4. 1 物体の浮き上がりにおける保守性の考慮

浮上・飛来解析における物体の浮き上がりの判定においては、以下に示すような保守性を考慮している。

式①のとおり地表面においては揚力を考慮するが、解析においては $C_L a$ の代わりに、式②の抗力係数と見附面積の積の平均値 $C_D A$ を用いる。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_D A |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad \dots \textcircled{3}$$

風洞実験で得られた車両の $C_L a$ の最大値と式②で計算される $C_D A$ の下限値を比較した結果によると、 $C_D A > C_L a$ の関係が成立するため、解析において $C_L a$ の代わりに $C_D A$ を用いる方が保守的である。



第5図 飛来物に作用する流体力⁽³⁾

第4表 $C_L a$ と $C_D A$ の比較

物体	円柱 $\phi: d$	自動車 (1974 Dodge Dart)	自動車 (セダン)	自動車 (ミニバン)
文献	(29)	(29)	(10)	(10)
$C_L a$	$2.8d^2$	48.7 ft. ²	9.5m ² *	9.7m ² *
$C_D A$	$7.1d^2$	129 ft. ²	12.0m ²	14.4m ²

*4輪のうち、少なくとも1つのタイヤ反力がゼロとなる風速から逆算したもの

出典：

文献(29) Wind Field and Trajectory Models for Tornado Propelled Objects, EPRI NP-748, 1978.

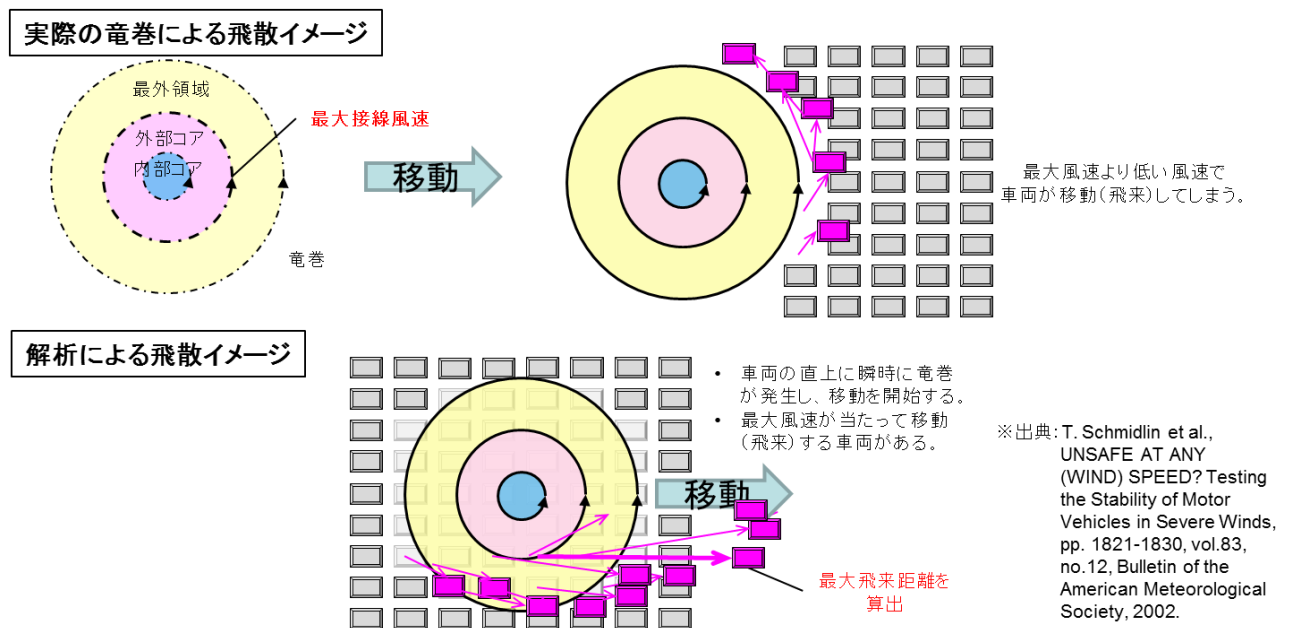
文献(10) T. Schmidlin *et al.*, Unsafe at Any (Wind) Speed? Testing the Stability of Motor Vehicles in Severe Winds, pp.1821-1830, vol.83, no.12, Bulletin of the American Meteorological Society, 2002.

1. 4. 2 飛来に至る過程における保守性の考慮

浮上・飛来解析による飛来距離算定では、以下のとおり保守的な評価結果が得られるような内容となっている。

実際の竜巻は、遠方から車両に近づくため、最大風速より低い風速（風洞実験の結果、浮上する限界風速は自動車のうちセダンで 51m/s ，ミニバンで 65m/s ⁽⁴⁾）で竜巻の外周部の低風速領域に移動する（第6図の上図参照）。

解析においては、車両が最大風速を受けるように、 51×51 台の車両の直上に竜巻を発生させ（第6図の下図参照）、移動又は飛来した車両の中から最も飛来距離が大きいものを最大飛来距離として算出している。



第6図 実際の竜巻による飛散と解析による飛散のイメージ

2. 車両退避で考慮する離隔距離の設定

最大飛来距離の算定の結果（第5表参照）、最大値を与えた「乗用車 ワゴン2」及び「軽自動車2」について、運用上考慮すべき離隔距離の設定について検討した。

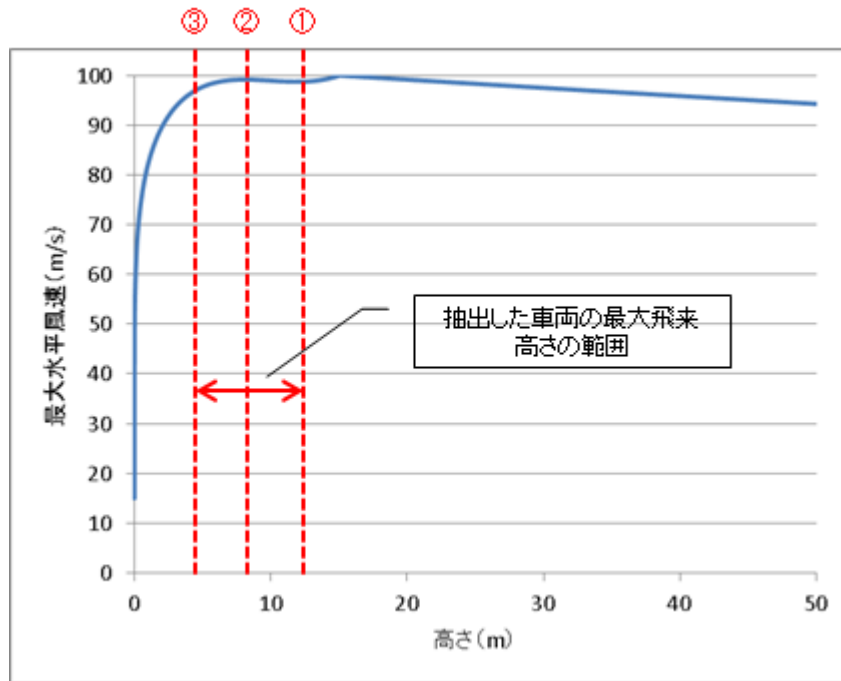
フジタモデルの最大水平風速の分布によると、現地調査により再処理事業所内をふかんした調査において抽出した車両の最大飛来高さ4.5m～12mの場合における風速は、最大風速100m/sと比較して1～5%程度低く、最大風速の0.95～0.99倍となる（第7図参照）。

運動エネルギーは速度の二乗に比例することから、保守性を考慮して、高さ4.5～12mにおける風速と最大風速の差の二乗分（ $0.95^2 \div 0.90$ ）の逆数を最大飛来距離170mに乘じ、結果として、運用上考慮すべき車両の離隔距離を200mとする。

第 5 表 最も大きい最大飛来距離を与える車両及び

最も低い最大飛来高さを与える車両の算定結果

	① 乗用車 ワゴン 2	② 軽自動車 2	③ 乗用車 ワゴン 1
最大飛来距離 (m)	170	170	90
最大飛来高さ (m)	12	8.5	4.5



第 7 図 水平最大風速の分布 (フジタモデル, 100m / s)

1～2の各段階において、考慮している保守的な条件を第6表に示す。

第6表 離隔距離設定に至る各段階で考慮した保守的条件

段階	保守的条件の考慮	設定内容
1. 1 竜巻の特性値の設定	—	日本の竜巻の観測記録等を参考としたガイドの考え方に基づいて設定（最大風速 100m / s）。
1. 2 飛来物（車両）の設定	○ [*]	より飛来しやすい形状である塊状物体の形状係数を用いて空力パラメータを算出
1. 3 解析に適した風速場モデルの選定	—	フジタモデルを設定。
1. 4 解析による飛来距離の算定	○ [*]	<ul style="list-style-type: none"> ・物体に働く揚力において C_{1a} の代わりに $C_D A$ を用いる（$C_{1a} < C_D A$）（浮き上がりやすい条件を設定）。 ・51×51台の車両のうち、飛来距離が最大となるものを算出（解析コードの保守性）。
2. 車両退避で考慮する離隔距離の設定	○	鉛直方向の風速分布を参考に、1.4の算定結果に対して裕度を考慮。

※ 当該部分の保守的条件は、ランキン渦モデルを用いる場合も同様に設定される。

3. 離隔距離

3.1 車両の衝撃荷重の設定及び離隔要否の判定基準の設定

車両が竜巻により飛来し、衝突した時の貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを算出し、竜巻防護対象施設を収納する建屋のうち壁厚がこれらを下回るものを車両からの離隔対象施設とする。

車両の最大水平速度はランキン渦モデルにより算出する。

(1) 貫通限界厚さ

飛来物による鉄筋コンクリートの貫通限界厚さ（ e ）は下式により求める。

$$e = \alpha_e e' \times 2.54$$

ただし、 $1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合、

$$\frac{e'}{d} = 0.69 + 1.29 \left(\frac{X}{d} \right)$$

$1.52 \geq X/d$ の場合、

$$\frac{e'}{d} = 2.2 \left(\frac{X}{d} \right) - 0.3 \left(\frac{X}{d} \right)^2$$

貫入深さ（ X ）は、 $X/d \leq 2.0$ の場合

$$\frac{X}{d} = 2 \left\{ \left(\frac{180}{\sqrt{f'_c}} \right) N d^{0.2} D \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5}$$

$X/d \geq 2.0$ の場合

$$\frac{X}{d} = \left(\frac{180}{\sqrt{f'_c}} \right) N d^{0.2} D \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1$$

である。ここで、

e : 貫通限界厚さ（c m）

- e' : D e g e n 式による貫通限界厚さ (i n)
 X : 貫入深さ (i n)
 d : 飛来物有効直径 (i n)
 f_c' : コンクリート圧縮強度 (設計基準強度を用
いる, l b f / i n ²)
 D : W / d^3 (l b f / i n ³)
 W : 飛来物重量 (l b f)
 V : 衝突速度 (f t / s)
 N : 飛来物先端形状係数 (0.72)
 α_e : 飛来物係数 (1.0)

である。

(2) 裏面剥離限界厚さ

飛来物による裏面剥離限界厚さ (s) は下式により求める。

$$s = 1.84\alpha_s \left(\frac{V_o}{V} \right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{(d^{0.2}f_c'^{0.4})} 30.48$$

ここで,

- s : 裏面剥離限界厚さ (c m)
 V_o : 飛来物基準速度 (200 f t / s)
 V : 衝突速度 (f t / s)
 M : 飛来物質量 (l b)
 d : 飛来物有効直径 (f t)
 f_c' : コンクリート圧縮強度 (設計基準強度を用
いる, l b f / f t ²)
 α_s : 飛来物係数 (1.0)

である。

現地調査で抽出した各車両の貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを第7表に示す。

第7表 車両による貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さ算出結果

飛来物	貫通限界厚さ (cm)	裏面剥離限界厚さ (cm)
大型バス	65	145
トラック	46	105
乗用車 普通	30	70
乗用車 ワゴン1	33	75
乗用車 ワゴン2	35	80
軽自動車1	27	65
軽自動車2	26	60

3. 2 車両からの離隔対象施設の選定

大型バスは、裏面剥離限界厚さ 145 c m が竜巻防護対象施設を収納する建屋の壁厚より大きいいため、飛来対策区域には駐車しない運用とする。なお、大型バスは構内を巡回しており、速やかに退避行動に移ることができる。

大型バス以外の車両は、裏面剥離限界厚さが最大 105 c m であり、第 8 表に示す竜巻防護対象施設を収納する建屋は壁厚が 105 c m を下回るため車両からの離隔対象施設とする。

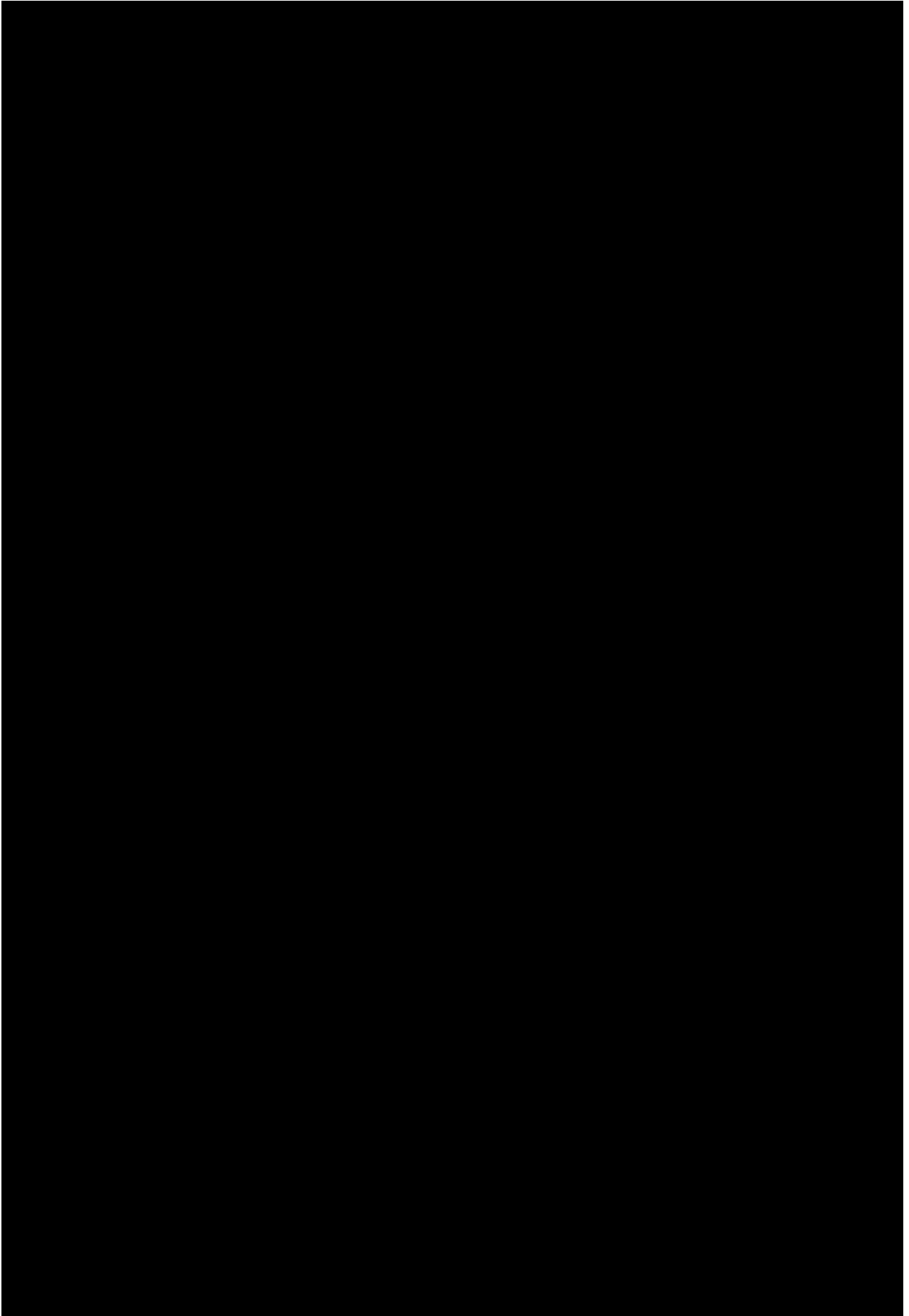
第 8 表 車両からの離隔対象施設の選定結果

竜巻防護対象施設を収納する建屋	外壁の厚さ (cm)	竜巻防護対象施設を収納する建屋	外壁の厚さ (cm)
ガラス固化体貯蔵建屋	45	ガラス固化体貯蔵建屋 B 棟	45

また、竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設を車両からの離隔対象施設に加える。

4. 飛来対策区域の設定

「2. 車両退避で考慮する離隔距離の設定」及び「3. 2 車両からの離隔対象施設の選定」より、飛来対策区域を第8図のとおり設定する。



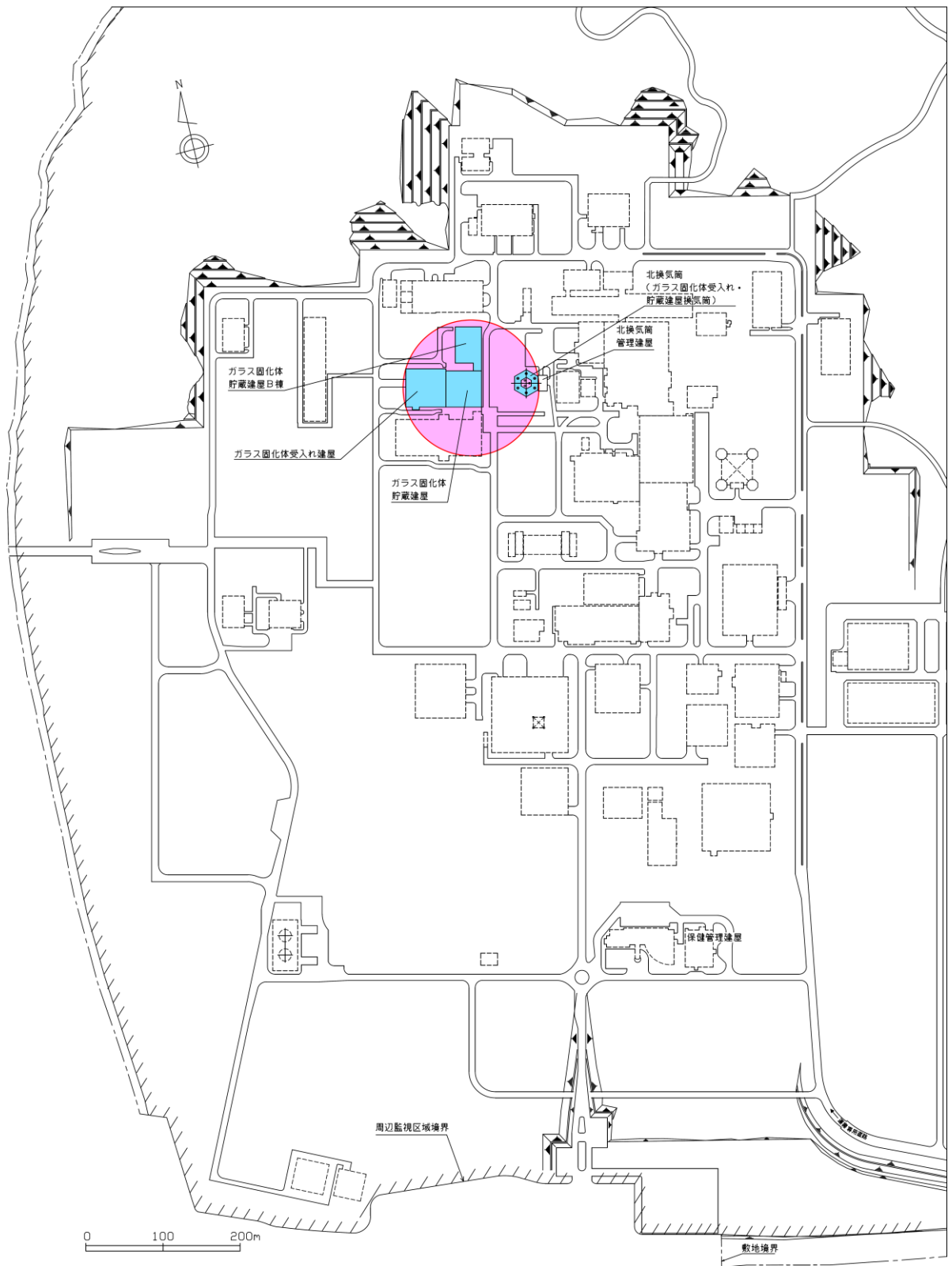
第 8 図 飛来対策区域

■については核不拡散の観点から公開できません。

5. フジタモデルを適用した解析における不確実性の補完について

フジタモデルの適用に係る定量的な検証は、佐呂間で発生したF3竜巻において確認しているものの、実際の竜巻現象に対する不確かさ、評価手法の不確かさを踏まえ、飛来距離の算定においては、以下のことを考慮し、不確実性を補うこととする。

- ・廃棄物管理施設での設計竜巻の最大風速は日本で過去に発生した最大級の竜巻を念頭に置き、 100m/s とすること。
- ・車両の飛来距離算定においても設計竜巻（最大風速 100m/s ）を前提とすること。
- ・車両の最大飛来距離の算定結果は 170m であるが、考慮する離隔距離は 200m とすること。
- ・飛来対策区域内の駐車場には車両が飛来物とならないように飛来防止対策を施すとともに、周辺防護区域内に駐車する車両については念のため同様な飛来防止対策を施すこと。
- ・固縛が困難な大型車両等については、十分距離が離れた周辺防護区域外の退避場所に退避すること。
- ・飛来対策区域の外の車両についても 周辺防護区域内であれば 所定の駐車場以外への駐車を禁止する運用とすること。



第 9 図 離隔対象施設と竜巻影響エリアの比較

また、建設中の工事用資機材（MOX燃料加工事業も含む）は、作業に必要な時を除いて固縛又は屋内収納を行うものとし、竜巻警戒（7.1参照）が発表された場合には、作業に必要な工事用資機材についても飛来物とならないように固縛を行うこと等の運用を定め管理を行う。

なお、MOX燃料加工施設においては、安全上重要な施設を版厚1.2mの鉄筋コンクリートの外壁を有する建屋に設置しており、MOX燃料加工施設の設計対処施設は、離隔対象施設には含まれない。

7. 車両の管理

7. 1 再処理事業所内の車両の管理について

竜巻への対応を円滑に行うため、「通常」、「竜巻警戒」及び「竜巻避難」の3段階に分けて対応を行う。

飛来対策区域における車両の運用は以下のとおりとする。

- (1) 駐車する場合は、予め竜巻により飛散しないよう固縛する。ただし、速やかに車両の移動が可能な場合を除く。
- (2) 竜巻避難の発表により、飛来対策区域内を走行または停車している車両の運転手は、速やかに退避または固縛を行い、近くの建物に退避する。
- (3) 周辺防護区域内への車両の入構に係る審査時には、車両の飛来距離の評価を行い、飛来距離が170m以下と評価される車両にのみ入構を許可する。
- (4) 入構を許可された車両の運転手には、車両の退避、固縛等に係る事項を周知する。また、既に許可を与えられた車両の運転手にも同様の内容を周知する。

7. 2 車両の飛来防止対策の概略イメージ

車両の飛来防止対策は，十分な強度を有する固縛装置で拘束する方法により実施する。

固縛装置による飛来防止は，車両が浮上するのを防止できる設計とする。



第 11 図 飛来防止対策イメージ

8. 参考文献

- (1) 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」
- (2) 原子力発電所の竜巻影響評価について，－設計風速および飛来物速度の評価－ 改定4，2014年9月9日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会
- (3) 原子力発電所の竜巻影響評価 平成26年12月12日(一社) 日本溶接協会 原子力プラント機器の健全性評価に関する講習会
- (4) T. Schmidlin et al., UNSAFE AT ANY (WIND) SPEED? Testing the Stability of Motor Vehicles in Severe Winds, pp. 1821-1830, vol.83, no.12, Bulletin of the American Meteorological Society, 2002.

以 上

令和 2 年 6 月 19 日 R3

補足説明資料 8 - 2 (8 条 竜巻)

車両の退避について

1. はじめに

竜巻発生予測の実績等から竜巻発生 15 分前には予測が可能であることを考慮して、竜巻襲来時の車両の退避時間の実現性を確認した。

2. 評価の前提条件

(1) 車両の種類と台数

周辺防護区域内にある車両を調査した結果を基とし、①社有車、②警備車両、③一時的に入構する作業車両（一時入構車両）④シャトルバスについて対象台数を以下のとおりとして退避時間の算定に用いた。

① 社有車

【使用目的】：周辺防護区域内で業務に従事する運転員等が、現場巡視等を目的として移動する手段として使用する車両。

【運用管理】：使用していない社有車は周辺防護区域外に駐車するか、飛来防止対策を施した駐車場所に駐車することで、竜巻襲来時の退避対応を必要としない運用とする。

社有車を使用して現場巡視先へ移動する場合は、飛来防止対策を施した駐車区域（固縛装置）に駐車する事で、竜巻襲来時の退避対応を必要としない運用

とする。

【車両台数】：調査結果より，周辺防護区域内に同時に存在する
最多車両台数は 56 台である。

② 警備車両

【使用目的】：警備員が周辺防護区域内のパトロール，立入制限
区域への入退域管理の対応のために移動する手段
として使用する車両。

【運用管理】：使用していない警備車両は，周辺防護区域外の駐
車区域に駐車することで，竜巻襲来時の退避対応を
必要としない運用とする。使用中の警備車両につい
ては，常時警備員が乗車するか，または警備員がす
ぐに車両に戻れる状態にすることで，竜巻襲来時に
は速やかに退避することができる運用とする。

【車両台数】：調査結果より，周辺防護区域内に同時に存在する
最多車両台数は 28 台である。

③ 一時入構車両

【使用目的】：周辺防護区域内で作業を行う一時立入者（工事作
業員，燃料油の給油作業員等）が，工事用資機材の
搬出入や燃料油の給油等を行うための車両。

【運用管理】：工事用資機材の搬出入作業や燃料油の給油作業に
あたっては，車両の運転手と作業員を別とすること
で，速やかに退避することができる運用とするか，
または，飛来防止対策を施した駐車区域に駐車する
ことで竜巻発生時の退避を必要としない運用とす
る。作業のない夜間，休日等には周辺防護区域内よ

り退去する運用とする。

【車両台数】：調査結果より，周辺防護区域内に同時に存在する
最多車両台数は 230 台である。

④ シャトルバス

【使用目的】：周辺防護区域内で業務に従事する職員及び協力会社職員等が，周辺防護区域内の移動を目的として使用する大型バス車両。

【運用管理】：使用していないシャトルバスは，周辺防護区域外に停車することで，竜巻襲来時の退避対応を必要としない運用とする。周辺防護区域内を巡回中のシャトルバスは，常に運転手が搭乗し，竜巻襲来時には速やかに退避することができる運用とする。

【車両台数】：調査結果より，周辺防護区域内に同時に存在する
最多車両台数は 3 台である。

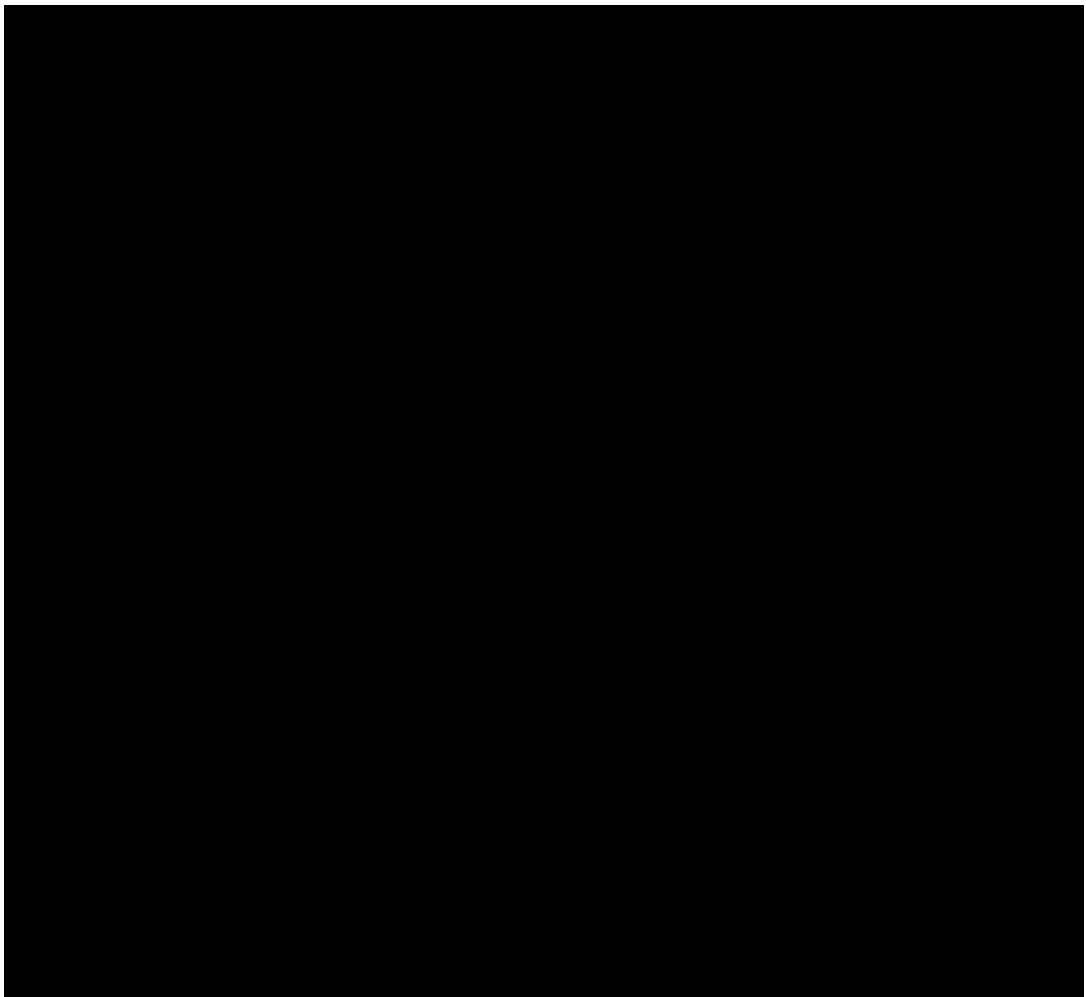
(2) 退避の対象となる車両の台数

退避対象車両数については，周辺防護区域内に同時に存在する最多車両総数から固縛装置に駐車する台数を除いた車両を対象とし，周辺防護区域内に同時に存在する最大車両総数(56台+28台+230台+3台)－周辺防護区域内の固縛装置設置数(132台分(予定))=185台を避難対象車両として退避時間の算定に用いる。

(3) 退避速度，距離

周辺防護区域外への車両の退避条件を，以下の通り設定した。

- ・ 周辺防護区域内道路の制限速度は 30 k m / h であるが，退避時間の算定にあたっては保守的に想定するため，全区間の平均速度を 20 k m / h とした。これは冬季（積雪や凍結）を考慮しても余裕のある速度である。
- ・ 各ゲートから最も遠い周辺防護区域内を走行または停車している車両から周辺防護区域外までの距離は，第 1 図に示す通りとし，メインゲート方向はサブゲート方向の導線に突き当たるまでの 1116m（走行所要時間 3 分 21 秒），サブゲート方向は 1886m（走行所要時間 5 分 40 秒）を移動距離として算定する。

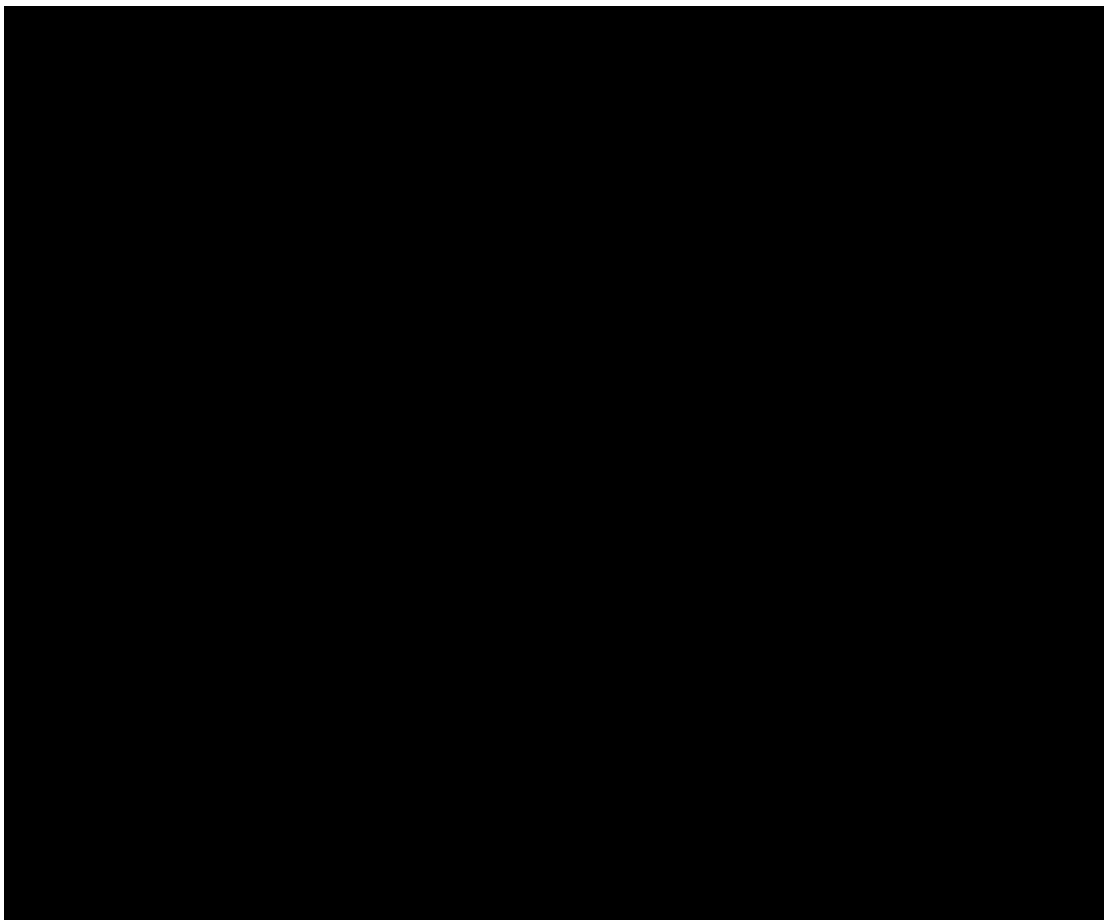


第 1 図 周辺防護区域内におけるメインゲート及びサブゲートまでの最長距離

■ については核不拡散の観点から公開できません。

(4) その他評価上の仮定

- ・ゲートから最も遠い場所に全退避車両が後ろ詰めで渋滞している状態で竜巻避難が発表された場合を想定し、退避時間を算定する。
- ・各ゲートは内側・外側共に開放し、退避車両をチェック無しで通過させるものとする。
- ・ゲートから最も遠い場所を基点にしてサブゲート側に 93 台、メインゲート側に 92 台が 10m 間隔で渋滞した場合を考慮する。
- ・上記車列について、メインゲート側及びサブゲート側の車はそれぞれ第 2 図に示す導線で各ゲートへ向かうものとする。

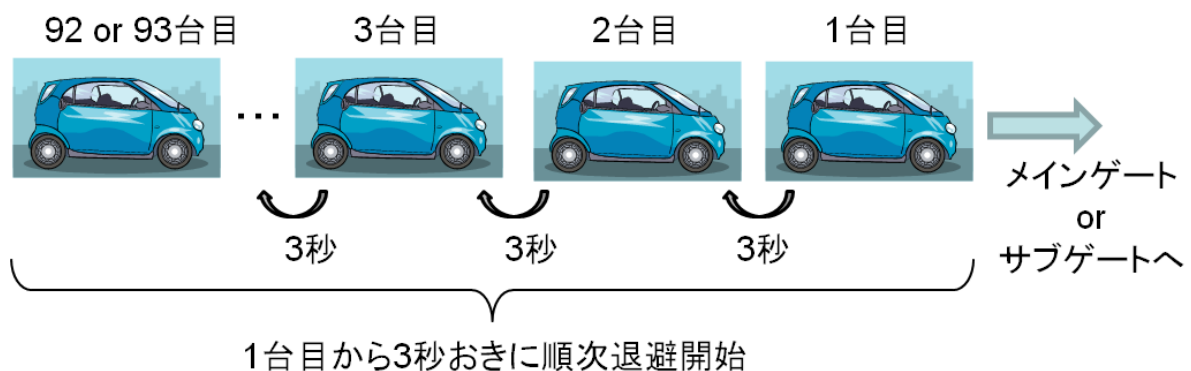


第 2 図 メインゲート及びサブゲートへの車両退避に

想定される渋滞状況

■ については核不拡散の観点から公開できません。

- ・ 周知・連絡のための時間は余裕を持って2分とする。
- ・ 各ゲートの開放にかかる時間は、竜巻避難が発表されてから1分（実測では45秒）とする。
- ・ 実際には先頭車両の発車と同時にゲート開放が始まるが、ゲートが開放されてから先頭車両が出発するものとする。
- ・ 車列先頭の車両から余裕を持って3秒に1台の間隔で順次発進することを想定する。第3図に車両退避イメージを示す。この時、最後尾の車両が発進するのはメインゲート側では先頭車両が発進してから4分33秒後（3秒間隔×91台＝273秒＝4分33秒）、サブゲート側では先頭車両が発進してから4分36秒後（3秒間隔×92台＝276秒＝4分36秒）となる。



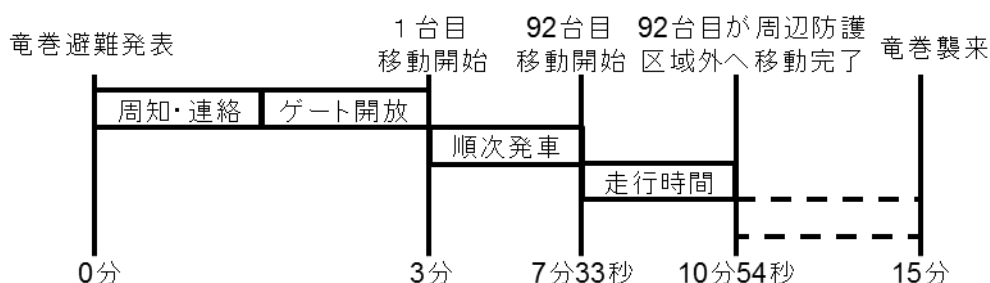
第3図 車両退避イメージ

3. 評価結果

評価結果は下記の通りとなり，竜巻避難が発表されてから 15 分以内に車両の退避が可能と評価した。メイン及びサブゲートの車両退避時間を第 4 図及び第 5 図に示す。

・メインゲート側：

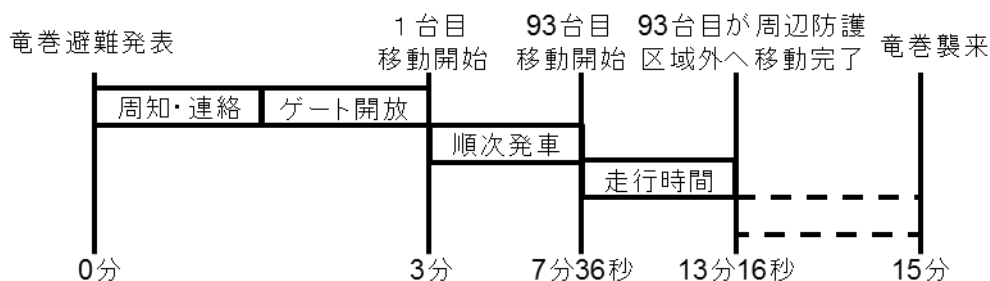
周知・連絡時間 2 分 + ゲート開放時間 1 分 + 最後尾車両が発車するまでの時間 4 分 33 秒 + 最後尾車両のメインゲート外までの走行所要時間 3 分 21 秒 = 10 分 54 秒。



第 4 図 メインゲートに向かう車両退避時間

・サブゲート側：

周知・連絡時間 2 分 + ゲート開放時間 1 分 + 最後尾車両が発車するまでの時間 4 分 36 秒 + 最後尾車両のメインゲート外までの走行所要時間 5 分 40 秒 = 13 分 16 秒。



第 5 図 サブゲートに向かう車両退避時間

以 上

令和 2 年 4 月 17 日 R2

補足説明資料 8 - 3 (8 条 竜巻)

竜巻襲来までに要する時間の設定の妥当性について

1. 基本方針

廃棄物管理施設の安全機能に影響を与えないよう、再処理事業所内に駐車及び停車している車両を固縛又は退避させる必要がある。竜巻による廃棄物管理施設の被害を防止するため、竜巻の兆候を早期に検知し、事前に準備をする必要がある。竜巻の兆候を早期に検知する方法として、気象庁から発表される雷注意報及びレーダーナウキャストによる予測を用いる。気象庁の監視体制は2013年3月のドップラーレーダー化完了により強化され、さらに研究も進んでいることから、今後さらなる予測精度の向上が見込まれる。よって以下の判断基準等については、今後もデータ及び知見等の収集に努め、より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し、改善を図っていくものとする。

2. 判断基準の定義

廃棄物管理施設への竜巻襲来に係る準備体制を判断する基準として、第1表に示す2段階の判断基準を設定する。

第1表 竜巻準備体制の判断基準

判断基準	定義
1	竜巻警戒（竜巻への注意喚起）
2	竜巻避難（竜巻襲来に備え資機材等の固縛，退避）

3. 各判断基準への対応

判断基準1及び判断基準2の条件，取るべき対応等を第2表に示す。また監視対象範囲は第1図に示す。

（1）判断基準1

<検知基準>

以下①及び②の2つの状況の「or」条件とする。

- ①雷注意報が発表される。監視対象範囲は六ヶ所村とする。
- ②竜巻発生確度ナウキャスト（以下「竜巻NC」という。）発生確度1が認められる。監視対象範囲は廃棄物管理施設を含む40km×40kmのメッシュ範囲とする。

<対応>

- ・再処理事業所内への周知
- ・屋外作業の一時中断
- ・車両退避の準備（運転者は車両に戻る。）

（2）判断基準2

< 検知基準 >

以下①及び②の2つの状況の「and」条件とし，監視対象範囲は再処理事業所及び濃縮・埋設事業所を含む最小メッシュ範囲とする。

①竜巻NCの発生確度2が認められる。監視対象範囲は再処理事業所上空を含む10km×10kmのメッシュ範囲とする。

②雷ナウキャスト（以下「雷NC」という。）の活動度3が認められる。監視対象範囲は再処理事業所上空の4km×4km範囲内とする。

< 対応 >

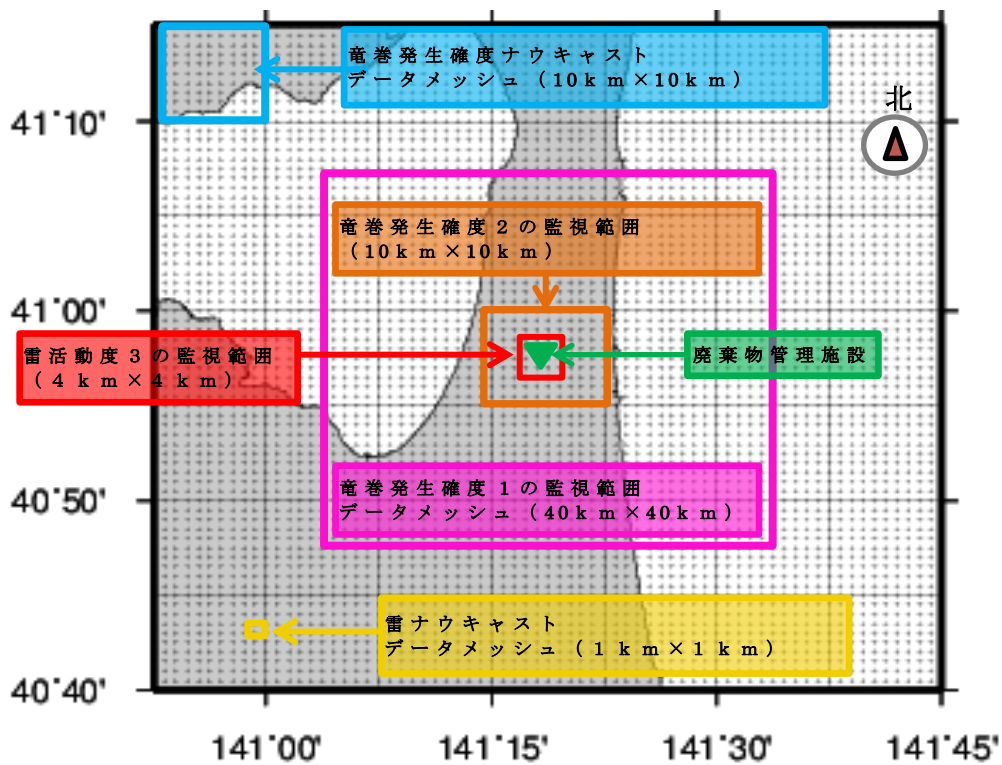
- ・ 屋外作業用資機材の固縛・撤去
- ・ 屋外作業員の屋内への避難
- ・ 車両退避

第2表 判断基準1及び判断基準2に対応する

アクション及び検知条件

	アクション	検知条件
判断基準1 (竜巻警戒 レベル)	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>再処理事業所内</u>への周知 ・ 屋外作業の一時中断 ・ 車両退避の準備（運転者は車両に戻る） 	雷注意報 又は 竜巻発生確度1
判断基準2 (竜巻避難 レベル)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋外作業用資機材の固縛又は撤去 ・ 屋外作業員の屋内への避難 ・ 車両退避 	竜巻発生確度2 かつ 雷活動度3

上記判断基準1及び判断基準2に係る情報を一般財団法人日本気象協会より提供いただき運用する。



第1図 判断基準1及び判断基準2における
検知基準の監視範囲

4. 判断基準に用いる気象情報の妥当性

気象庁から発表される情報発表時刻(雷注意報または竜巻発生確度1)から竜巻発生時刻までの時間差(以下「リードタイム」という。)をF1以上の竜巻について5分ごとに集計し、竜巻捕捉率として算出した。(第3表)集計するデータは、気象庁ホームページにて竜巻発生確度等の発表のデータが整理されている2010年～2015年を対象とした。全体としての竜巻捕捉率は100%と高く、時間経過に依存して竜巻捕捉率が減衰傾向を示す。リードタイム15分超における竜巻捕捉率は93%、さらにリードタイム30分超において竜巻捕捉率は84%といずれも高い捕捉率を示している。

第3表 F1以上の竜巻におけるリードタイム
ごとの竜巻捕捉率

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	計
発令なし・遅れ	0	0	0	0	0	0	0
5分以内	0	0	0	1	0	0	1
5分超～10分以内	0	0	0	1	0	0	1
10分超～15分以内	0	1	0	1	0	0	2
15分超～20分以内	1	0	0	2	0	0	3
20分超～25分以内	0	0	0	0	0	0	0
25分超～30分以内	1	0	1	0	0	0	2
30分超～35分以内	0	0	1	0	1	0	2
35分超～40分以内	1	0	0	0	0	0	1
40分超～45分以内	2	0	0	0	0	0	2
45分超～50分以内	1	0	0	0	2	2	5
50分超～55分以内	0	0	0	0	0	1	1
55分超～60分以内	0	1	1	0	0	0	2
60分超	0	3	7	16	3	6	35
計	6	5	10	21	6	9	57
全体	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5分超	100%	100%	100%	95%	100%	100%	98%
10分超	100%	100%	100%	90%	100%	100%	96%
15分超	100%	80%	100%	86%	100%	100%	93%
20分超	83%	80%	100%	76%	100%	100%	88%
25分超	83%	80%	100%	76%	100%	100%	88%
30分超	67%	80%	90%	76%	100%	100%	84%
35分超	67%	80%	80%	76%	83%	100%	81%
40分超	50%	80%	80%	76%	83%	100%	79%
45分超	17%	80%	80%	76%	83%	100%	75%
50分超	0%	80%	80%	76%	50%	78%	67%
55分超	0%	80%	80%	76%	50%	67%	65%
60分超	0%	60%	70%	76%	50%	67%	61%

藤田スケールの被害指標では、F3の場合には「自動車は持ち上げられ飛ばされる。」となっており、万一衝突した場合の影響が大きい車両が廃棄物管理施設に影響を及ぼす竜巻はF3以上と考えられるが、第4表のとおり、竜巻NC運用開始後に発生したF3スケール以上の竜巻については発生確度2が事前に出されていることから、「竜巻発生確度2」を用いることで、F3スケールの竜巻予測は可能と考えられる。

第4表 竜巻NCによるF3竜巻の予測実績

発生時間	発生箇所	竜巻発生確度 及び発令時間
2012.5.6 12:35～12:53	茨城常総市	確度2 (12:20)

また、雷は積乱雲内の上昇気流によって発生⁽¹⁾することから、雷NCも考慮に加えることとした。

強い竜巻は、スーパーセルと呼ばれる発達した積乱雲の下で発生する。竜巻発生確度2は、メソサイクロン（スーパーセル中にある水平規模数kmの小さな低気圧）の検出が条件となっているが、これはメソサイクロン付近で竜巻などの激しい突風の可能性がある⁽²⁾と判断されるためである。さらに降水強度を低めに見積もることによって、発達中の積乱雲から発生する突風を見逃さないようにしている。

積乱雲は成長期、成熟期及び衰退期の3段階のライフサイクルで形成、消滅⁽²⁾するが、このサイクル中で竜巻及び雷が発生するのは積乱雲が最も発達した成熟期であり、この成熟期の初期段階又は発達した積乱雲の接近を把握する方法として、雷NCを利用する。

雷は積乱雲内の上昇気流によって発生するため、落雷が発生している場所（活動度3以上の地域）は強い上昇気流場であると言えるが、雷NCの活動度3以上の場所は、既に対地放電が起きている強い放電密度を持った場所を示しており、強い雷雲の位置を示していることになる。

また、雷活動度の予測には盛衰傾向による補正が加えられており、現時点では成長期及び成熟期初期にある積乱雲に対して継続期間を考慮した予測がなされている。すなわち、単純な積乱雲の移動による雷の発生予測だけではなく、積乱雲の発達も考慮に加⁽²⁾えられている。

以上より、竜巻発生確度 2 及び雷活動度 3 以上の組み合わせを、竜巻発生の指標とすることは妥当であると判断した。

< 参考文献 >

(1) 大野久雄：雷雨とメソ気象（2001，東京堂出版）

(2) 雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と
利用方法（測候時報 78. 3 2011）

以 上

令和 2 年 4 月 17 日 R2

補足説明資料 8 - 4 (8 条 竜巻)

廃棄物管理施設

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)

(第八條 竜巻)

廃棄物管理施設は、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性を損なわれないものでなければならない。

<p>廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則</p>	<p>対象項目</p>	<p>区分</p>	<p>運用対策等</p>
<p>第八条 外部からの衝撃による損傷の防止</p>	<p>資機材，車両等の飛来物発生防止対策（固縛，固定，設計対処施設からの隔離，建屋内収納又は撤去）</p>	<p>運用・手順</p>	<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，飛来時の運動エネルギー等を評価し，設計対処施設への影響の有無を確認する。設計対処施設への影響を及ぼす資機材，車両等については，固縛，固定，設計対処施設からの隔離，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。
<p>体制</p>		<p>体制</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 担当課による保守・点検の体制
<p>保守・点検</p>		<p>保守・点検</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日常点検 ・ 定期点検 ・ 損傷時の修理
<p>教育・訓練</p>		<p>教育・訓練</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・手順，保守・点検に関する教育

<p>廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則</p>	<p>対象項目</p>	<p>区分</p>	<p>運用対策等</p>
<p>第八条 外部からの衝撃による損傷の防止</p>	<p>設計対処施設を防護するための操作・確認事項</p>	<p>運用・手順</p>	<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、設計対処施設を防護するための操作・確認、<u>修理</u>等が必要となる事項について手順等を定める。 <p>[操作・確認事項]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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廃棄物管理施設の運用・手順 <p>[修理]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 設備が損傷した場合の代替設備の確保及び<u>修理</u>，取替等の運用，手順
		<p>体制</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 担当課による作業中止等の実施体制 ・ 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 ・ 担当課による保守・点検の体制 ・ 担当課による損傷箇所<u>の修理体制</u>
		<p>保守・点検</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日常点検 ・ 定期点検 ・ 損傷時の<u>修理</u>
		<p>教育・訓練</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・手順，体制，保守・点検に関する教育

令和元年 12 月 9 日 R0

補足説明資料 8 - 5 (8 条 竜巻)

竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャストについて

1. 竜巻発生確度ナウキャストとは

10 k m 格子単位で「竜巻が発生する可能性の程度」を2つの階級（発生確度1, 2）で解析し, 10分ごとに1時間先までの予測を行うものであり, 気象庁より提供される。

竜巻などの激しい突風は, 規模が小さくレーダーなどの観測機器で直接実体を捉えることができないため, 竜巻をもたらす発達した積乱雲の中にある直径数キロのメソサイクロンの検出又は, 大気環境, 積乱雲の発生場所・発生状況から突風の発生可能性を表す指数「突風危険指数」が基準を満たした場合に発生確度の解析を開始し, 降水強度の解析と重ねて降水強度が強い格子を発生確度1, 2と判断する。

(1) 発生確度1

メソサイクロンの検出又は突風危険指数の基準を満たした(O R 条件) 格子の周辺 100 k m 範囲は「積乱雲が発生すれば突風の可能性がある」領域(発生確度1背景)と考え, この領域の降水強度が強い格子を「発生確度1」と判定する。

(2) 発生確度 2

メソサイクロンの検出及び突風危険指数の基準を満たした(A
ND条件) 格子の周辺 40 k m 範囲は「積乱雲が発生すれば突風の
可能性が発生確度 1 背景より高い」領域(発生確度 2 背景)と
考え, この領域の降水強度が強い格子を「発生確度 2」と判定す
る。

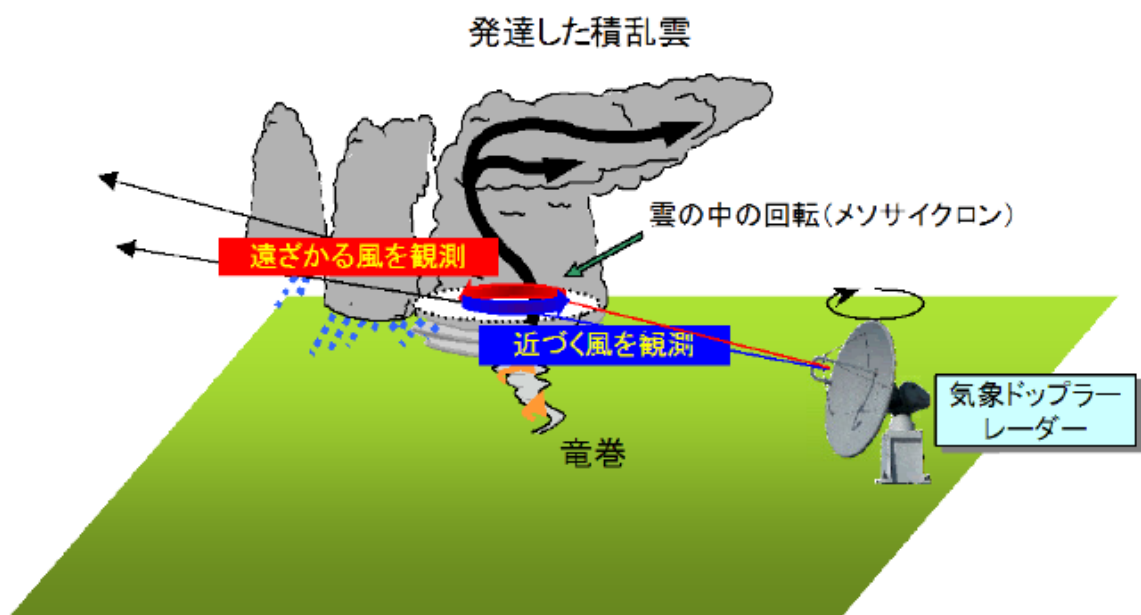


図 1 気象ドップラーレーダーによる積乱雲中の
メソサイクロンの検出⁽¹⁾

2. 雷ナウキャストとは

雷ナウキャストは, 雷の激しさや雷の可能性を 1 k m 格子単位
で解析し, 10 分ごとに 1 時間先までの予測を行うものであり,
気象庁より提供される。

雷の解析は, 雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー
観測などを基にして活動度 1 ~ 4 で表される。予測については,

雷雲の移動方向に移動させるとともに、雷雲の盛衰傾向も考慮している。

雷ナウキャストでは、雷監視システムによる雷放電の検知数が多いほど激しい雷が発生している（活動度が高い）としており、雷放電を検知していない場合でも、雷雲の特徴から雷雲解析するとともに、雷雲が発達する可能性のある領域も解析している。

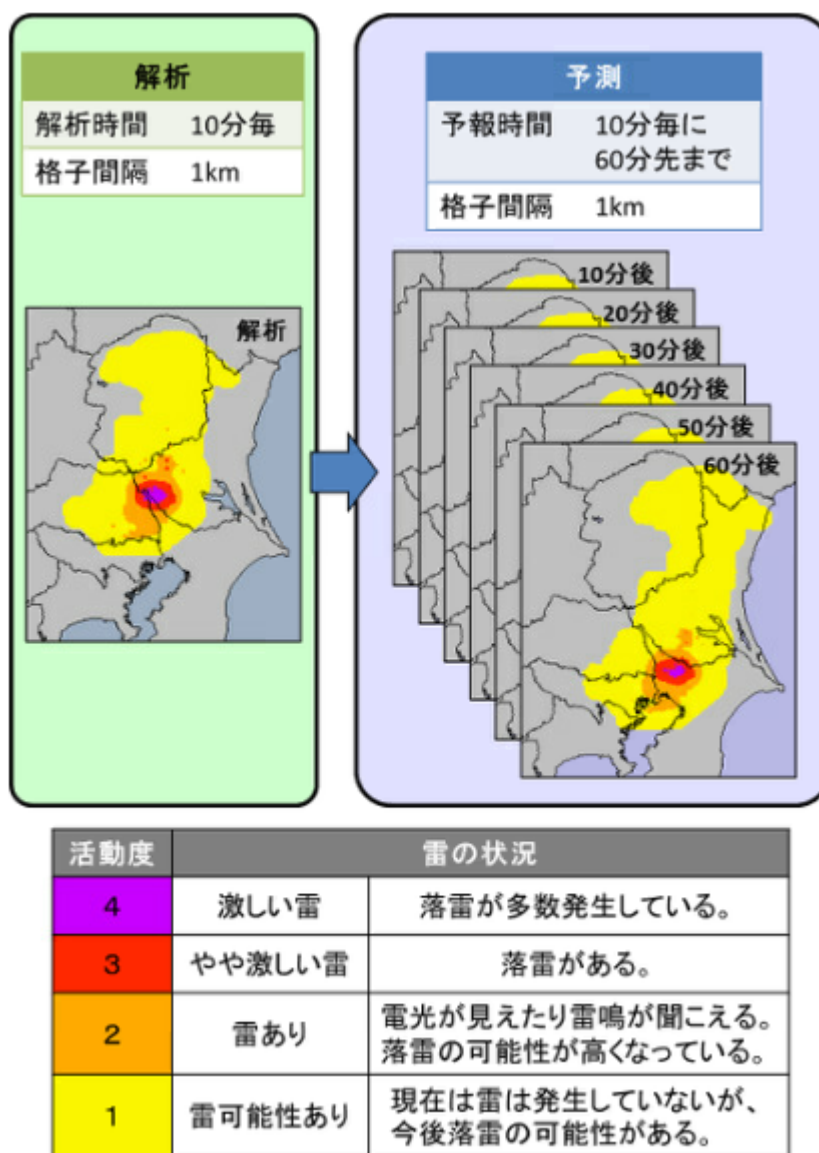


図2 雷ナウキャストの解析，予測及び活動度⁽²⁾

< 参考文献 >

(1) 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について

(平成 22 年 3 月気象庁)

(2) 雷ナウキャストとは 気象庁HP

以 上