

制定 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

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドについて次のように定める。

平成 25 年 6 月 19 日

原子力規制委員会

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について

原子力規制委員会は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を別添のとおり定める。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

平成25年6月
原子力規制委員会

目次

	頁
1. 総則	1
1.1 目的	1
1.2 適用範囲	2
1.3 関連法規等	2
1.4 用語の定義	3
2. 設計の基本方針	5
2.1 設計対象施設	5
2.2 設計の基本的な考え方	5
2.2.1 設計の基本フロー	5
2.2.2 設計対象施設に作用する荷重	6
2.2.3 施設の安全性の確認	7
3. 基準竜巻・設計竜巻の設定	8
3.1 概要	8
3.2 竜巻検討地域の設定	9
3.3 基準竜巻の設定	11
3.4 設計竜巻の設定	14
4. 施設的设计	18
4.1 概要	18
4.2 設計対象施設	18
4.3 設計荷重の設定	18
4.3.1 設計竜巻荷重の設定	18
4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定	23
4.4 施設の構造健全性の確認	23
4.4.1 概要	23
4.4.2 建屋、構築物等の構造健全性の確認	24
4.4.3 設備の構造健全性の確認	25
4.5 その他の確認事項	26
5. 竜巻随伴事象に対する考慮	27
5.1 概要	27
5.2 基本的な考え方及び検討事項	27
6. 附則	28
(参考文献)	29

1. 総則

1.1 目的

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。本ガイドは、当該規定に関連して、原子炉施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随件事象^(注1.1)等によって原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを設置許可段階において確認する一例として安全審査に活用することを目的とする。また、本評価ガイドは、竜巻影響評価の妥当性を審査官が判断する際に、参考とするものである。

設置許可段階の安全審査においては、以下の2点について確認する。

- ・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重^(注1.2)）が、本ガイドに示す基本的な方針を満足した上で適切に設定されていること。
- ・設計荷重に対して、竜巻防護施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。

(注 1.1) 竜巻及び竜巻と同時に発生する可能性のある雷、大雨、雹等、あるいはダウンバースト等に伴って発生し得る事象

(注 1.2) 2.2.2 (2) 参照

1.2 適用範囲

本ガイドは、設計で想定する竜巻及びその随件事象等によって原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを設置許可段階において確認する安全審査に適用する。

1.3 関連法規等

本ガイドは、以下の法律や基準類を参考としている。

(1) 国内

- ・核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年 6 月 10 日法律第 166 号）
- ・核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令（昭和 32 年 11 月 21 日政令第 324 号）
- ・建築基準法（昭和 25 年 5 月 24 日法律第 201 号）
- ・建築基準法施行令（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）
- ・実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）
- ・実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（原規技発第 1306193 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））

- ・基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド（原管地発第 1306192 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））
- ・日本工業規格
- ・日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987
- ・日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版
- ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2008 年版） JSME S NC1-2008
- ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2009 年追補版） JSME S NC1-2009
- ・日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2010 年追補版） JSME S NC1-2010
- ・日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2004）
- ・日本建築学会：原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2005）
- ・日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2010 年 6 月）
- ・日本建築学会：鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（2005 年 9 月）
- ・日本建築学会：鋼構造塑性設計指針（2010 年 2 月）
- ・土木学会：構造工学シリーズ 22 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計－基準体系の指針－（2013 年 1 月）

(2) 海外

- ・ IAEA : IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011
- ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : Appendix A to Part 50—General Design Criteria for Nuclear Power Plants
- ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1, March 2007
- ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.3.2 TORNADO LOADS, NUREG-0800, Revision 3 – March 2007
- ・ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.5.1.4 MISSILES GENERATED BY TORNADOES AND EXTREME WINDS, NUREG-0800, Revision 3 – March 2007

ほか

1.4 用語の定義

本ガイドで用いる用語の定義を以下に示す。

- ・ 竜巻防護施設 : 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類における S クラスの設計を要求される設備 (系統、機器)、建屋及び構築物等。
- ・ 安全機能 : 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類における S クラスの施設に要求される機能。
- ・ 原子炉施設 : 発電用軽水型原子炉施設。
- ・ 設計対象施設 : 本ガイドで設計の対象とする原子炉施設。
- ・ 基準竜巻 : 設計対象施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、設計対象施設の安全性に影響を与えるおそれがある竜巻。
- ・ 設計竜巻 : 原子力発電所が立地する地域の特性 (地形効果による竜巻の増幅特性等) 等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻に対して最大風速の割り増し等を行った竜巻。
- ・ 設計竜巻荷重 : 設計竜巻によって設計対象施設に作用する荷重。
- ・ 設計荷重 : 設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重。
- ・ 竜巻検討地域 : 原子力発電所が立地する地域及び竜巻発生観点から気象条件等が類似の地域。

- 藤田スケール： 1971年にシカゴ大学の藤田哲也博士が考案した竜巻等の規模を表す指標。藤田スケールは、通常、F0～F5までの区分が用いられ、区分ごとに風速の範囲が定義されている。
- 竜巻影響エリア：原子力発電所の号機ごとのすべての設計対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域に基づいて設定されるエリア。
- 設計飛来物： 設計竜巻によって設計対象施設に衝突し得る飛来物。
- 竜巻随伴事象： 設計竜巻等に伴い発生が想定され得る事象。
- ダウンバースト：積乱雲等から強い下降気流が生じて、竜巻と同様に局地的に突風を発生させる自然現象。
- スーパーセル： 上昇気流域における顕著な回転を伴う気流によって生じる巨大積乱雲。単一巨大積乱雲とも呼ばれ、竜巻、雹、大雨及びダウンバースト等を発生させる。

2. 設計の基本方針

2.1 設計対象施設

以下の（１）及び（２）に示す施設を設計対象施設とする。

（１）竜巻防護施設

「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統・機器）及び建屋・構築物等とする。

（２）竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画^(注 2.1)。

解説 2.1 設計対象施設

設計竜巻荷重は、基準地震動 S_s による地震荷重と同様に施設に作用するものと捉え、設計対象施設は、耐震設計上の重要度分類を引用して、耐震 S クラス施設及び耐震 S クラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設とした。ただし、竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる。

竜巻防護施設の例としては、原子炉格納容器や安全機能を有する系統・機器（配管を含む）等が考えられる。外殻となる施設等による防護機能が期待できる設計対象施設の例としては、原子炉格納容器に内包された安全機能を有する設備等が考えられる。

2.2 設計の基本的な考え方

2.2.1 設計の基本フロー

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

(注 2.1) 竜巻防護施設を内包する区画。

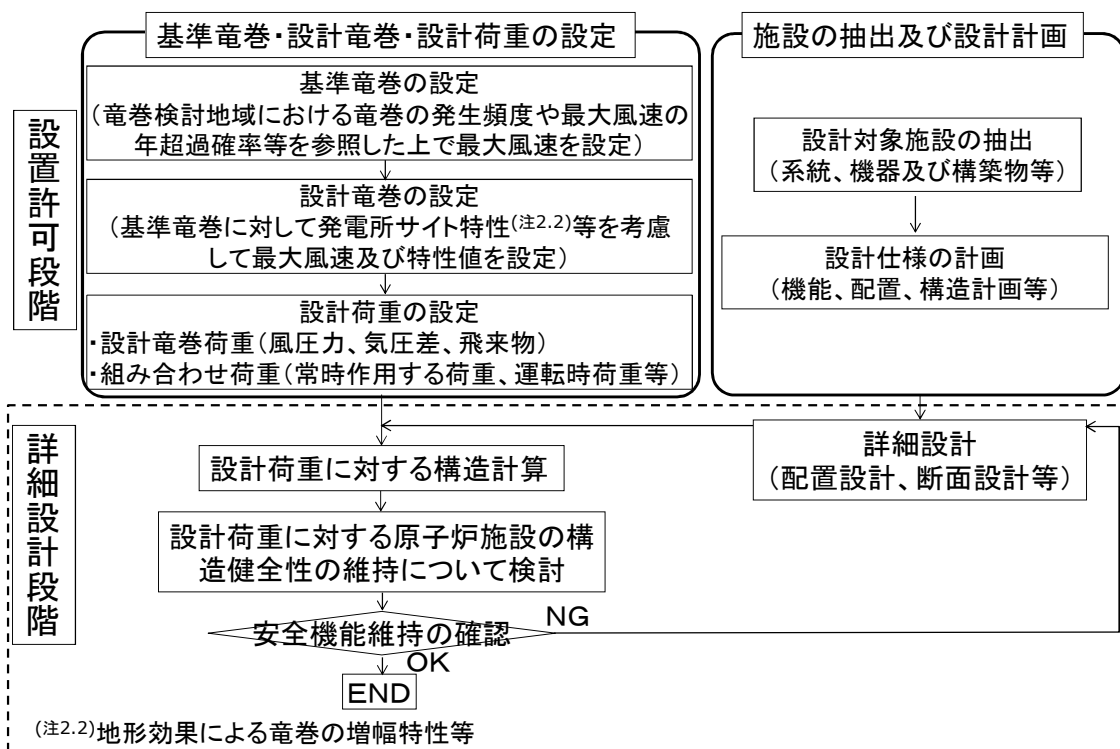


図 2.1 設計の基本フロー

解説 2.2.1 設計の基本フロー

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

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。

(1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

①風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

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

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

(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。

①設計対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等

②竜巻以外の自然現象^(注 2.3)による荷重、設計基準事故時荷重等

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。

2.2.3 施設の安全性の確認

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重、竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせ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。

(注 2.3) 竜巻との同時発生が想定され得る雷、雪、雹及び大雨等の自然現象を含む。

(注 2.4) 竜巻防護施設を内包する区画。

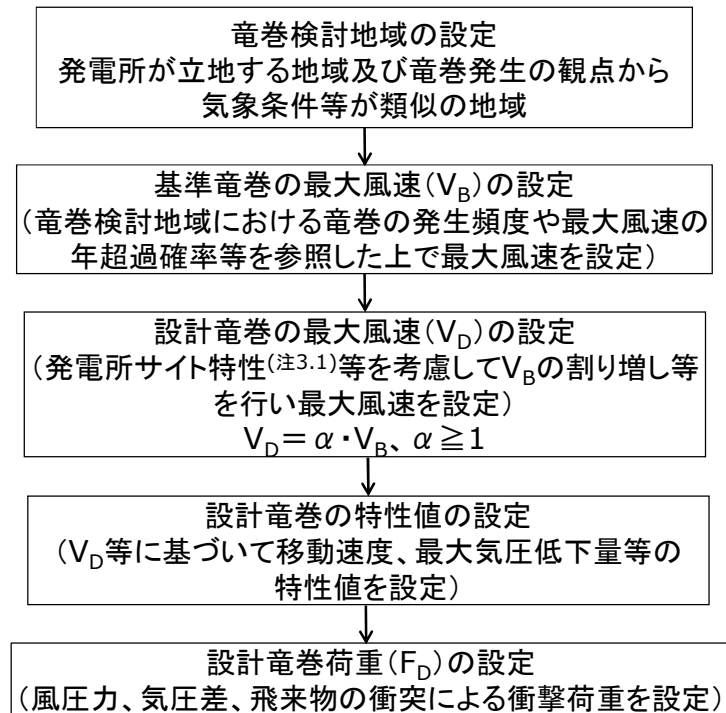
3. 基準竜巻・設計竜巻の設定

3.1 概要

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。

解説 3.1 基準竜巻・設計竜巻の最大風速の設定

設計竜巻荷重を設定するまでの基本的な流れは解説図 3.1 に示すとおりである。



解説図 3.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

(注 3.1) 地形効果による竜巻の増幅特性等

3.2 竜巻検討地域の設定

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観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似の地域から設定する。

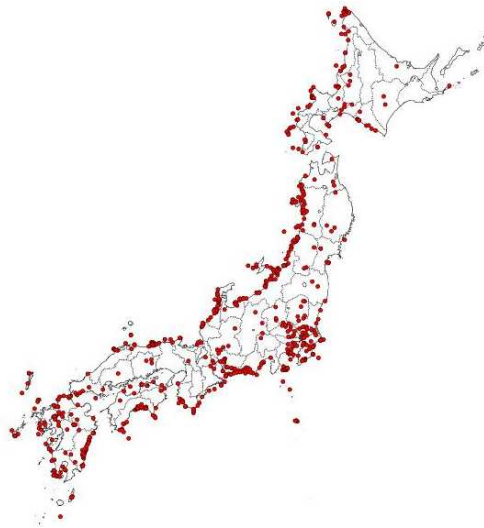
解説 3.2 竜巻検討地域の設定

(1) 基本的な条件

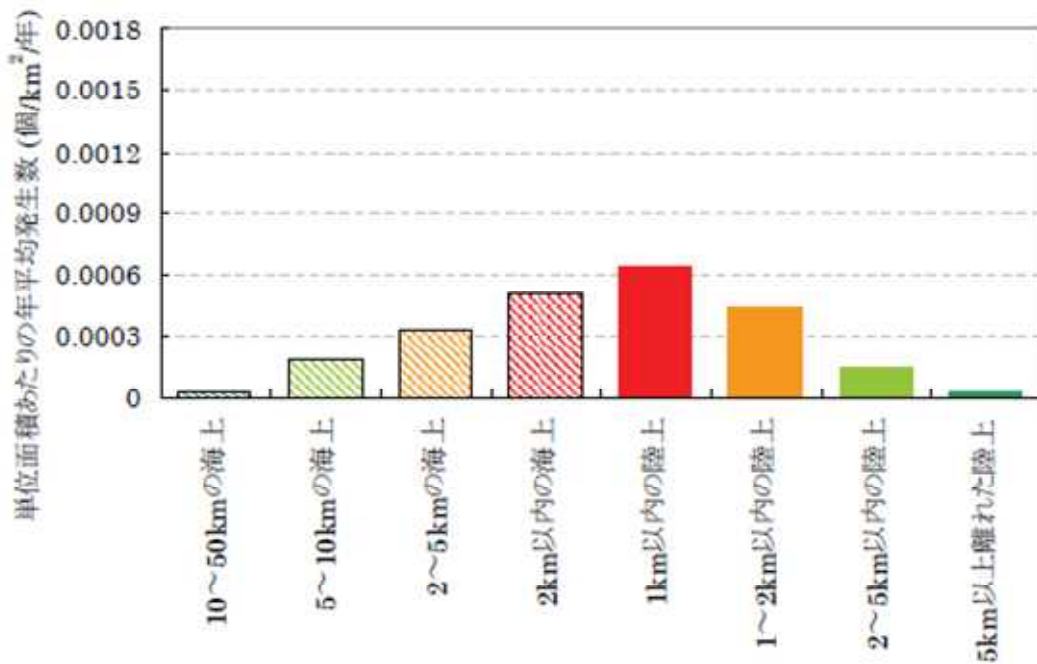
竜巻検討地域の設定にあたっては、IAEAの基準^(参1)が参考になる。IAEAの基準では、ある特定の風速を超過する竜巻の年発生頻度の検討にあたって竜巻の記録を調査する範囲として、およそ10万km²を目安にあげている。このIAEAの基準を参考として、竜巻検討地域を目安を、原子力発電所を中心とする10万km²の範囲とする。しかしながら、日本では、例えば日本海側と太平洋側とで気象条件が異なる等、比較的狭い範囲で気象条件が大きく異なる場合があることから、必ずしも10万km²に拘らずに、竜巻発生観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似する地域を調査した結果に基づいて竜巻検討地域を設定することを基本とする。

(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

解説図 3.2 に日本における竜巻の発生分布^(参2)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範囲を別途検討する必要がある。



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）^(参2)



解説図 3.3 日本の海岸線付近における竜巻の発生状況^(参3) ^(注 3.2)
 (1961～2009年12月、規模：F0以上)

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

3.3 基準竜巻の設定

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

(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。

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

①過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})

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

②竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})

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

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

解説 3.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

解説 3.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})の設定

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

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

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_{B1} を設定する場合において、これら過去最大級の竜巻を考慮しない場合には、その明確な根拠を提示する必要がある。

竜巻による被害状況から推定された最大風速を参照して設定された藤田スケールを用いて基準竜巻の最大風速を設定する場合は、藤田スケールの各区分 (F0~F5) の最大風速を用いる。解説表 3.1 に藤田スケールと風速の関係を示す。なお、風速計等によって観測

された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。

解説表 3.1 藤田スケールと風速の関係 (参5)

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

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_{B2}) の算定

既往の算定方法 (Wen&Chu^(参6)及び Garson et. al^(参7, 参8)) に基づいて V_{B2} 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_{B2} 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^(参3)が参考になる。

また、竜巻最大風速のハザード曲線の算定方法については、技術的見地等からその妥当性を示すことを条件として、いずれの方法を用いてもよいが、竜巻影響エリアの設定の基本的な考え方は、以下の「(1) 竜巻影響エリアの設定」に従うことを原則とする。

(1) 竜巻影響エリアの設定

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の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。

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。

(2) 竜巻の年発生数の確率分布の設定

竜巻の年発生数の確率分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいてポアソン過程等により設定することを基本とする。具体的には、竜巻検討地域を海岸線か

ら陸側及び海側それぞれ 5km の範囲に設定した場合は、少なくとも 1km 範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定し、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。

(3) 竜巻最大風速の確率密度分布の設定

竜巻最大風速の確率密度分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたっては、竜巻の年発生数の確率分布の設定と同様に、竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに区切ってそれぞれの範囲で確率分布を算定し、そのうちの V_{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。

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は、藤田スケールの各区分 (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。

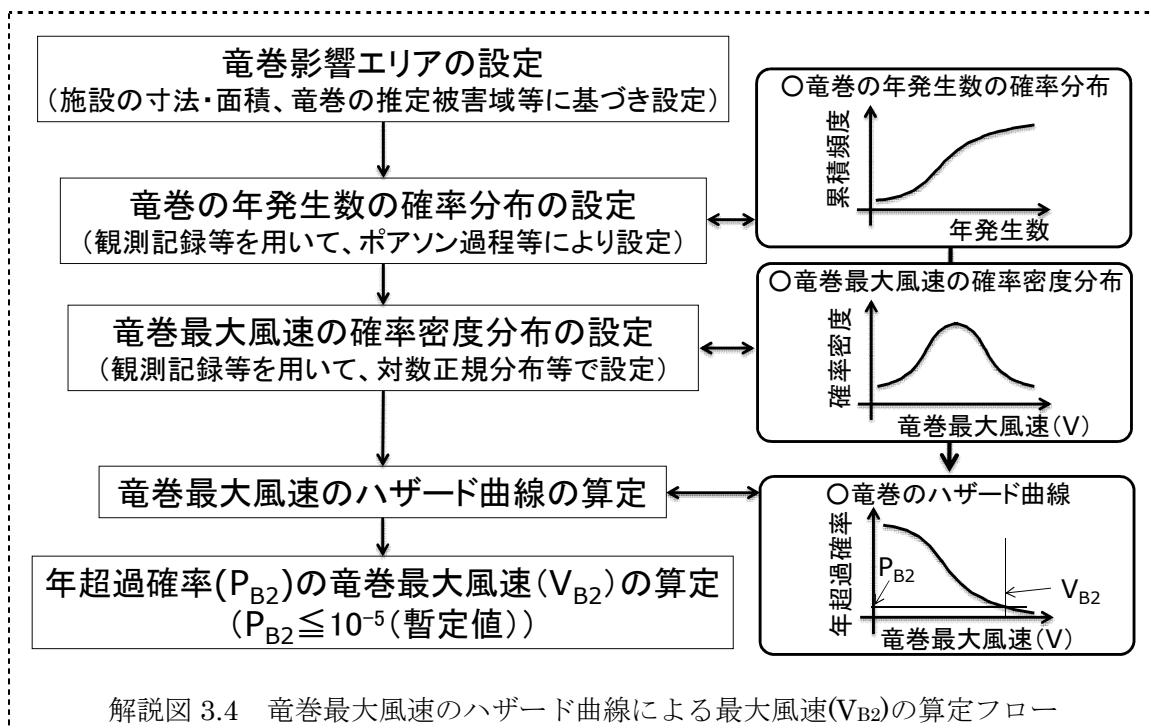
(4) 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

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。

(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。



3.4 設計竜巻の設定

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

- (1) 設計竜巻の最大風速(V_D)は、原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻の最大風速(V_B)の適切な割り増し等を行って設定されていること。なお、 V_D は、 V_B を下回らないものとする。
- (2) 設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速(V_D)、並びに竜巻検討地域において過去に発生した竜巻の特性等を考慮して適切に設定する。

解説 3.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) 及び特性値の設定

解説 3.4.1 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定で考慮する地形効果による竜巻の増幅特性

丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられる(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_D)を設定する。

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

解説 3.4.2 設計竜巻の特性値の設定

解説 3.4.2.1 概要

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

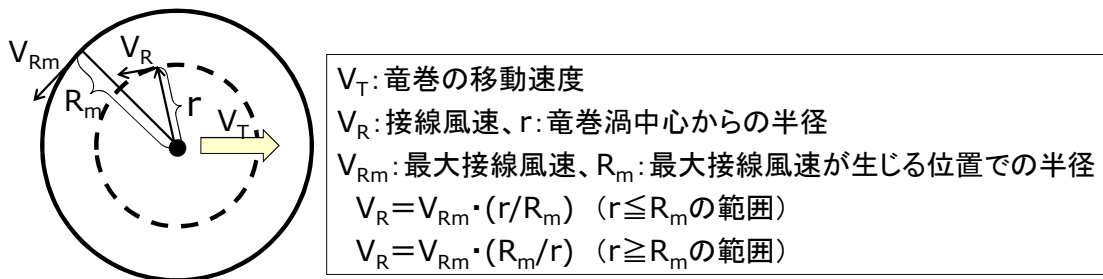
- (1) 移動速度 (V_T)
- (2) 最大接線風速 (V_{Rm})
- (3) 最大接線風速半径 (R_m)
- (4) 最大気圧低下量 (ΔP_{max})
- (5) 最大気圧低下率 (dp/dt)_{max}

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

解説 3.4.2.2 設計竜巻の特性値の設定に係る基本的な考え方

竜巻に関する観測データが不足している等の理由により、観測データ等に基づいた十分に信頼できる数学モデルの構築が困難な場合は、米国 NRC の基準類^(参 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。

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。



解説図 3.5 ランキン渦モデルの概要

解説 3.4.2.3 設計竜巻の特性値の設定

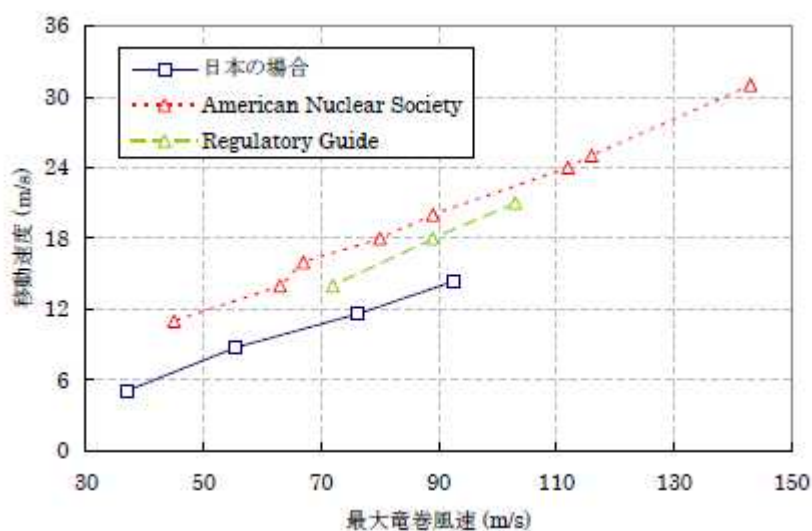
(1) 設計竜巻の移動速度(V_T)の設定

設計竜巻の移動速度(V_T)は、以下の算定式を用いて V_D から V_T を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \quad \dots \quad (3.1)$$

ここで、 V_D (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^(参 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^(参 4)による移動速度と比べて、同じ最大竜巻風速に対して小さい。解説図 3.6 に示される日本の竜巻に対する移動速度は、藤田スケールに基づいた区分 (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。

本ガイドでは、設計竜巻の最大速度(V_D)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に、観測記録の平均値に基づいた解説図 3.6 の日本の竜巻における移動速度と最大竜巻風速の関係に基づく(3.1)式を採用することにした。



解説図 3.6 竜巻の移動速度と最大風速の関係^(参 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^(参 4)を参考として、以下の算定式を用いて V_{Rm} を算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \quad \dots \quad (3.2)$$

ここで、 V_D (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^(参3)に準拠して以下の値を用いる。

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

(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^(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})を設定する。

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

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。

(5) 設計竜巻の最大気圧低下率($(dp/dt)_{\max}$)の設定

設計竜巻の最大気圧低下率($(dp/dt)_{\max}$)は、米国 NRC の基準類^(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。

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

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

4. 施設の設計

4.1 概要

設置許可段階の安全審査において以下を確認する。

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

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

4.2 設計対象施設

「2.1 設計対象施設」に示したとおりとする。

4.3 設計荷重の設定

4.3.1 設計竜巻荷重の設定

「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(1) 設計竜巻荷重」で示した「風圧力」、「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。

解説 4.3.1 設計竜巻荷重の設定

解説 4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定

解説 4.3.1.1.1 概要

設計竜巻の最大風速(V_D)等に基づいて、設計竜巻によって設計対象施設に作用する風圧力を設定する。

解説 4.3.1.1.2 基本的な考え方

(1) 風圧力の算定に用いる風力係数

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

(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力

竜巻による最大風速は、一般的には、竜巻によって生じた被害状況と対応する水平方向の風速として算定される。しかしながら、実際の竜巻によって生じた被害は、少なからず鉛直方向の風速の影響も受けていると考えられる。

よって、本ガイドでは、設計竜巻の水平方向の最大風速(V_D)には、鉛直方向の風速の影響も基本的には含まれているとみなす。

ただし、鉛直方向の風圧力に対して特に脆弱と考えられる設計対象施設が存在する場合は、 V_D を入力値とした竜巻の数値解析結果等から推定される鉛直方向の最大風速等に基づいて算定した鉛直方向の風圧力を考慮した設計を行う。

解説 4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の最大風速(V_D)による風圧力(P_D)の算定について以下に示す。

設計竜巻の水平方向の最大風速によって設計対象施設（屋根を含む）に作用する風圧力(P_D)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を準用して、下式により算定する。

なお、(4.2)式の V_D 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。

$$P_D = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots \quad (4.1)$$

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

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2 \quad \dots \quad (4.2)$$

ここで、 ρ は空気密度、 V_D 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_D)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_D)は、最大瞬間風速として扱うことから $G=1.0$ を基本とする。

風力係数(C)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を参考として、施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて適切に設定する。

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

解説 4.3.1.2.1 概要

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

解説 4.3.1.2.2 基本的な考え方

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

- ・完全に開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・壁及びタンクの頂部・胴部等）に外向きに作用する圧力が生じるとみなせる。
- ・部分的に閉じた施設（通気がある施設等）については、竜巻通過中の気圧変化により施設に作用する圧力は複雑な過程により決定される。また、部分的に閉じた設計対象施設への圧力値・分布の精緻な設定が困難な場合は、施設の構造健全性を評価する上で厳しくなるように作用する圧力を設定することとする。

解説 4.3.1.2.3 気圧差による圧力を作用させる施設の設定

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

(1) 建屋・構築物等

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

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

(2) 設備

設備の主要な部材に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による

圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の設備については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該設備が破損した場合の安全機能維持への影響についても確認を行うこととする。

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

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

解説 4.3.1.3.1 概要

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

解説 4.3.1.3.2 基本的な考え方

竜巻等の突風による被害は、風圧力によって引き起こされるだけでなく、飛来物による被害もかなりの部分を占める。また、竜巻による飛来物は上昇気流の影響もあって比較的遠方まで運ばれる可能性がある。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がある飛来物について検討を行った上で、設計飛来物を選定あるいは設定する。

一般的には、遠方からの飛来物は相対的に重量が軽いものが多く、仮に衝突した場合でも衝撃荷重は相対的に小さいと考えられることから、設計対象施設に到達する可能性がある飛来物を検討する範囲は、原子力発電所の敷地内を原則とする。ただし、原子力発電所の敷地外からの飛来物による衝撃荷重が、原子力発電所の敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定され得る場合は、原子力発電所の敷地外からの飛来物も考慮する。

また、設計飛来物として、最低限以下の①～③を選定あるいは設定することとする。なお、以下の①～③の設定にあたっては、米国 NRC の基準類^(※13)を参考とした。

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

解説 4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定

(1) 基本的な考え方

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

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

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

ここで、 MV_{Hmax} は、設計飛来物の最大水平速度を表す。

(2) 設計飛来物の設定例

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

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

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 MV_{Hmax} (m/s)	49	57	30	60	34
最大鉛直速度 MV_{Vmax} (m/s)	33	38	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。

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

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

ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。

W_{T1} 、 W_{T2} : 設計竜巻による複合荷重

W_w : 設計竜巻の風圧力による荷重

W_p : 設計竜巻による気圧差による荷重

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

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

4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

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

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。

(注 4.1) 竜巻防護施設を内包する区画。

4.4.2 建屋、構築物等の構造健全性の確認

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

(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定

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

(2) 構造健全性の確認

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

① 竜巻防護施設（外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)に対して適切な安全余裕を有している。

② 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

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

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

(注 4.2) 建築基準法、日本工業規格、日本建築学会及び土木学会等の規準・指針類、並びに日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）等に準拠する。

(注 4.3) 竜巻防護施設を内包する区画。

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

4.4.3 設備の構造健全性の確認

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

（１）設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定

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

（２）構造健全性の確認

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

①竜巻防護施設（外殻となる施設等による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く）

設計対象施設が許容応力度等に基づく許容限界^(注4.5)に対して適切な安全余裕を有している。

②竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

1)設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.6)が、許容応力度等に基づく許容限界^(注4.5)に対して適切な安全余裕を有している。

2)設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画^(注4.6)に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。^(注4.7)

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

(注 4.6) 竜巻防護施設を内包する区画。

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

4.5 その他の確認事項

4.4に示す以外の確認事項については、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。例えば、中央制御室等の重要な区画等や非常用発電機等の重要な設備等に繋がる給排気ダクト類へ作用する風圧力が安全機能維持に与える影響等、安全機能維持の観点から重要と考えられる確認事項を設定する。そして、それぞれの項目について検討を行い、安全機能が維持される方針であることを確認する。

5. 竜巻随伴事象に対する考慮

5.1 概要

竜巻随伴事象に対して、竜巻防護施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。

5.2 基本的な考え方及び検討事項

検討対象とする竜巻随伴事象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。

ただし、竜巻随伴事象として容易に想定される以下の事象については、その発生の可能性について検討を行い、必要に応じてそれら事象が発生した場合においても安全機能が維持される方針であることを確認する。

(1) 火災

設計竜巻等により燃料タンクや貯蔵所等が倒壊して、重油、軽油及びガソリン等の流出等に起因した火災が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。

(2) 溢水等

設計竜巻による気圧低下等に起因した使用済燃料プール等の水の流出、屋外給水タンク等の倒壊による水の流出等が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。

(3) 外部電源喪失

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。

6. 附則

この規定は、平成25年7月8日より施行する。

本ガイドに記載されている以外の計算方法等を設計で使用する場合は、技術的見地等からその妥当性を示す必要がある。

また、竜巻等の発生頻度、特性及びメカニズム等に関する情報、並びに竜巻等による被害の実情に関する情報等が不足している現在の日本の状況では、竜巻等に係る最新情報の調査・入手に努めるとともに、本ガイドは、最新情報を反映して適宜見直しを行うものとする。

なお、将来に観測された竜巻の最大風速が、過去に観測された竜巻の最大風速を上回った場合は、本設計の妥当性について再度見直すこととする。

(参考文献)

- (1) IAEA : IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011
- (2) 気象庁：竜巻分布図（全国：1961-2011年）、2012.8.24作成、
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/bunpu/bunpuzu.html>
- (3) 東京工芸大学：「平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度） 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書、平成23年2月
- (4) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1, March 2007
- (5) 気象庁：気象等の知識、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado1-5.html>
- (6) Wen.Y.K and Chu. S.L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division 99, 2409 - 2421.
- (7) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp.1167 – 1171
- (8) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : “Tornado Design Winds Based on Risk,” Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp.1883-1897
- (9) 佐々浩司、山下賢介：佐呂間竜巻の地形効果に関する模擬実験、日本気象学会大会講演予講集、92号、p.224、2007.9.
- (10) 佐々浩司：自走する竜巻の模擬実験、京都大学 数理解析研究所講究録、1454巻、p.p.88-95、2005年
- (11) 片岡浩人：数値流体計算による竜巻状旋回気流に与える地形影響の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、2012.9
- (12) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.3.2 TORNADO LOADS, NUREG-0800, Revision 3 – March 2007
- (13) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.5.1.4 MISSILES GENERATED BY TORNADOES AND EXTREME WINDS, NUREG-0800, Revision 3 – March 2007