

HTTR 原子炉施設
設置許可基準規則への適合性について
第 6 条(竜巻)

令和 2 年 6 月 12 日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高温ガス炉研究開発センター
高温工学試験研究炉部

第6条：外部からの衝撃による損傷防止（竜巻）

<目次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 設置許可申請書における記載
 - 1.3 設置許可申請書の添付書類における記載
 - 1.3.1 安全設計方針
 - 1.3.2 気象等
 - 1.3.3 設備等

2. HTRR 原子炉施設の竜巻防護（適合性説明資料）

< 概 要 >

試験研究用等原子炉施設の設置許可基準規則の要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する HTTR 原子炉施設の適合性を示す。

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、設置許可基準規則第6条の要求事項を明確化する（表1）。

表1 設置許可基準規則第6条 要求事項

設置許可基準規則 第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）	備考
1 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。	
2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。	
3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される試験研究用等原子炉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。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。	

1.2 設置許可申請書における記載

1.2.1 位置、構造及び設備

ロ. 試験研究用等原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

(i) 原子炉施設は、(1) 耐震構造、(2) 耐津波構造に加え、次の基本方針のもとに安全設計を行う。

a. (外部からの衝撃による損傷の防止)

安全施設は、原子炉施設敷地で予想される自然現象(洪水・降水、風(台風)、竜巻、凍結、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災)又はその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原子炉施設で生じ得る環境条件においても安全機能を損なわない設計とする。

上記に加え、重要安全施設は、科学的技術的知見を踏まえ、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生じる応力をそれぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して、適切に組み合わせる。

また、安全施設は、敷地及びその周辺において想定される原子炉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(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)に対して安全機能を損なわない設計とする。

想定される自然現象及び原子炉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に対しては、必要に応じて設備と運用による対策を組み合わせた措置を講じることにより、安全施設が安全機能を損なわない設計とする。また、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等への措置を含める。

1.3 設置許可申請書の添付書類における記載

1.3.1 安全設計方針

(1) 設計方針

1. 安全設計

1.1 安全設計の方針

1.1.1 安全設計の基本方針

1.1.1.4 外部からの衝撃

安全施設は、原子炉施設敷地で想定される洪水、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。)が発生した場合においても、安全機能を損なわない設計とする。また、自然現象の組合せにおいては、風(台風)、積雪及び火山の影響による荷重の組合せを考慮した設計とする。

上記に加え、重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生じる応力を適切に考慮した設計とする。

さらに、安全施設は、原子炉施設敷地内又はその周辺において想定される飛来物(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、電磁的障害等の原子炉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、安全機能を損なわない設計とする。

1.2.1 高温工学試験研究炉の特徴

安全上の重要度分類を定めるに当たり、考慮する高温工学試験研究炉の主要な特徴は、次のとおりである。

- (1) 発電用軽水炉と比べて、原子炉の熱出力、発熱密度は低く、原子炉の炉心で蓄積される核分裂生成物の量は少ないため、潜在的リスクは小さい。一方、水冷却型試験研究用原子炉と比べ冷却材の温度、圧力が高いことを考慮する必要がある。
- (2) 原子炉は、セラミックス等で多重被覆した被覆燃料粒子、減速材及び構造材として黒鉛、冷却材としてヘリウムガスを用いる。

燃料は、耐熱性に優れ、燃料最高温度が1,600℃以下ならば核分裂生成物の保持機能が損なわれることはない。

炉心構造物の黒鉛は、耐熱性に優れ、高温でも炉心構成材としての健全性を保つことができる。

ヘリウムガスは、化学的に不活性で構造材との化学反応はない。また、冷却材の相変化による冷却条件の急激な変化はない。

- (3) 炉心は、発熱密度に比して大きな熱容量を有し、出力の過渡変化及び冷却能力の異常な低下に対する炉心構成要素の温度変化が少なく、かつ、緩慢である特性を有する。

事故時の炉心の温度上昇は発電用軽水炉に比べると極めて緩慢であり、事故の拡

大を防止するための処置をとる時間的余裕が大きい。

- (4) 万一、冷却材喪失時に制御棒が挿入されなくても、固有の特性により原子炉の核出力は低下する。この場合に、炉心の強制冷却を行わなくても、原子炉圧力容器外面からの熱除去により炉心からの残留熱除去が可能である。

高温工学試験研究炉を用いた安全性実証試験(特殊運転として実施)によって、炉心流量が喪失した場合に制御棒挿入操作を行わなくても、各種の制限値を上回ることなく、固有の特性により原子炉が安定な状態に維持されることが実証されている。

1.3 重要安全施設の設定

1.3.1 選定の基本方針

重要安全施設は、安全機能を有する安全施設のうち特に安全機能の重要度が高いものであり、試験炉設置許可基準規則第6条第2項、第12条第2項及び第28条第1項の要求事項を満たす設計とする。

選定に当たっては、以下に示す高温工学試験研究炉の固有の安全性を考慮した安全確保のために必要な機能(「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」及び「使用済燃料冷却」)を確保できるよう考慮する。

- ① 原子炉の緊急停止機能
- ② 放射性物質の閉じ込め機能(原子炉冷却材圧力バウンダリ及び周辺公衆へ過度の被ばくを及ぼす可能性のある系統)
- ③ 原子炉の停止及び放射性物質の閉じ込めの状態監視に必要な監視機能
- ④ 原子炉建家使用済燃料貯蔵プールの貯蔵機能

なお、炉心冷却機能について、高温工学試験研究炉では、炉心の形成の維持ができれば、原子炉の固有の安全性から自然放熱により炉心の冷却が可能である。

1.3.2 第6条に関する重要安全施設

試験炉設置許可基準規則第6条第2項に規定されている重要安全施設(以下「第6条に関する重要安全施設」という。)は、試験炉設置許可基準規則の解釈に従い、「研究炉の重要度分類の考え方」の「4.(1)自然現象に対する設計上の考慮」を参考に、次の系統を選定する。

- ① クラス1
- ② PS-2のうち機能喪失した場合に周辺公衆へ過度の被ばくを及ぼす可能性のある系統及びMS-2のうち設計基準事故時にプラント状態を把握する機能を有する系統

上記の系統は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮する設計とする。

第6条に関する重要安全施設を第1.3.1表に示す。

1.8 竜巻防護

1.8.1 竜巻防護に関する基本方針

原子炉施設は、供用期間中に極めてまれであっても、その発生により原子炉施設に影響を与える竜巻として「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下「竜巻評価ガイド」という。）⁽¹⁾を参考に想定した竜巻に対して原子炉の安全性を損なわない設計とする。想定する竜巻に対しては、設備と運用による対策を組み合わせ、安全確保上重要な原子炉の「停止」、「冷却」、「閉じ込め」及び「使用済燃料冷却」機能を損なわない設計とする。このため、竜巻に対して防護する安全機能として、高温工学試験研究炉の特徴を考慮した原子炉の緊急停止機能、放射性物質の閉じ込め機能（原子炉冷却材圧力バウンダリ及び周辺公衆に過度の被ばくを与える可能性のある系統）及びそれらに必要な監視機能並びに使用済燃料の貯蔵機能を抽出する。

なお、炉心冷却機能については、原子炉の停止後は原子炉の固有の安全性により、自然放熱による炉心の冷却が可能であること、及び使用済燃料の冷却機能については、冷却機能が喪失しても十分な時間的余裕をもって貯蔵機能が維持できることから防護する安全機能として抽出しない。

竜巻から防護する施設（以下「竜巻防護施設」という。）は「第1.2 安全機能の重要度分類」に示すクラス1及びクラス2に属する構築物、系統及び機器のうち、防護する安全機能を有するものとして第1.3.1表に示す重要安全施設並びに使用済燃料貯蔵建家の貯蔵セル及び貯蔵ラックを選定し、竜巻の影響を評価し、安全機能を損なわない設計とする。評価に当たっては、竜巻防護施設を内包する原子炉建家及び使用済燃料貯蔵建家を対象とする。なお、建家が損傷する可能性がある場合には、その損傷の影響により竜巻防護施設が安全機能を損なわないことを評価し設計する。

竜巻に対しては、原子炉施設に影響が及ぶ前に原子炉の停止操作を講じるとともに、停止後の状態及び使用済燃料の冷却の状態を監視する。これらの状態の監視に必要な電源は竜巻防護施設である直流電源設備の蓄電池から供給する設計とし、さらに蓄電池の枯渇後（60分以降）は、可搬型計器、可搬型発電機等を用いて、商用電源が復旧するまでの間、必要な監視を継続して行う。

竜巻防護施設以外のクラス2及びクラス3に属する構築物、系統及び機器は、竜巻による損傷を受けたとしても原子炉は安全に停止・維持でき、また放射性物質の閉じ込め及び使用済燃料の貯蔵は確保できることから、竜巻による影響を評価する対象とせず、代替措置や修復等の対応により必要な機能を確保する。

1.8.2 竜巻の影響に対する設計方針

竜巻評価ガイド⁽¹⁾を参考にして設定した設計竜巻の最大風速は92m/sとする。なお、竜巻の影響に対する設計に当たっては、設計竜巻の最大風速92m/sに余裕を考

慮して最大風速 100m/s を用いる。また、竜巻評価ガイド⁽¹⁾を参考にして設定した最大接線風速は 85m/s とする。

設計飛来物は、現地調査により抽出した建家に衝突する可能性がある飛来物について、竜巻評価ガイド⁽¹⁾を参考に、形状、剛性及び飛散時の運動エネルギーを考慮して鋼製材(質量、長さ、幅、奥行き：135kg、4.2m×0.3m×0.2m)及び鋼製パイプ(質量、長さ、直径：8.4kg、2m×φ0.05m)を選定する。

竜巻防護施設は、竜巻により生じる風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物の衝撃による荷重を組み合わせた複合荷重とその他の荷重(常時作用する荷重、運転時荷重)を適切に組み合わせた設計荷重に対して、安全機能を損なわない設計とする。なお、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は低いことから、設計竜巻による荷重と設計基準事故時荷重との組合せは考慮しない。また、竜巻以外の自然現象として雷、雪、雹及び大雨が想定されるが、いずれも施設への影響が相乗しないことから、竜巻以外の自然現象による荷重と設計竜巻との組み合わせは考慮しない。

また、竜巻防護施設は、設計飛来物の衝突による影響に対して、安全機能を損なわない設計とする。このため、竜巻防護施設を内包する原子炉建家及び使用済燃料貯蔵建家を外殻として防護する設計とする。

ただし、竜巻による設計飛来物の衝突により、竜巻防護施設の設置区画の壁面に裏面剥離が生じる可能性がある場合には、その影響により竜巻防護施設が安全機能を損なわないことを評価し設計する。

竜巻随伴事象として、HTTR機械棟屋外タンクに飛来物が衝突することによる火災、飛来物が衝突することによる屋外配管等の損傷による溢水及び外部電源喪失を想定し、これらに対して、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。火災については、「1.10 外部火災防護」にてHTTR 機械棟屋外タンクの火災を評価し影響のないことを確認している。溢水に対しては、飛来物が衝突することによる屋外配管等の損傷による溢水の発生を考慮しても、竜巻防護施設を原子炉建家及び使用済燃料貯蔵建家内に設置していることから、建家外壁により水の侵入を防止できるため、竜巻防護施設への影響はない。外部電源喪失に対しては、原子炉停止後の監視に必要な直流電源設備及び安全保護系用交流無停電電源装置を竜巻防護施設として安全機能を損なわない設計とする。

竜巻防護対策として、資機材等の設置状況を踏まえ、飛来物となる可能性のあるもののうち、飛来した場合の運動エネルギーが設計飛来物よりも大きいものについては、飛来物のサイズや剛性を考慮し、飛来物とならないように、竜巻防護施設を内包する建家からの隔離、撤去、固縛、固定を行う。また、竜巻防護対策の状況及び新規飛来物の有無について、原子炉起動前に飛来物調査を実施し確認する。竜巻防護施設に対する竜巻防護対策等を第 1.8.1 表に示す。

竜巻の近接予測及び近接時の対策として、気象庁が発表する竜巻注意情報、雷注意情報等の気象情報により、1時間先までに竜巻等の発生する可能性が高まっている

領域に敷地が含まれると予測された場合、原子炉施設に影響が及ぶ前に原子炉の停止操作を行うとともに、車両の退避等の必要な措置を講ずる。

また、竜巻により商用電源が喪失し、さらに非常用発電機による給電も期待できない場合は、直流電源設備の蓄電池による電源供給により、原子炉停止後の状態及び使用済燃料冷却の状態を監視する。さらに、蓄電池の枯渇後(60分以降)は、商用電源が復旧するまでの間、可搬型計器、可搬型発電機等を用いて、原子炉圧力容器上鏡温度、補助冷却器出口ヘリウム圧力、貯蔵プール水位等の必要な監視を継続して行う措置を講じる。可搬型発電機の設置場所は、竜巻飛来物の影響を考慮し原子炉建家内の2箇所とするとともに、可搬型発電機の接続先は竜巻飛来物の影響が及ばない原子炉建家内の地下とする。また、可搬型発電機は原子炉建家外の2箇所に各1式を設計竜巻の直径(60m)以上の距離を離して保管するものとし、可搬型計器、ケーブル等は外殻として防護する原子炉建家内の2箇所に各1式を分散して保管することにより、監視に必要な資機材を竜巻の影響から防護する。なお、可搬型発電機の原子炉建家内への設置作業は、竜巻の通過後等、竜巻による環境影響が緩和した後に行う。

1.8.3 参考文献

- (1)「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)

第 1.3.1 表 第 6 条に関する重要安全施設

No.	安全機能	構築物・系統・機器
1	原子炉冷却材圧力バウンダリ	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系
2	過剰反応度の印加防止	スタンドパイプ、スタンドパイプクロージャ
3	炉心の形成	炉心構成要素、炉心支持鋼構造物、炉心支持黒鉛構造物
4	放射性物質の貯蔵	使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール、貯蔵ラック
5	1 次冷却材の内蔵	1 次ヘリウム純化設備(原子炉冷却材圧力バウンダリとの接続部から原子炉格納容器外側隔離弁までの範囲)
6	実験・照射の関連機能 (核分裂生成物の放散防止)	実験設備の一部
7	原子炉の緊急停止、未臨界維持	制御棒系
8	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止	1 次冷却設備の安全弁
9	原子炉停止系への起動信号の発生	安全保護系(停止系)
10	安全上特に重要な関連機能	中央制御室
11	事故時のプラント状態の把握	事故時監視計器の一部
12	安全上特に重要な関連機能	直流電源設備
13		安全保護系用交流無停電電源装置

第 1.8.1 表 竜巻防護施設に対する竜巻防護対策等

竜巻防護施設	竜巻の最大風速条件	飛来物対策	竜巻防護施設を内包する建家	想定する設計飛来物
原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系	100m/s	固縛等の対策、車両の退避等	原子炉建家	鋼製材 鋼製パイプ
スタンドパイプ、スタンドパイプクロージャ				
炉心構成要素、炉心支持鋼構造物、炉心支持黒鉛構造物				
1 次ヘリウム純化設備(原子炉冷却材圧力バウンダリとの接続部から原子炉格納容器外側隔離弁までの範囲)				
制御棒系				
1 次冷却設備の安全弁				
事故時監視計器の一部				
安全保護系 (停止系)				
直流電源設備・安全保護系用交流無停電装置				
実験設備の一部				
中央制御室				
使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール、貯蔵ラック				
使用済燃料貯蔵設備の貯蔵セル、貯蔵ラック			使用済燃料貯蔵建家	

第 1.8.1 表 竜巻防護施設に対する竜巻防護対策等

竜巻防護施設	竜巻の最大風速条件	飛来物対策	竜巻防護施設を内包する建家	想定する設計飛来物
原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系	100m/s	固縛等の対策、車両の退避等	原子炉建家	鋼製材、鋼製パイプ
スタンドパイプ、スタンドパイプクロージャ				
炉心構成要素、炉心支持鋼構造物、炉心支持黒鉛構造物				
1次ヘリウム純化設備（原子炉冷却材圧力バウンダリとの接続部から原子炉格納容器外側隔離弁までの範囲）				
制御棒系				
1次冷却設備の安全弁				
事故時監視計器の一部				
安全保護系（停止系）				
直流電源設備・安全保護系用交流無停電装置				
実験設備の一部				
中央制御室				
使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール、貯蔵ラック			使用済燃料貯蔵建家	
使用済燃料貯蔵設備の貯蔵セル、貯蔵ラック				

(2) 適合性

(外部からの衝撃による損傷の防止)

<p>第六条 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。</p> <p>2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。</p> <p>3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される試験研究用等原子炉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。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。</p>

適合のための設計方針

1 について

安全施設は、以下のとおり構造物及び機器の条件を設定し、地震及び津波以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれないようにする。

(8) 竜巻

竜巻防護施設は、最大風速 100m/s の竜巻が発生した場合においても、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突荷重を組み合

わせた荷重等に対して、安全機能を損なわない設計とする。また、設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は低いことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻との組合せは考慮しない。

施設に影響が及ぶおそれがある竜巻の接近が予測された場合は、原子炉の停止操作を行うとともに、車両の退避等の必要な措置を講ずる。

2 について

原子炉施設のうち、次に示す重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生じる応力をそれぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して、適切に組み合わせる設計とする。

(1) クラス 1

- (2) PS-2 のうち機能喪失した場合に周辺公衆へ過度の被ばくを及ぼす可能性のある系統及び MS-2 のうち設計基準事故時にプラント状態を把握する機能を有する系統

重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象は、第 1 項において選定した自然現象に含まれる。HTTR では、重要安全施設は全て原子炉建家内に内包されており、自然現象に対しては建家を外殻として防護する設計としている。このため、自然現象の衝撃が重要安全施設に作用することはない。また、設計基準事故時に建家の健全性に影響を与える有意な応力が生じることもない。

このことから、自然現象により重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生じる応力を組み合わせる必要はなく、重要安全施設は、個々の自然現象に対して、安全機能を損なわない設計とする。

1.3.2 気象等

9. 竜巻 (HTTR)

9.1 検討の基本方針

自然現象に対する設計上の考慮として、想定される自然現象に対して原子炉施設が安全性を損なわないことを確認するため、竜巻影響評価を実施する。

竜巻影響評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下「竜巻評価ガイド」という。)⁽¹⁾を参考に、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。

9.2 竜巻検討地域の設定

大洗研究所(北地区)が立地する地域と、気象条件の類似性の観点から検討を行い、竜巻検討地域を設定する。

大洗研究所（北地区）の敷地は、茨城県東茨城郡大洗町の南部に位置し、敷地東側は太平洋に面している。この太平洋側沿岸における、気象条件の類似性の観点から、気象総観場ごとの竜巻発生場所の分析を行い、原子炉施設が立地する大洗研究所（北地区）と類似の地域を抽出する。

気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾を基に、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「東京工芸大学の委託成果」という。）⁽³⁾を参考に、気象総観場を低気圧、台風、停滞前線、局地性降雨（局地性擾乱、雷雨含む）、季節風及びその他の6つに分類する。なお、使用するデータは竜巻等の突風データベース⁽²⁾を基に1961年から2012年6月のものとする。第9.2.1図に示す気象総観場ごとの竜巻発生位置から、発生場所の傾向を確認する。

台風起因の竜巻は、九州から太平洋側の沿岸で発生しており、停滞前線起因の竜巻は北海道を除く地域で発生している。なお、低気圧、局地性降雨（局地性擾乱、雷雨含む）、季節風及びその他の起因の竜巻は日本全国で発生しており地域性はない。

竜巻発生地域性が見られる台風起因と停滞前線起因の発生エリアの重なりを考慮すると、九州、山口の沿岸部、及び太平洋側沿岸部において竜巻発生観点から類似性があると判断できる。

これらの検討を踏まえ、海岸線付近に竜巻の発生が集中していることを考慮し、宮城県、福島県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県、山口県及び九州（沖縄県含む）の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲（面積：約89,500km²）を竜巻検討地域に設定する。竜巻検討地域を第9.2.2図に示す。

9.3 基準竜巻の最大風速の設定

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})のうち大きい方の風速を設定する。

(1) 竜巻検討地域において過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})の設定

日本で過去に発生した最大の竜巻は、竜巻等の突風データベース⁽²⁾（1961年から2012年6月）によると第9.3.1表に示す藤田スケールでF3である。F3スケールにおける風速は第9.3.2表から70m/s～92m/sであることから、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})を92m/sと設定する。

(2) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})の設定

ハザード曲線による竜巻最大風速(V_{B2})は、竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づき評価する。第9.3.1図に竜巻ハザード算定フローを示す。評価は、竜巻データの分析、竜巻風速及び被害幅並びに被害長さの確率密度分布、それらの相関係数の算定、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

評価対象とする竜巻は、竜巻等の突風データベース⁽²⁾をもとに、竜巻検討地域における1961年から2012年6月の51.5年間に発生した竜巻事例を使用する。

竜巻等の突風データベース⁽²⁾では、1961年以降に発生した竜巻に関する情報がデータベース化されているが、観測体制は近年になるほど強化されており、年代による観測値の品質のばらつきを考慮し、以下の基本的考え方に基づいて竜巻データをFスケール毎に整理する。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0及びFスケール不明竜巻に対しては、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採用する。
- ② 被害が比較的軽微なF1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採用する。
- ③ 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F2及びF3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採用する。

なお、竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻も発生数にカウントする。

また、F0～F1、F2～F3等のように、Fスケールをまたいだ定義がなされている場合は、保守性を考慮して、それぞれF1、F3等として評価する。

Fスケールが不明な竜巻は以下のように取扱う。陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、これらの竜巻は被害が少ないF0竜巻と見なす。海上竜巻については、その竜巻のFスケールを推定することは困難であることから、沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、上陸竜巻を含む陸上竜巻と類似していると仮定し、陸上竜巻のFスケール別の発生比率で按分する。

以上の考え方に基づく各年代別の竜巻発生数の分析結果を第9.3.3表に示す。また、海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分した分析結果を第9.3.4表に示す。その結果、ハザード曲線の算定に使用する疑似竜巻を含めた51.5年間の発生総数は1,338個となった。

年代毎の竜巻データの品質のばらつき及びFスケール不明竜巻の取扱いにより、観測実績（346個）に対して保守性を高めた評価としている。

b. 年発生数の確率密度分布の算定

竜巻の年発生数の確率密度分布は、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾によればポアソン分布若しくはポリヤ分布に従う。ポアソン分布は、稀な現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でない稀な現象の場合に有用な分布である。台風や前線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ため、ポリヤ分布の方が実現象をより反映できると考えられる。

なお、国内を対象とした竜巻の年発生数の分布の適合性に関する検討結果は、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾に示されており、陸上竜巻及び海上竜巻の両方の発生数について、適合性の良いポリヤ分布により設定した。

以上より、ハザード曲線の算定に当たって使用する竜巻年発生数の確率密度分布はポリヤ分布を採用する。竜巻検討地域における竜巻の年発生数の確率密度分布を第9.3.2図に示す。

c. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布と相関係数の算定

竜巻発生数と同様に、竜巻等の突風データベース⁽²⁾をもとに、竜巻被害幅及び竜巻被害長さの観測データを分析する。

なお、疑似的な竜巻の作成に伴う竜巻の被害幅又は被害長さの情報が無い竜巻に対しては、被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は、被害幅又は被害長さが大きいデータから優先的に用いることで、これらの平均値が大きくなるように工夫している。また、被害幅又は被害長さが幅を持って記載されている場合は大きい値を用い、0mの場合は計算に用いないとして保守的な評価とした。

ハザード曲線を算定するためには、1つの竜巻が発生した際の竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布が必要となる（第9.3.1図参照）。そこで、これまで算定した竜巻検討地域における51.5年間の竜巻発生数、被害幅及び被害長さのデータを用いて確率密度分布を求める。その際、竜巻評価ガイド⁽¹⁾及び東京工芸大学の委託成果⁽³⁾を参照して、確率密度関数が対数正規分布に従うものとして評価する。本評価に用いた竜巻検討地域における竜巻パラメータを第9.3.5表に示す。

第9.3.3図(1)～第9.3.3図(3)に竜巻風速及び竜巻被害幅並びに被害長さに対する確率密度分布を示す。また、第9.3.4図(1)～第9.3.4図(3)に竜巻風速及び竜巻被害幅並びに被害長さの超過確率を示す。これらは観測結果と整合している。

1961年以降の観測データを用いて竜巻風速、被害幅及び被害長さについての相関係数を算定した結果を第9.3.6表に示す。

算定結果から、竜巻検討地域においては、各変量間に約0.4程度の相関が認められ、風速が大きいほど被害域の幅・長さが大きくなる傾向となる。

d. 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは、設計対象施設を含む円形に設定する。竜巻影響エリアを円形に設定することで、ハザード曲線の評価において竜巻の移動方向に依存しないとして評価を行う。HTTR原子炉施設の竜巻影響エリアは、第9.3.5図のHTTR原子炉施設の概略配置図に示すように、原子炉建家などの主要な施設が、直径140mの円内に収まることから、この円（面積：約15,400m²）を竜巻影響エリアとする。

e. ハザード曲線の算定方法

ハザード曲線の算定においては、東京工芸大学の委託成果⁽³⁾にならってポリヤ分布を用いる。竜巻の発生頻度は、以下のポリヤ分布で表されると仮定する。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad \dots\dots (9-1 \text{ 式})$$

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はポリヤ分布パラメータであり、下式で表される。

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad \dots\dots (9-2 \text{ 式})$$

ここで、σは竜巻の年発生数の標準偏差である。

Dを対象とする構造物が風速V₀以上の竜巻に遭遇する事象とし、評価対象とする構造物が1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速がV₀以上となる確率をR(V₀)とした時、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がV₀以上となる確率は、下式のようになる。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad \dots\dots (9-3 \text{ 式})$$

このR(V₀)は、竜巻影響評価の対象地域の面積（竜巻検討地域の面積）をA₀、1つの竜巻の風速がV₀以上となる面積をDA(V₀)とすると下式で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad \dots\dots (9-4 \text{ 式})$$

ここで、E[]は期待値を意味する。

また、以下のようにしてDA(V₀)の期待値を算定し、(9-4式)によりR(V₀)を算定して、竜巻検討地域における竜巻の年発生数に関するポリヤ分布の特性値を用いて(9-3式)よりP_{V₀,T}(D)を求める。風速をV、被害幅をw、被害長さを1とし、f(V, w, 1)等の同時確率密度分布を用いると、竜巻影響エリアを円形で設定しているため竜巻の移動方向に依存しないことから、DA(V₀)の期待値は(9-5式)のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] = & \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
& + L \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} l f(V, l) dV dl \\
& + L \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw \\
& + S \int_{V_0}^{\infty} f(V) dV
\end{aligned}
\quad \dots\dots (9-5 \text{ 式})$$

ここで、Lは竜巻影響エリアの直径、Sは竜巻影響エリアの面積、 $lf(V, l)$ および $f(V, w)$ 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対象構造物を投影した時の長さである。

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 に設定した。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、(9-6式)により算定される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w
\quad \dots\dots (9-6 \text{ 式})$$

ここで、 V_{\min} は、被害が発生し始める風速に位置づけられる。このため、竜巻の最小風速を考慮して F0 竜巻 (17~32m/s) の最小風速である $V_{\min}=17\text{m/s}$ とした。

f. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の設定

竜巻最大風速のハザード曲線を第 9.3.6 図に示す。竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、年超過確率 10^{-5} に相当する風速として、63.6m/s と設定する。

(3) 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

基準竜巻の最大風速 (V_B) は、過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=92\text{m/s}$ と竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=63.6\text{m/s}$ のうちの大きい方の風速とすることから、原子炉施設における基準竜巻の最大風速 (V_B) は 92m/s と設定する。

9.4 設計竜巻の最大風速の設定

設計竜巻の最大風速 (V_D) は、原子炉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 (V_B) の適切な割増し等を考慮して設定する。

設計竜巻の設定に当たっては、丘陵等による地形効果によって下り斜面において竜巻が増幅する可能性があると考えられることから⁽⁴⁾、立地する地域における設計対象施設の周辺地域等の地形について検討した。

検討の結果、HTTR原子炉施設の設計竜巻の最大風速については、以下のとおりと

する。

大洗研究所（北地区）は標高 35～40m の平坦な台地に位置し、敷地内には 13～16m 位の高低がある。H T T R 原子炉施設は標高約 36.5m に位置しており、東西方向及び南北方向からみても下り斜面には位置していない。

以上より、基準竜巻が周辺地形により増幅される可能性はなく、設計竜巻(V_D) = 基準竜巻(V_B)と考えられることから、設計竜巻の最大風速(V_D)は 92m/s と設定する。

9.5 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013 年 6 月, 29p.
- (2) 気象庁, 竜巻等の突風データベース,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html> (参照 : 2013 年 10 月 4 日).
- (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, 2011 年 2 月, 424p.
- (4) Lewellen, D.C., Effects of Topography on Tornado Dynamics: A Simulation Study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Nov. 5-8, 2012, 7p.

第9.3.1表 日本で過去に発生したF3竜巻一覧

No	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	発生場所
1	1971年07月07日07時50分	35度52分45秒	139度40分13秒	埼玉県 浦和市
2	1990年12月11日19時13分	35度25分27秒	140度17分19秒	千葉県 茂原市
3	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
4	2006年11月07日13時23分	43度58分39秒	143度42分12秒	北海道 網走支庁 佐呂間町
5	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 常総市

第9.3.2表 藤田スケールと風速の関係

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)

第9.3.3表 竜巻検討地域における竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域	発生数の統計	陸上で発生した竜巻						海上で発生して陸上へ移動した竜巻						海上竜巻	総数
		F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F不明	
1961～2012/6 (51.5年間)	期間内総数	38	78	30	3	14	163	13	43	19	3	7	85	98	346
	平均値	0.74	1.51	0.58	0.06	0.27	3.17	0.25	0.83	0.37	0.06	0.14	1.65	1.90	6.72
	標準偏差	1.85	1.50	0.73	0.24	0.66	2.98	0.52	1.29	0.63	0.24	0.40	1.77	4.77	8.06
1991～2012/6 (21.5年間)	期間内総数	38	47	12	1	10	108	13	33	9	0	5	60	98	266
	平均値	1.77	2.19	0.56	0.05	0.47	5.02	0.60	1.53	0.42	0.00	0.23	2.79	4.56	12.37
	標準偏差	2.56	1.72	0.75	0.22	0.92	3.58	0.67	1.68	0.67	0.00	0.43	2.03	6.62	9.93
2007～2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	10	1	0	6	44	7	3	0	0	3	13	73	130
	平均値	4.91	1.82	0.18	0.00	1.09	8.00	1.27	0.55	0.00	0.00	0.55	2.36	13.27	23.64
	標準偏差	3.73	1.73	0.43	0.00	1.64	5.08	0.80	0.58	0.00	0.00	0.58	1.25	9.12	14.87
疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	253	113	30	3	57	456	66	80	19	3	29	197	684	1337
	平均値	4.91	2.19	0.58	0.06	1.11	8.85	1.27	1.55	0.37	0.06	0.55	2.36	13.28	25.96
	標準偏差	3.73	1.72	0.73	0.24	1.64	4.48	0.80	1.68	0.63	0.24	0.58	2.06	9.12	10.37

第 9.3.4 表 51.5 年間の竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域	発生数の統計	F スケール				
		F0	F1	F2	F3	合計
疑似 51.5 年間 (全竜巻)	期間内総数	870	363	94	11	1338
	平均値	16.89	7.05	1.83	0.21	25.98
	標準偏差	6.51	3.19	1.31	0.44	7.38

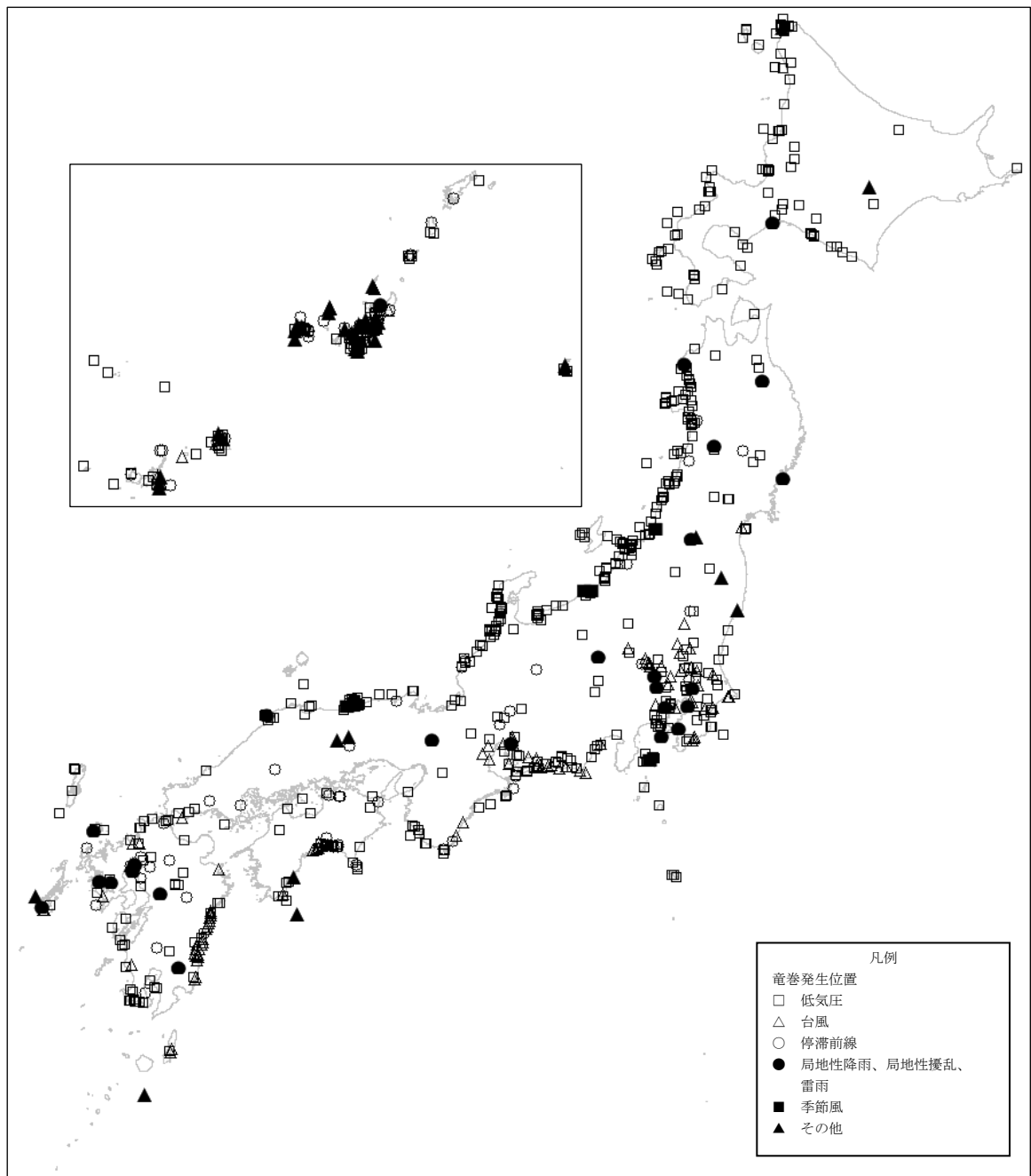
第 9.3.5 表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の分析結果)

竜巻検討地域 (海岸±5km)	パラメータ	統計量	F スケール				
			F0	F1	F2	F3	計
疑似 51.5 年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	870	363	94	11	1338
		平均値(年)	16.89	7.05	1.83	0.21	25.98
		標準偏差(年)	6.51	3.19	1.31	0.44	7.38
	被害幅	期間内総数	870	363	94	11	1338
		平均値(m)	59.30	132.54	250.64	563.64	96.76
		標準偏差(m)	58.50	190.86	382.18	727.36	175.85
	被害長さ	期間内総数	870	363	94	11	1338
		平均値(km)	1.14	2.87	5.36	14.86	2.02
		標準偏差(km)	0.93	3.12	4.77	14.43	3.03

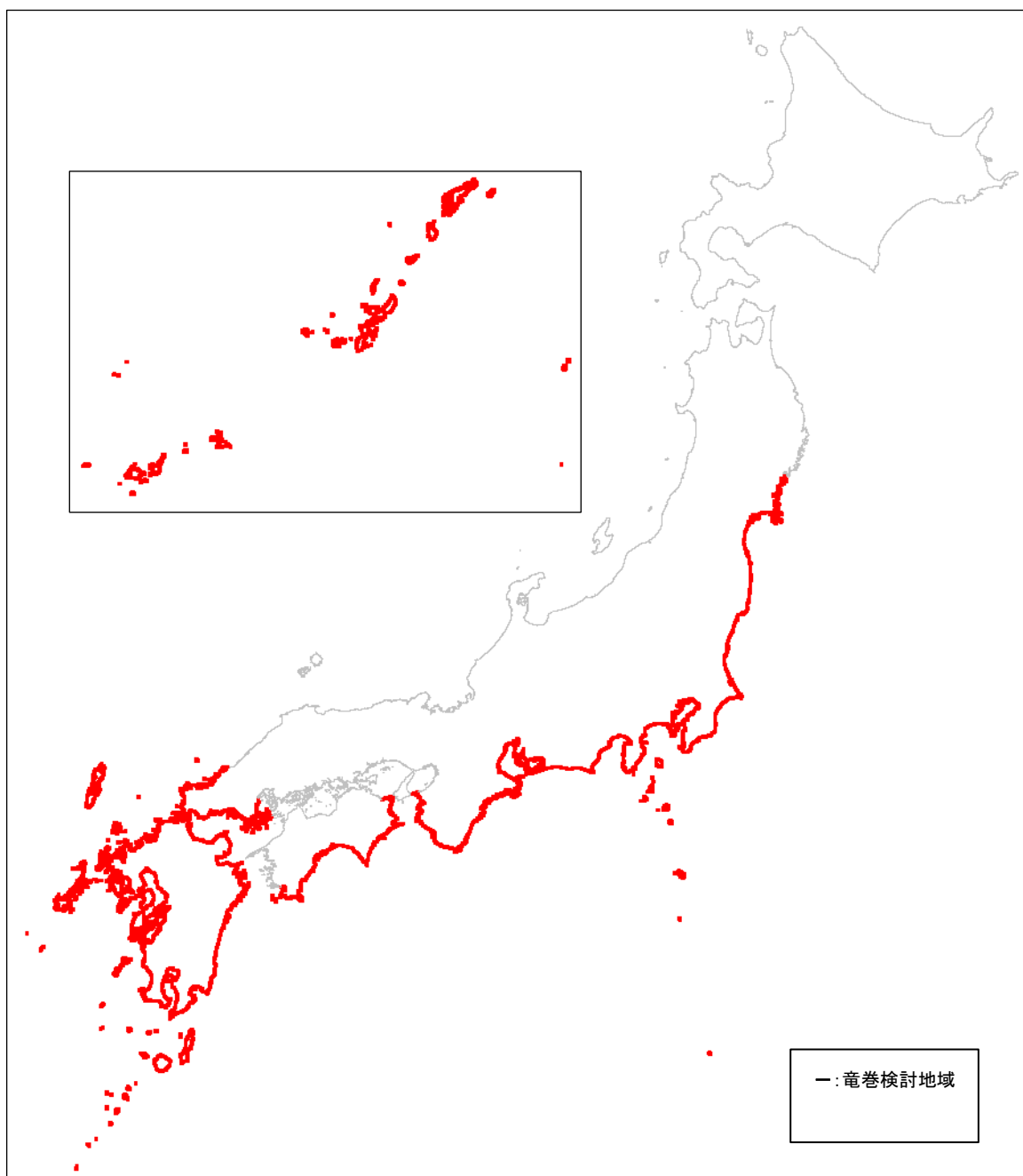
第 9.3.6 表 竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数の算定*

相関係数 (対数)	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	0.397	0.435
被害幅	—	1.000	0.397
被害長さ	—	—	1.000

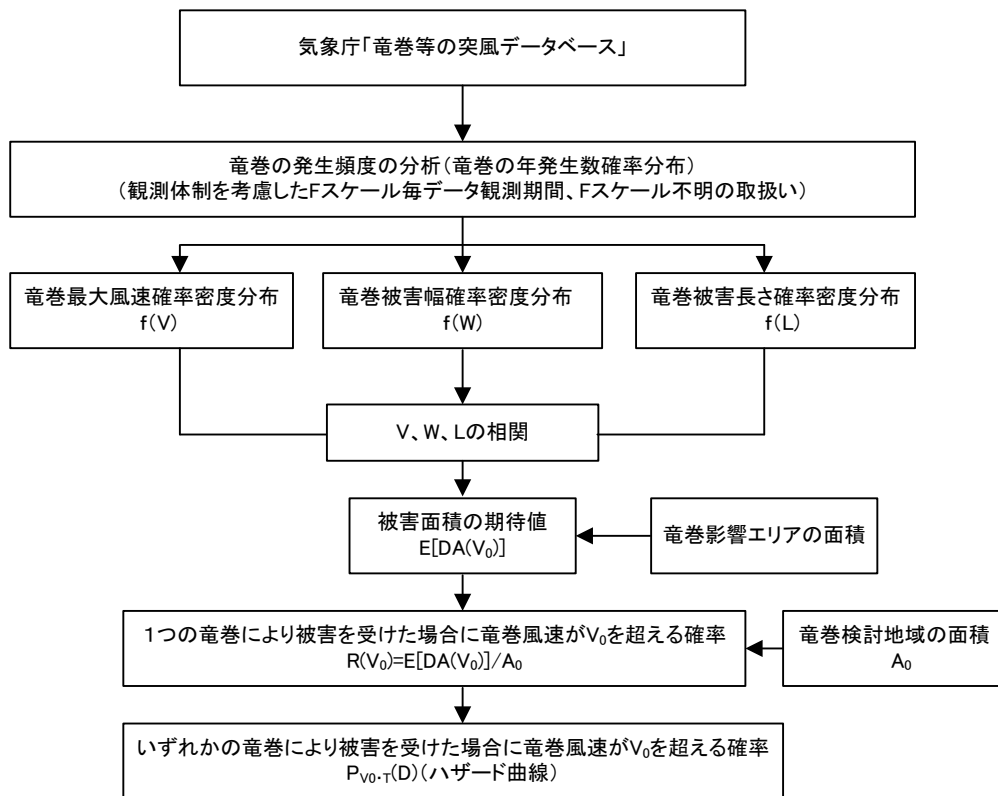
*観測データのみを用いて算定



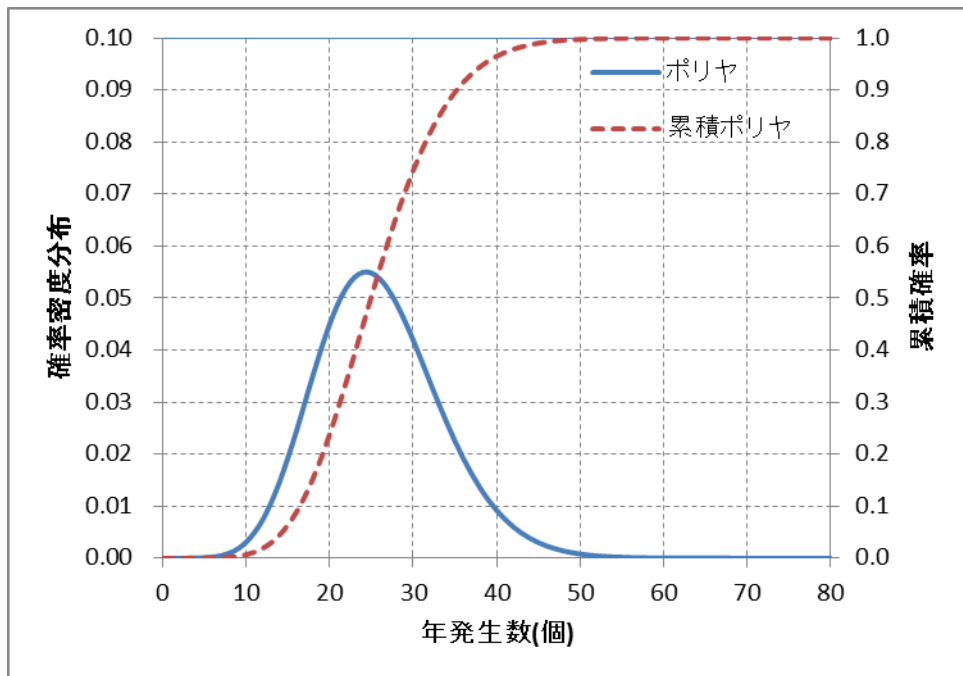
第 9.2.1 図 気象総観場ごとの竜巻発生位置



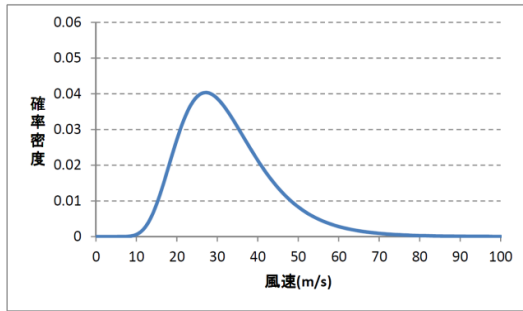
第 9.2.2 図 竜巻検討地域



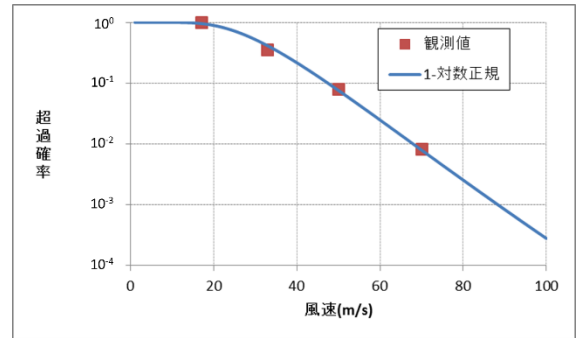
第 9. 3. 1 図 竜巻ハザードの算定フロー



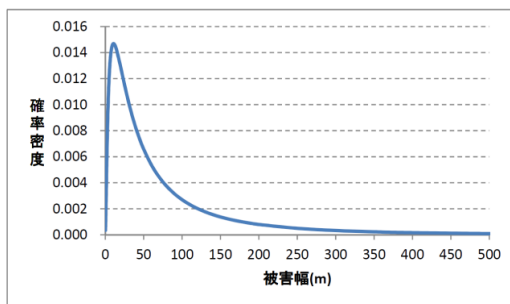
第 9. 3. 2 図 竜巻年発生数の確率密度分布



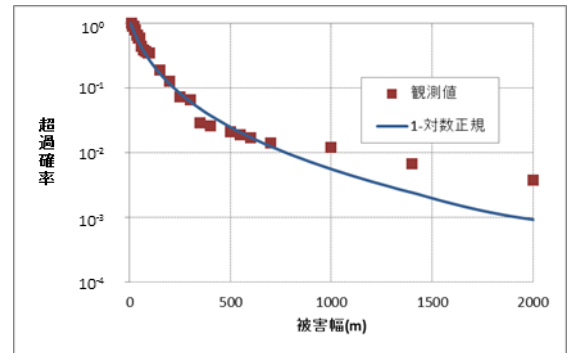
第 9. 3. 3 図(1) 竜巻風速の確率密度分布



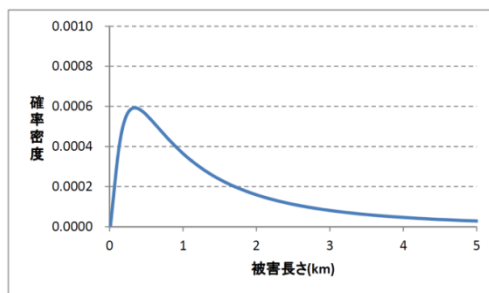
第 9. 3. 4 図(1) 竜巻風速の超過確率



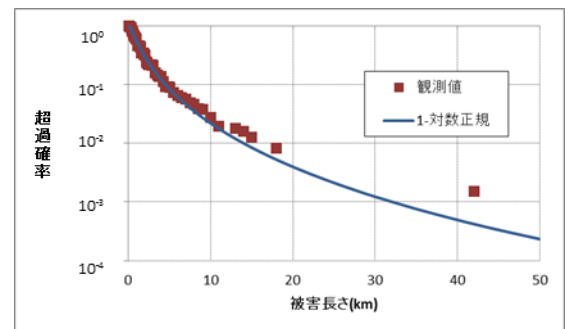
第 9. 3. 3 図(2) 竜巻被害幅の確率密度分布



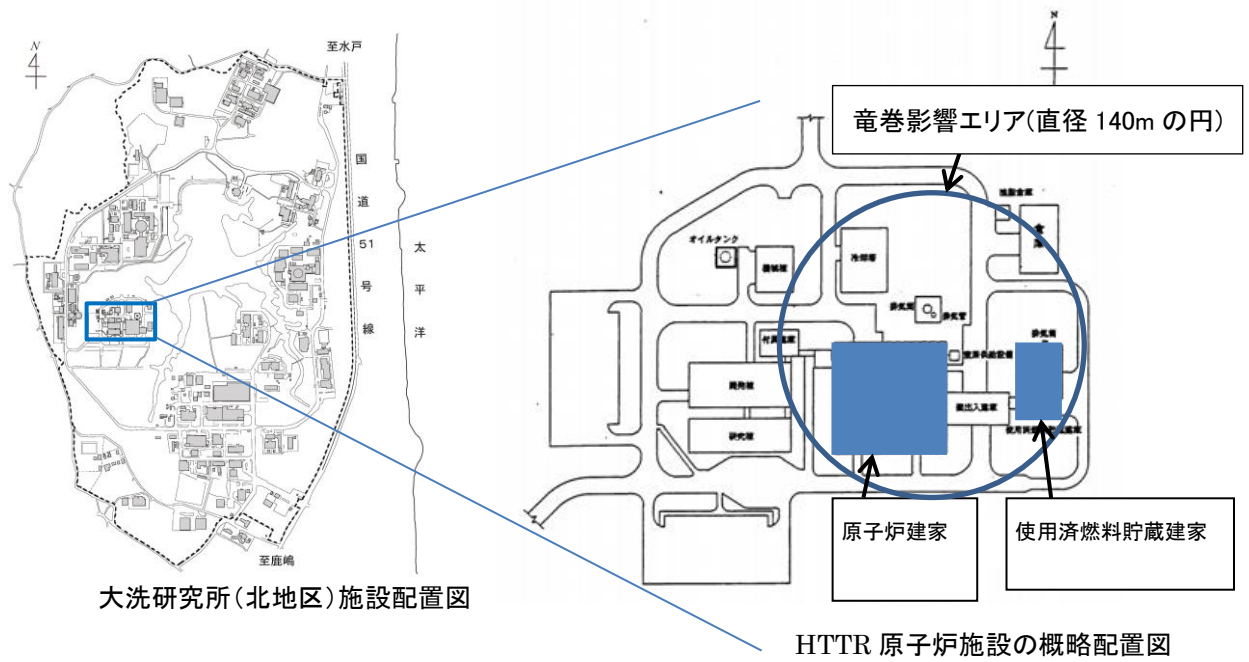
第 9. 3. 4 図(2) 竜巻被害幅の超過確率



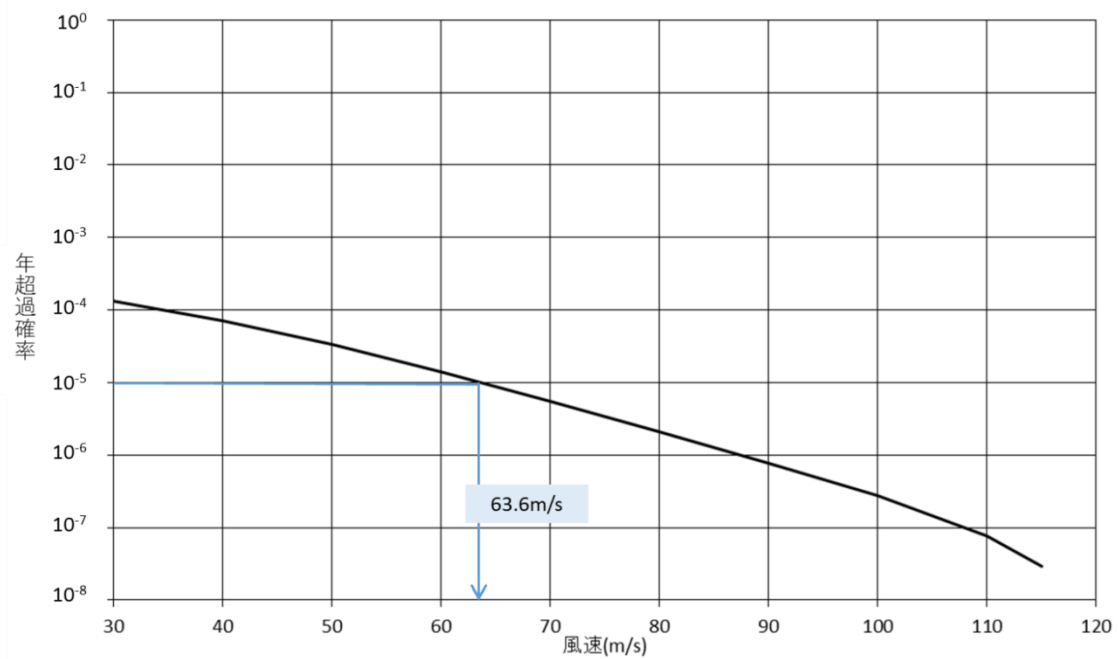
第 9. 3. 3 図(3) 竜巻被害長さの確率密度分布



第 9. 3. 4 図(3) 竜巻被害長さの超過確率



第 9.3.5 図 HTTR 原子炉施設の概略配置図



第 9.3.6 図 竜巻最大風速のハザード曲線 (海側陸側各 5km の評価)

1.3.3 設備等

該当無し

2. H T T R原子炉施設の
外部からの衝撃による損傷防止（竜巻）
（適合性説明資料）

目 次

1. 外部からの衝撃による損傷の防止に関する基本的考え方	27
2. 外部からの衝撃による損傷の防止 (竜巻)	47
3. 外部からの衝撃による損傷の防止 (竜巻) (設計竜巻荷重による評価結果含む)	76
4. 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について	98
5. 質問回答	105

HTTR原子炉施設

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止に関する基本的考え方



目次

1. 安全確保の考え方
2. HTTRにおける第6条の要求事項に対する基本的考え方
3. 基本方針
 - 3.1 極めてまれな外部事象(竜巻・火山)に対する基本方針
 - 3.2 その他の外部事象に対する基本方針
4. まとめ
5. 参考

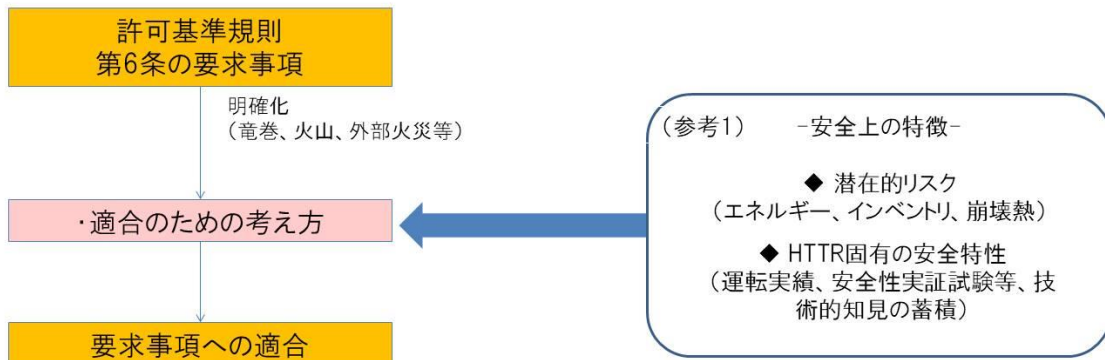


- ▶ 外部事象に対して、試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則(許可基準規則)に適合させるよう、設計基準事象とする自然現象等の外部事象(自然現象等)に対する適切な防護対策を講じるとともに、設計基準事象を超える自然現象等が発生した場合に対しても、当該事故の拡大を防止するために必要な措置を講じ、更には、大規模損壊事象が発生した場合に対しても、放射性物質の放出を可能な限り抑制する措置を講じる方針とする。
- ▶ 試験研究炉は多種多様で潜在的リスク(エネルギー、インベントリ)も異なることから、固有の特性を十分考慮し、又、自然現象との発生頻度や影響の大きさも考慮して、合理的に達成可能な手段を講じることにより原子炉の安全性を確保する。
- ▶ 起因となる自然現象等に対して、試験研究炉の特性を踏まえ、設備設計だけに頼らず人的措置によっても安全確保策を講じる。そのために、確実に実行可能な対応手順等を整備する。



2. HTTRにおける第6条の要求事項に対する基本的考え方(1/3)

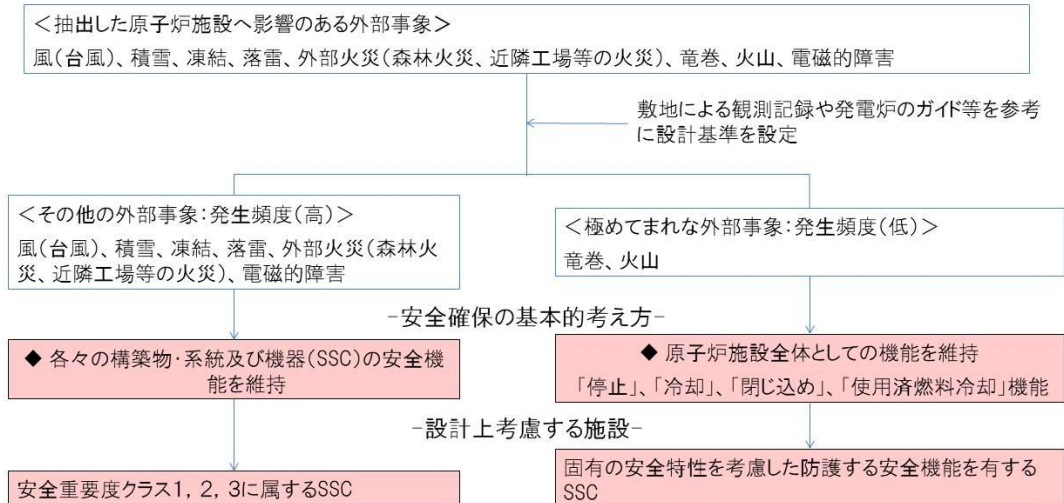
- ▶ 新規制基準(許可基準規則 第6条)では、考慮すべき外部事象(設計上考慮すべき自然現象及び設計上考慮すべき人為事象)に係る要求が強化され、特に、火山、竜巻、外部火災(森林火災、近隣工場等の火災)等が明確化。
- ▶ 選定した外部事象の特徴に応じて、HTTR固有の安全上の特徴を考慮し、要求事項へ適合。



2. HTTRにおける第6条の要求事項に対する基本的考え方(2/3)

-適合のための考え方-

- 抽出した外部事象に対し設計基準を設定した結果から、発生頻度や影響に応じて大別。
- 発生頻度が極めてまれな外部事象(竜巻、火山)に対しては、影響が及ぶ前に原子炉停止が可能であることを踏まえた上で、安全確保上重要な原子炉の「停止」、「冷却」、「閉じ込め」及び「使用済燃料冷却」機能を維持し、原子炉施設全体として安全性を確保。
- このために必要な、HTTRの固有の安全特性を考慮した防護する安全機能を有するSSCを、設計上考慮する施設として抽出し、極めてまれな外部事象に対してその安全機能を損なわないよう設計。



2. HTTRにおける第6条の要求事項に対する基本的考え方(3/3)

- 原子炉の「停止」、「冷却」、「閉じ込め」及び「使用済燃料冷却」の維持に必要な安全機能を、HTTRの固有の安全特性を考慮して防護する安全機能として抽出。
- 極めてまれな外部事象に対しては、防護する安全機能を有するSSCを設計上考慮する施設として抽出。

＜防護する安全機能＞

- ①原子炉の緊急停止機能
- ②放射性物質の閉じ込め機能(原子炉冷却材圧力バウンダリ)
- ③原子炉の停止及び放射性物質の閉じ込め状態監視に必要な監視機能
- ④原子炉建家の使用済燃料の貯蔵機能
- ⑤使用済燃料貯蔵建家(SF建家)の使用済燃料の貯蔵機能

炉心冷却機能について、HTTRでは、炉心の形成の維持ができれば、原子炉の固有の安全性から自然放熱により炉心の冷却が可能(参考2)。

設計上考慮する施設

分類	安全機能	SSC
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系
PS-1	過剰反応度の印加防止	スタンドパイプ、スタンドパイプクローザー
PS-1 PS-2	炉心の形成	炉心構成要素、炉心支持鋼構造物、炉心支持黒鉛構造物
PS-2	放射性物質の貯蔵	原子炉建家の使用済燃料貯蔵設備(貯蔵プール及び貯蔵ラック) SF建家の使用済燃料貯蔵設備(貯蔵セル及び貯蔵ラック)
PS-2	1次冷却材の内蔵	1次ヘリウム純化設備(原子炉冷却材圧力バウンダリとの接続部から原子炉格納容器外側隔離弁までの範囲)
PS-2	実験・照射に供する機能	実験設備の一部
MS-1	原子炉の緊急停止・未臨界維持	制御棒系
MS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止	1次冷却設備の安全弁
MS-1	原子炉停止系への起動信号の発生	安全保護系(停止系)
MS-1	安全上特に重要な関連機能	中央制御室
MS-2	事故時のプラント状態の把握	事故時監視計器の一部
MS-2	安全上特に重要な関連機能	直流電源設備、安全保護系用交流無停電装置

(1)設計基準の設定

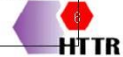
供用期間中に極めてまれではあっても、その発生により原子炉施設に影響を与える竜巻および火山事象を発電炉の影響評価ガイドを参考に設計基準として設定する。

(2)設計上考慮する施設

- ▶ 外部事象の特性を踏まえ、設計上考慮する施設は、安全重要度クラス1及びクラス2から、HTTRの固有の特性を考慮した防護する安全機能を有するSSCとし、影響評価を行い、安全機能を損なわないことを確認する。
- ▶ 評価に当たっては、これらを内包する原子炉建家、使用済燃料貯蔵建家を設計上の評価対象とする。

＜想定する竜巻・火山事象(火山灰)の特性＞

- ①-1 想定する竜巻を、基準竜巻の最大風速の設定において算出したハザード曲線にあてはめると、発生頻度としては、極めて低く(年超過確率 10^{-6})なる(参考3)。従って、想定される竜巻が供用期間中に発生する可能性は極めて低いと考えられる。【竜巻】
- ①-2 「原子力発電所火山影響評価技術指針(JEAG4625-2015)」(JEAG4625)によれば、供用期間中に極めてまれな火山現象について規定。従って、想定される火山事象が供用期間中に発生する可能性は極めて低いと考えられる。【火山】
- ② 想定する竜巻・火山事象の発生は予測可能で、発生してから施設へ影響を及ぼすまでに時間的余裕があるため、原子炉を予め停止できる。その後、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能。【竜巻・火山】
- ③ 竜巻および火山事象は荷重形態が地震と異なり、建物を防護することにより建家内部の機器に荷重はかからない。【竜巻・火山】



- ▶ 設計上考慮する施設以外の安全重要度クラス2及びクラス3に属するSSCは、機能喪失した場合の公衆への放射線被ばく影響が小さい施設であり、また竜巻・火山事象による損傷を受けたとしても、燃料損傷を起こすことなく原子炉は安全に停止・維持され、使用済燃料の貯蔵は確保出来る(補足説明資料)。

ここで、想定する竜巻・火山事象の発生頻度は極めて低いため、設計基準事故との関係において、設計基準事故が発生しその影響が及ぶ期間中に、想定する竜巻又は火山事象が発生するとは考えられないこと、また、竜巻又は火山事象が発生した場合には原子炉を停止することとしていることから、設計基準内では設計基準事故と竜巻又は火山事象の組合せは考慮する必要はないと判断している。

なお、HTTRでは、設計基準を超える事象(第53条)として、設計基準事故(二重管破断事故)と自然現象(基準地震動 S_s)の組合せを考慮し、放射性物質の放出拡大防止の措置を行うこととしており、竜巻又は火山事象と設計基準事故の組合せは、これに包絡される。



その他の外部事象：

風(台風)、積雪、凍結、落雷、外部火災(森林火災、近隣工場等の火災)、電磁的障害

(1) 設計基準の設定

風(台風)、積雪、凍結、落雷、電磁的障害については、敷地による観測記録等を設計基準として設定する。これらは設置時より考慮しており変更はない。

外部火災については、発電炉のガイドを参考に設計基準(想定する外部火災)を設定する。

(2) 設計上考慮する施設

- ▶ 設計上考慮する施設は、発生頻度が高いことに鑑み、安全重要度クラス1, 2, 3に属するSSCとする。
- ▶ 設計上考慮する施設のうち、水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針(研究炉指針)(参考4)を参考に、一般産業施設を超える信頼性を要求されている安全重要度クラス1, 2に属するSSCを抽出し、影響評価を行い、安全機能を損なわないことを確認する。
- ▶ 安全重要度クラス3に属するSSCについては、電気技術指針(JEAG4612)¹⁾を参考に、一般産業施設に適用される規格・基準(建築基準法、日本工業規格、一般の電気工作物規定等)に従い設計することにより、安全機能を損なわない設計とする。

1) 電気技術指針 安全機能を有する電気・機械装置の重要度分類指針(JEAG4612-2010)



- ◆ 外部事象に対する安全確保については、HTTRの安全上の特徴を考慮して、設備設計だけに頼らず、人的措置も考慮し安全施設の安全機能を損なわない設計とする。
- ◆ 設計上考慮する施設は、外部事象の発生頻度や影響に相応して、またHTTRの固有の安全特性を考慮して以下のように抽出し、影響評価を行い、安全機能を損なわない設計とする。
 - ① 極めてまれな外部事象(竜巻および火山)に対しては、影響が及ぶ前に原子炉停止が可能であることを踏まえた上で、安全確保上重要な原子炉の「停止」、「冷却」、「閉じ込め」及び「使用済燃料冷却」機能を維持し、原子炉施設全体として安全性を確保する。このために必要な、HTTRの固有の特性を考慮した防護する安全機能(原子炉の緊急停止機能、放射性物質の閉じ込め機能、必要な監視機能、及び使用済燃料の貯蔵機能)を有するSSCとする。
 - ② 発生頻度が比較的高い外部事象に対しては、安全重要度クラス1, 2, 3に属するSSCとする。
- ◆ 設計上考慮する施設以外の安全施設については、想定する竜巻又は火山事象により損傷したとしても、燃料損傷を起こすことなく原子炉は安全に停止・維持され、使用済燃料の貯蔵は確保出来る。



5. 参考



参考1.1 HTTRの安全上の特徴(1/2)

- 発電炉との比較において、出力やインベントリーが格段に小さい
- 事故時の事象進展が穏やか、緊急炉心冷却系が不要、物理現象のみで崩壊熱除去可能
- 最終ヒートシンクとして海水を必要としない

表1:HTTRと発電炉の比較

	「HTTR」	軽水型発電炉(BWR)
出力	30,000 kW	3,300,000 kW
冷却材の種類	ヘリウム	水
炉内温度(冷却材)	約395/850又は950℃(入口/出口)	約285℃
炉内圧力	約4 MPa	約7 MPa
ヒートシンク	大気	海水
緊急炉心冷却システム	不要	必要
崩壊熱量 (スクラムから0.1sec、Shureの式)	約2070kW (燃焼度660EFPD)	約227690kW
崩壊熱除去手段	自然循環により冷却できる	ポンプにより強制循環で冷却
炉心に内蔵する放射能	希ガス: 約 5.0×10^{17} Bq ヨウ素: 約 2.9×10^{17} Bq	希ガス: 約 3.2×10^{19} Bq ヨウ素: 約 3.1×10^{19} Bq



●内包エネルギー・インベントリ

- ・原子炉出力30MWt、発電炉と比べて低出力(1/100)
- ・被覆燃料粒子の核分裂生成物(FP)閉じ込め性能が極めて高く、炉内の蓄積FPが格段に少ない

●冷却材・燃料・炉心構成要素

- ・冷却材はヘリウムガス、燃料はセラミック被覆燃料粒子、炉心構成要素に高純度の黒鉛を使用
- ・ヘリウムガスは不活性で構造材との化学反応が極めて起こりにくい、冷却材の相変化による冷却条件の急激な変化はない。
- ・燃料は耐熱性に優れ1,600℃以下ならばFP保持機能が損なわれることはない、炉心の熱容量が圧倒的に大きい

→ **発電炉に比べて事故時の事象進展が穏やか、炉心損傷及びFP放散を起こし難い**

●原子炉停止

- ・HTTRを用いた安全性実証試験により、炉心の冷却材流量が喪失した場合に制御棒挿入が行われなくても、各種の制限値を上回ることなく、原子炉が安定な状態に維持されることを実証

→ **原子炉スクラムに失敗しても安全に収束可能、原子炉停止機能への期待度は発電炉ほど高くない**

●炉心冷却

- ・冷却材喪失時に制御棒が挿入されなくても、固有の特性により原子炉の出力は低下。この場合に、炉心の強制冷却を行わなくても、原子炉圧力容器外面からの熱除去により炉心からの残留熱除去が可能。HTTRを用いた安全性実証試験により、炉心冷却材流量が喪失した場合に制御棒が挿入されなくても、各種の制限値を上回ることなく、原子炉が安定な状態に維持されることを実証

→ **炉心冷却機能に対する期待度は発電炉ほど高くない**

- ・使用済燃料の冷却機能が喪失しても、燃料の損傷に至るまでに相当の時間的余裕がある

→ **マネジメントによる使用済燃料の冷却を高い信頼性で講じることが可能**

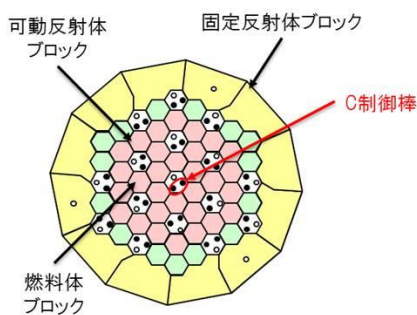
●放射性物質の閉じ込め

- ・炉内蓄積FPが格段に少ない。被覆燃料粒子のFP閉じ込め性能が極めて高く、系外への放出率は極めて小さい。

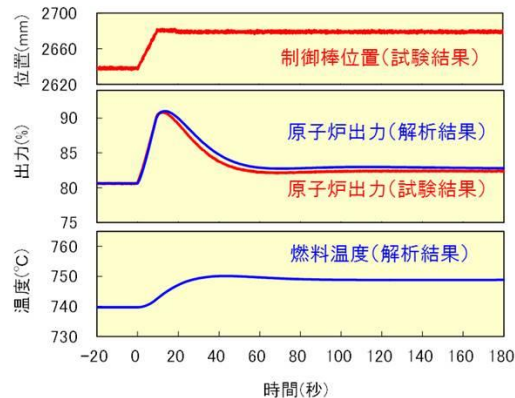
→ **閉じ込め機能に対する期待度は発電炉ほど高くない**



制御棒引き抜き試験



HTTRの炉心断面



試験内容

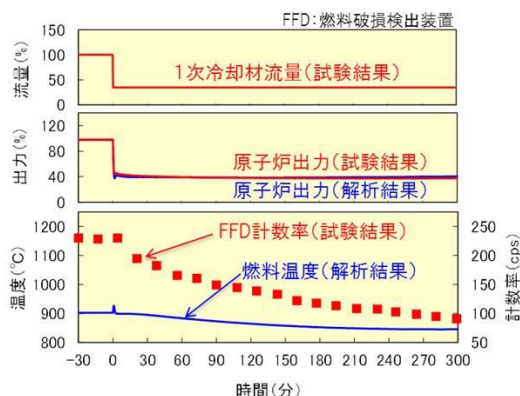
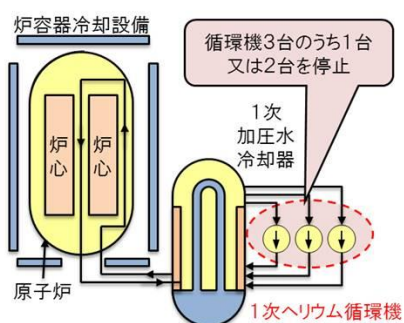
- ◇ 炉心中央のC制御棒を引き抜く⇒反応度投入を模擬
- ◇ 出力制御系を切り離し、C制御棒以外の15対の制御棒を試験開始時の位置に保持⇒原子炉出力制御系の不作動を模擬

得られた知見

- ・ 反応度投入時でも、大きな負のフィードバック特性のみにより原子炉出力の急激な上昇が抑制され、所定の値に静定する。
- ・ 反応度投入時でも、大きい炉心熱容量により炉心温度上昇は緩慢である。



循環機停止試験



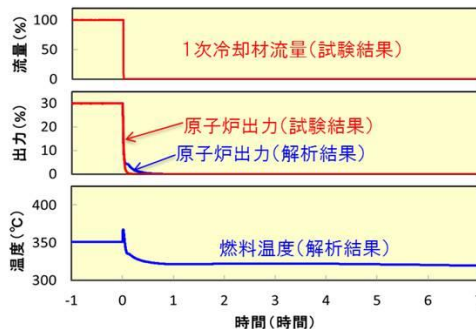
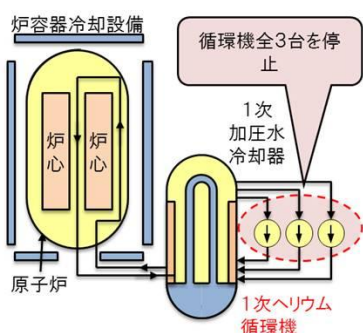
試験内容
 ◇循環機を1台又は2台停止させる⇒強制循環の部分喪失を模擬
 ◇出力制御系を切り離し、全16対の制御棒を試験開始時の位置に保持⇒原子炉を停止させずに原子炉の動特性を確認

得られた知見

- 炉心強制循環冷却機能部分喪失＋原子炉停止系不作動の場合でも、大きな負のフィードバック特性のみにより原子炉出力が低下し、所定の値に静定する。
- 炉心強制循環冷却機能が部分喪失した場合でも、大きい炉心熱容量により炉心温度上昇は緩慢である。



循環機3台停止試験



試験内容
 ◇循環機を3台停止させる⇒強制循環の喪失を模擬
 ◇出力制御系を切り離し、全16対の制御棒を試験開始時位置に保持
 ⇒原子炉停止系不作動を模擬

得られた知見

- 炉心強制循環冷却機能全喪失＋原子炉停止系不作動の場合でも、大きな負のフィードバック特性のみにより原子炉出力が未臨界状態となる。
- 炉心強制循環冷却機能が全て喪失した場合でも、大きい炉心熱容量により炉心温度上昇は緩慢であり、炉心の強制循環冷却がなくとも炉心が自然に冷却される特性を有している。



【概要】

- ・原子炉停止(制御棒挿入)
- ・冷却系不動作(ACS,VCS停止)

【結果】

事象発生後、燃料最高温度は原子炉スクラム後に約1,114℃に低下した後、再び上昇するが初期値を上回ることはない。また、原子炉圧力容器の最高温度は、原子炉圧力容器側部に生じ、事象発生後約22時間で約502℃になるが、制限温度を超えることはない。1次加圧水冷却器伝熱管温度及び中間熱交換器伝熱管温度は、いずれも初期値を上回らない。



原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持できる。

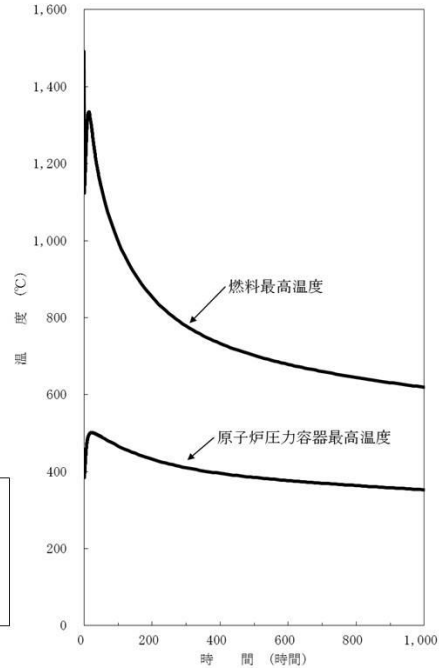


図 全交流動力電源喪失の評価結果 (H27.12.18 第87回審査会合 資料2-2抜粋)



4. 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (10/11)

基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

【ハザード曲線の算定】

- ・竜巻の年発生数の確率密度分布は、ポリヤ分布の適合度が高い。
- ・以下の式に示すように、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がV₀以上となる確率を求め、ハザード曲線を求めた。
- ・ハザード曲線より、年超過確率10⁻⁵における風速を求めると63.6m/sとなる。【補足資料4】

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がV₀を超える確率

$$P_{v_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta}$$

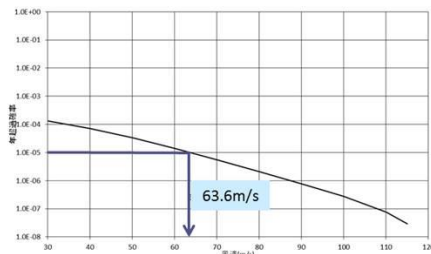
$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{v} - 1\right) \times \frac{1}{v}$ β: 竜巻の年発生数の平均と標準偏差で表されるパラメータ

$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0}$ R(V₀): 1つの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がV₀を超える確率

$E[DA(V_0)] = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V,w,l) dV dw dl$ E[DA(V₀)] 被害面積の期待値

$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0}\right)^{1/1.8} w$ W(V₀): 被害幅のうち風速がV₀を超える部分の幅

v : 竜巻の年平均発生数
 σ : 竜巻の年発生数の標準偏差
 $E[*]$: 期待値を意味する
 $DA(V_0)$: 1つの竜巻の風速がV₀以上となる面積
 A_0 : 竜巻検討地域の面積
 V : 風速
 w : 被害幅
 l : 被害長さ
 $f(v)$: 確率密度分布
 L : 竜巻影響エリアの直径
 S : 竜巻影響エリアの面積
 V_{min} : 被害域幅w内の最小竜巻風速



竜巻最大風速のハザード曲線

(H27.12.18 第87回審査会合 資料2-1抜粋)



重要度分類と設計上の基本目標

- ◆ クラス1: 合理的に達成し得る最高度の信頼性を確保し、かつ、維持すること。
- ◆ クラス2: 高度の信頼性を確保し、かつ、維持すること。
- ◆ クラス3: 一般の産業施設と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持すること。



参考5 想定を上回る竜巻・火山による原子炉施設の損傷に伴う一般公衆への影響評価

<目的>

想定を上回る竜巻や火山事象が発生した場合に、原子炉施設の損傷を仮定し、その影響により原子炉施設から放出した放射性物質による一般公衆への影響について評価する。

<評価対象>

HTTRにおける全ての安全施設(安全重要度クラス1, 2, 3に属するSSC)を対象に、これらの安全施設を内包している建家及び構築物の中から、放射性物質を内包している観点や、竜巻や火山事象が発生した場合の状況等を考慮して、評価対象とする建家及び構築物を抽出する。

- ◆ 安全施設を内包している建家及び構築物

①原子炉建家 ②使用済燃料貯蔵建家 ③搬出入建家 ④冷却塔 ⑤機械棟 ⑥排気筒



- ◆ 放射性物質を内包している建家及び構築物

①原子炉建家 ②使用済燃料貯蔵建家 ③搬出入建家 ⑥排気筒

- ◆ 竜巻や火山事象が発生した場合の状況等を考慮して評価対象を抽出

評価対象

①原子炉建家 ②使用済燃料貯蔵建家



評価対象外

③搬出入建家: 放射性物質を内包している期間は、燃料移送時の短時間のため評価対象外とする。
⑥排気筒: 竜巻や火山事象が発生した場合、予め気体廃棄物の放出を停止することができることから、評価対象外とする。



1. 事象の説明

- ・発電炉ガイドを参考に設定した設計風速(100m/s)の竜巻が発生することを想定する。
- ・設計飛来物である鋼製材は仮想的に建家の全ての高さ方向に到達することを想定する。

【原子炉建家】

- ・竜巻の発生を検知し、影響が及ぶ前に運転員により原子炉を手動停止(スクラム)する。竜巻により冷却塔、空気冷却器等の屋外機器は損傷することを想定し、機能を期待できないものとする。
- ・その後、発生した竜巻により、原子炉建家に鋼製材が衝突し、オペレーションフロア(オペフロ)の上部側面の一部に裏面剥離が生じ、コンクリート塊が、格納容器(CV)と使用済燃料貯蔵プール(SFP)上部に衝突する¹⁾。

【SF建家】

- ・発生した竜巻により、SF建家に鋼製材が衝突し、外壁の一部に裏面剥離が生じ、コンクリート塊が、使用済燃料貯蔵セル(SFセル)上部に衝突する。

2. 影響評価

【原子炉建家】

核物質防護情報が含まれているため非公開

- ・裏面剥離に対して、CVの燃料交換ハッチ蓋厚さ(44.5mm)、及びSFPの貯蔵ラックプラグの蓋板厚さ を有していることから、コンクリート塊の衝突による原子炉圧力バウンダリ及び使用済燃料設備への影響はないと考えられる¹⁾。
- ・原子炉は、固有の安全特性により自然冷却が可能である。また、SFPは、貯蔵ラックへの影響がないことから貯蔵機能を維持できる。なお、商用電源又は非常用発電機等が復旧出来る場合は、冷却回復を行う。

【SF建家】

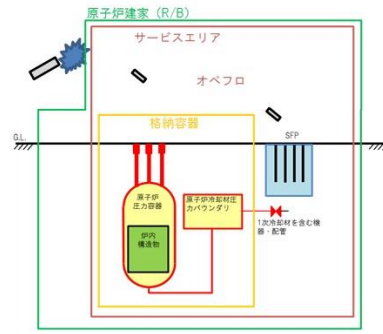
核物質防護情報が含まれているため非公開

- ・裏面剥離に対して、SFセルの貯蔵ラック遮へいプラグの蓋板厚さ を有していることから、コンクリート塊の衝突による使用済燃料設備への影響はないと考えられる。
- ・SFセルは、貯蔵ラックへの影響がないことから貯蔵機能を維持できる。なお、商用電源又は非常用発電機等が復旧出来る場合は、冷却回復を行う。

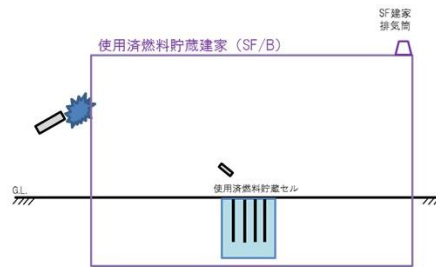


発電炉ガイドを参考に設定した設計風速100m/sの竜巻による建家の損傷を考慮しても、放射性物質の放出は考えられず、耐震BCクラス施設の機能喪失を想定した一般公衆の被ばく量を上回ることはないと判断。

1)平成28年11月28日 審査会合資料 資料1-1



原子炉建家概要説明図



使用済燃料貯蔵建家概要説明図



1. 事象の説明

- ・評価に用いる火山灰は、仮想的に建家許容堆積荷重を超える層厚を想定する。

【原子炉建家】

- ・火山噴火による敷地への降灰可能性を確認し、影響が及ぶ前に運転員により原子炉を手動停止(スクラム)する。火山灰の影響により商用電源は喪失し、降灰中には非常用発電機は期待できないものとする。
- ・当該区画の積載許容荷重を超えることに備え、敷地での降灰を確認した後、除灰作業を開始するとともに、事前にCV隔離弁を閉とし、CVを隔離する。
- ・その後、原子炉建家許容堆積荷重を超える火山灰により損傷する恐れのある原子炉建家屋根(オペフロ頂部)が一部破損し、破損したコンクリート塊がCVとSFP上部へ落下する。

【SF建家】

- ・当該区画の積載許容荷重を超えることに備え、敷地での降灰を確認した後、除灰作業を開始する。
- ・SF建家許容堆積荷重を超える火山灰によりSF建家頂部が一部破損し、破損したコンクリート塊がSFセル上部へ落下する。

2. 影響評価

【原子炉建家】

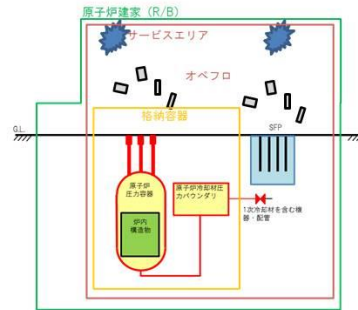
- ・オペフロ頂部の破損に対して、コンクリート塊が一部落下したとしても、CVの燃料交換ハッチ蓋厚さ、SFP上部の上蓋及び貯蔵ラックプラグ等の厚さを考慮すれば、コンクリート塊の落下による原子炉圧力バウンダリ及び使用済燃料貯蔵設備への影響はないと考えられる。
- ・原子炉は、固有の安全特性により自然冷却が可能である。また、SFPは、貯蔵ラックへの影響がないことから貯蔵機能を維持できる。なお、商用電源又は非常用発電機等が復旧出来る場合は、冷却回復を行う。

【SF建家】

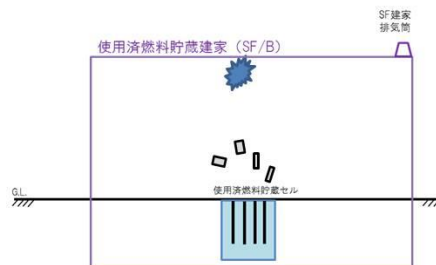
- ・SF建家頂部の破損に対して、コンクリート塊が一部落下したとしても、SFセル上部の上蓋及び貯蔵ラックプラグ等厚さを考慮すれば、コンクリート塊の落下による使用済燃料貯蔵設備への影響はないと考えられる。
- ・SFセルは、貯蔵ラックへの影響がないことから貯蔵機能を維持できる。なお、商用電源又は非常用発電機等が復旧出来る場合は、冷却回復を行う。



仮想的に建家許容堆積荷重を超える層厚を想定し、建家屋根の損傷を考慮しても、放射性物質の放出は考えられず、耐震BCクラス施設の機能喪失を想定した一般公衆の被ばく量を上回ることはないと判断。



原子炉建家概要説明図



使用済燃料貯蔵建家概要説明図



竜巻、火山事象に対する影響確認(設計上考慮する施設以外)

補足説明資料

分類	安全機能の重要度分類		重要安全施設	設置場所	竜巻(*1)		火山(*1)		
	安全機能	構築物・系統及び機器			評価	評価結果(*3)	評価	評価結果(*3)	
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	過剰反応度の印加防止	スタンドパイプ	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
		スタンドパイプクロージャ	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	炉心の形成	炉心支持鋼構造物(炉心拘束機構の拘束バンドは除く)及び炉心支持黒鉛構造物のうちサポートポスト(支持機能のみ)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
MS-1	原子炉の緊急停止未臨界維持	制御棒系	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止	1次冷却設備の安全弁(開機能)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	過剰反応度の抑制	スタンドパイプ固定装置	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	工学的安全施設及び原子炉停止系への起動信号の発生	安全保護系(停止系)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	安全上特に重要な関連機能	中央制御室	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
PS-2	炉心の形成	炉心構成要素(燃料体、可動反射体ブロック、制御棒案内ブロック)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
		炉心支持鋼構造物のうち炉心拘束機構の拘束バンド及び炉心支持黒鉛構造物(サポートポスト(支持機能のみ)を除く)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	放射性物質の貯蔵(ただし、原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されているものを除く)	原子炉建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール(冠水維持機能)、貯蔵セル及び貯蔵ラック(上蓋を除く)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
		使用済燃料貯蔵建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵セル及び貯蔵ラック(上蓋を除く)	—	SF/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
		気体廃棄物処理設備	—	—	屋外(排気筒)	○	減衰タンクから放出中は、系統内のバルブを「閉」とすることにより、放出を停止するため、排気筒からの放出低減は不要(概要説明図1)	○	減衰タンクから放出中は、系統内のバルブを「閉」とすることにより、放出を停止するため、排気筒からの放出低減は不要(概要説明図1)
			—	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	1次冷却材の内蔵(ただし、原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く)	1次ヘリウム純化設備	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	安全弁の吹止り	1次冷却設備の安全弁(吹止り機能)	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	実験・照射に供する機能	実験設備の一部	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
	燃料の安全な取扱い	燃料交換機	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内	

竜巻、火山事象に対する影響確認(設計上考慮する施設以外)

補足説明資料

分類	安全機能の重要度分類		重要安全施設	設置場所	竜巻(*1)		火山(*1)	
	安全機能	構築物・系統及び機器			評価	評価結果(*3)	評価	評価結果(*3)
MS-2	未臨界維持	後備停止系	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	炉心冷却	補助冷却設備	—	R/B(He系) 屋外(水系のファン等)	○	原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能なことから機能維持は不要(概要説明図2)	○	原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能なことから機能維持は不要(概要説明図2)
		炉容器冷却設備(*2)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	放射性物質の閉じ込め、放射線の遠へい及び放出低減	原子炉格納容器(隔離弁を含む)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		非常用空気浄化設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過熱防止 原子炉停止後の除熱	補助冷却設備	—	R/B(He系) 屋外(水系のファン等)	○	原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能なことから機能維持は不要(概要説明図2)	○	原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能なことから機能維持は不要(概要説明図2)
		炉容器冷却設備(*2)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	工学的安全施設及び原子炉停止系への起動信号の発生	安全保護系(工学的安全施設)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	放射性物質放出の低減	排気管	—	屋外	○	圧力バウンダリの機能が維持されるため非常用空気浄化設備が起動することなく機能維持は不要(概要説明図2)	○	圧力バウンダリの機能が維持されるため非常用空気浄化設備が起動することなく機能維持は不要(概要説明図2)
	事故時のプラント状態の把握	事故時監視計器の一部	○	R/B	—	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設
	中央制御室外からの安全停止	中央制御室外原子炉停止盤	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	安全上重要な関連機能	中央制御室系換気空調装置	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	安全上特に重要な関連機能	非常用発電機	—	R/B (吸気口は屋外)	○	・補助冷却設備、炉容器冷却設備、非常用空気浄化設備の機能維持が不要なため、これらの設備へ動力源としての電力供給は不要。 監視系については、直流電源等から監視に必要な電源が供給可能、蓄電池枯退後は運転員により可搬型計器等を用いた監視(計器等の準備を含む)が十分な時間的余裕をもって可能なことから、蓄電池への電力供給は不要。(概要説明図2) ・使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール・貯蔵ラックは、冷却しなくても、十分な時間的余裕をもって貯蔵機能は維持できるため、プール水冷却浄化設備への動力源としての電力供給は不要(概要説明図3) ・使用済燃料貯蔵建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵セル・貯蔵ラックは、冷却しなくても機能維持できるため、排風機の動力源としての電力供給は不要(概要説明資料4)	○	・補助冷却設備、炉容器冷却設備、非常用空気浄化設備の機能維持が不要なため、これらの設備へ動力源としての電力供給は不要。 監視系については、直流電源等から監視に必要な電源が供給可能、蓄電池枯退後は運転員により可搬型計器等を用いた監視(計器等の準備を含む)が十分な時間的余裕をもって可能なことから、蓄電池への電力供給は不要。(概要説明図2) ・使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール・貯蔵ラックは、冷却しなくても、十分な時間的余裕をもって貯蔵機能は維持できるため、プール水冷却浄化設備への動力源としての電力供給は不要(概要説明図3) ・使用済燃料貯蔵建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵セル・貯蔵ラックは、冷却しなくても機能維持できるため、排風機の動力源としての電力供給は不要(概要説明資料4)
		補機冷却水設備	—	C/T (プール、ファンは屋外)	○	・補助冷却設備、炉容器冷却設備の機能維持が不要なため、これらの設備へ冷却水供給は不要。(概要説明図2) ・原子炉建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール・貯蔵ラックは、冷却しなくても、十分な時間的余裕をもって貯蔵機能は維持できるため、プール水冷却設備への冷却水供給は不要(概要説明図3)	○	・補助冷却設備、炉容器冷却設備の機能維持が不要なため、これらの設備へ冷却水供給は不要。(概要説明図2) ・原子炉建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール・貯蔵ラックは、冷却しなくても、十分な時間的余裕をもって貯蔵機能は維持できるため、プール水冷却設備への冷却水供給は不要(概要説明図3)
		制御用圧縮空気設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
直流電源設備		—	R/B	○	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	
安全保護系用交流無停電電源装置		—	R/B	○	設計上の考慮の対象施設	—	設計上の考慮の対象施設	

竜巻、火山事象に対する影響確認(設計上考慮する施設以外)

補足説明資料

分類	安全機能の重要度分類		重要安全施設	設置場所	竜巻(*1)		火山(*1)	
	安全機能	構築物・系統及び機器			評価	評価結果(*3)	評価	評価結果(*3)
PS-3	1次冷却材の保持 (PS-1, PS-2以外のもの)	計装配管	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		1次ヘリウムサンプリング設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		1次ヘリウム貯蔵供給設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	放射性物質の貯蔵	液体廃棄物処理設備の廃液槽	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		固体廃棄物処理施設	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	1次冷却材の循環	1次ヘリウム循環機	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	2次冷却系の通常時冷却	2次ヘリウム冷却設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		加圧水冷却設備	—	R/B (ファンは屋外)	○	原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能なことから機能維持は不要(概要説明図2)	○	原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能なことから機能維持は不要(概要説明図2)
	1次・2次ヘリウムの差圧維持	2次ヘリウム貯蔵供給設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	電源	非常用発電機以外の設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	プラント計測・制御(安全保護機能を除く)	原子炉制御設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		原子炉計装	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		プロセス計装	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	プラント補機	制御用圧縮空気設備(MS-2以外のもの)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	炉容器冷却設備の通常時冷却	炉容器冷却設備(通常時冷却)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	実験・照射に供する機能	実験設備の一部(PS-2以外のもの)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	核分裂生成物の1次冷却材中への放散防止	被覆層	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		黒鉛スリーブ(金属性核分裂生成物のみ)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
1次冷却材の浄化	1次ヘリウム純化設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内	

竜巻、火山事象に対する影響確認(設計上考慮する施設以外)

補足説明資料

分類	安全機能の重要度分類		重要安全施設	設置場所	竜巻(*1)		火山(*1)	
	安全機能	構築物・系統及び機器			評価	評価結果(*3)	評価	評価結果(*3)
MS-3	出力上昇の抑制	制御棒引抜阻止インターロック	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		制御棒パターンインターロック	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	炉心の除熱量の減少の抑制	加圧水循環ポンプの電流しゃ断器	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		1次加圧水冷却器加圧水入口温度高インターロック	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		2次加圧水冷却器加圧水流量低インターロック	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	原子炉冷却材圧力バウンダリの温度上昇の抑制	ヘリウム循環機の周波数変換器(停止機能)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	過冷却による反応度添加の抑制	ヘリウム循環機の周波数変換器(最大回転数の制限機能)	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
	緊急時の防災対策上重要なもの及び異常状態の把握	事故時サンプリング系	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		通信連絡設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		放射線監視設備	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		事故時監視計器の一部	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		消火設備	—	R/B SF/B C/T (屋外消火栓、高果水槽は屋外)	○	消火器等で対応	○	消火器等で対応
			—	機械種 (消火栓ポンプ、消火用水)	○	消火器等で対応	○	消火器等で対応
		安全避難通路	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内
		非常用照明	—	R/B	◎	建家内	◎	建家内

R/B: 原子炉建家、SF/B: 使用済燃料貯蔵建家、C/T: 冷却塔

◎: 竜巻、火山に対し安全機能を維持できる。

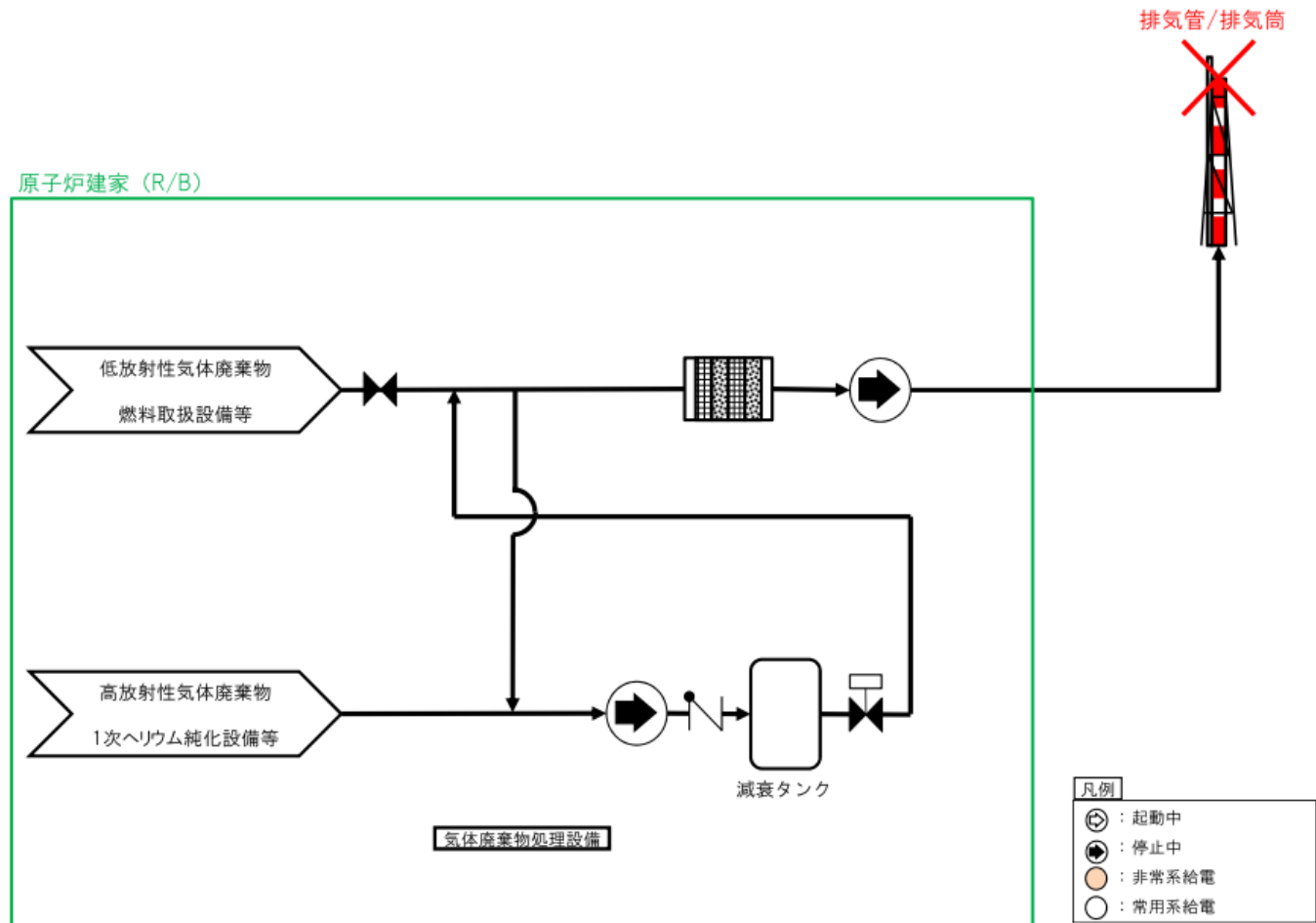
○: 火山、竜巻により損傷したとしても、原子炉は安全に停止・維持され、使用済燃料の貯蔵は確保出来る。

(*1): 竜巻、火山が発生した場合、原子炉施設へ影響が及ぶ前に予め原子炉を手動停止(スクラム)する。

(*2): 関連系(補機冷却水設備のファン等)が屋外のため期待しない。

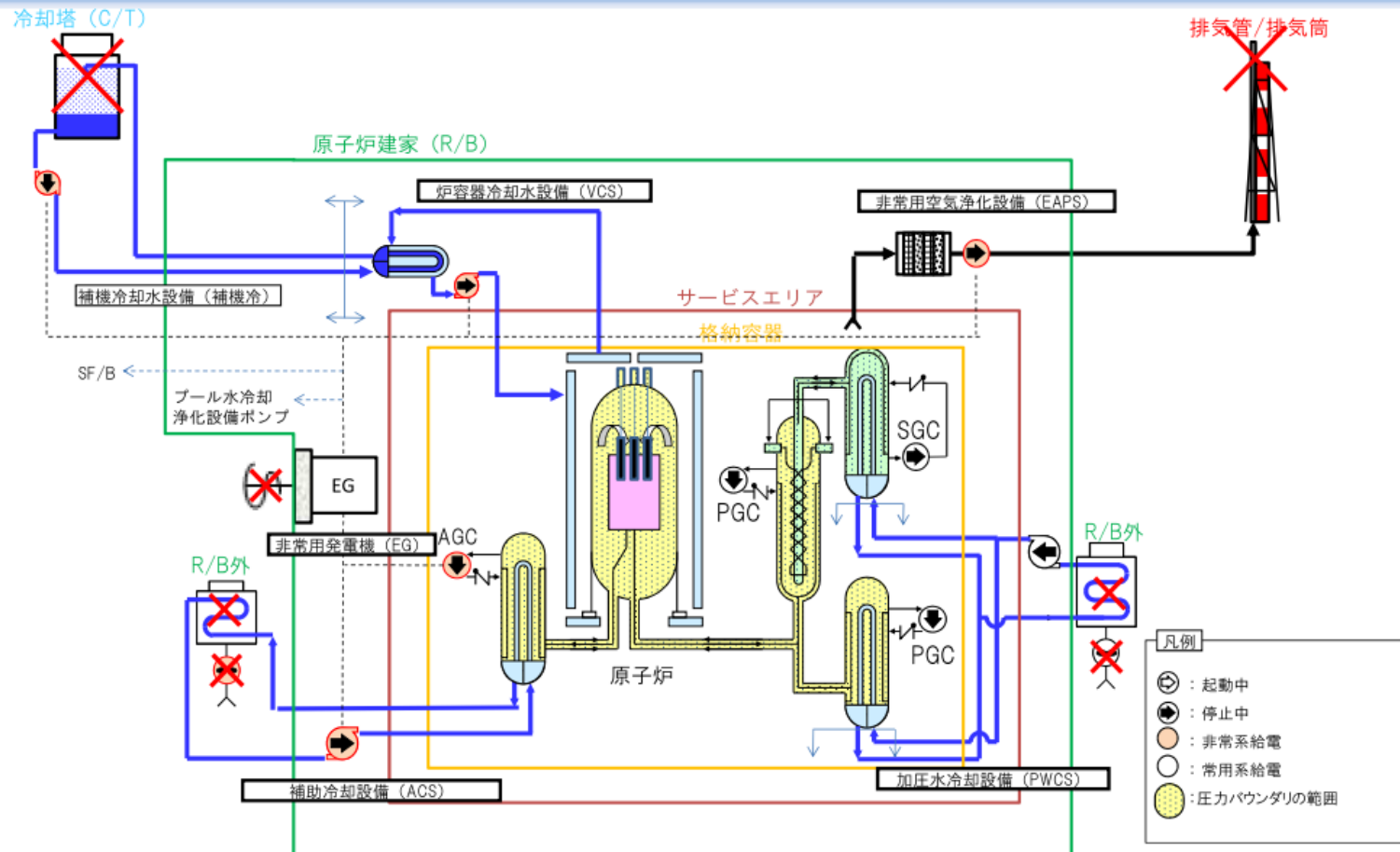
(*3): 評価結果で、「建家内」と評価されているSSCについては、設計上の考慮の対象施設の評価において、建家の構造健全性を評価するため、安全機能は損なわれない。

概要説明図1 放射性物質の貯蔵機能(気体廃棄物処理設備)に対する評価概要



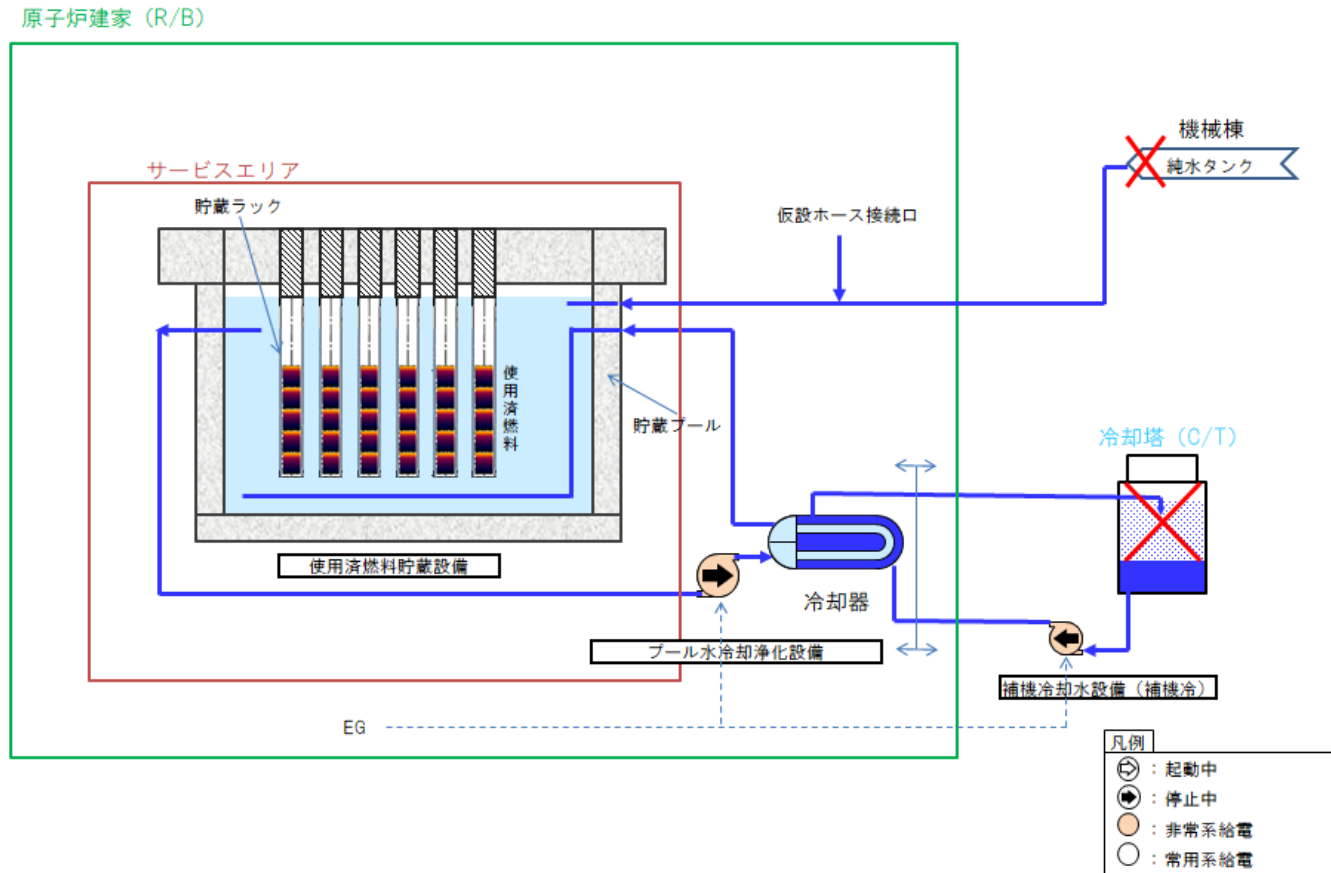
□ 放射性物質の貯蔵【気体廃棄物処理設備】
減衰タンクから放出中は、系統内のバルブを「閉」とすることにより、放出を停止するため、排気筒からの放出低減は不要

概要説明図2 炉心冷却機能、放出低減機能等に対する評価概要



- ❑ 炉心冷却・圧力バウンダリ過熱防止・停止後の除熱【VCS、ACS】
 原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能。
- ❑ 放射性物質の放出低減【EAPS】
 圧力バウンダリの機能が維持されるため非常用空気浄化設備が起動することはない機能維持は不要。
- ❑ 安全上特に重要な関連機能【EG、補機冷】
 ・ACS、VCS、EAPSの機能維持が不要なため、これらの設備へ動力源としての電力供給は不要。監視系については、直流電源等から監視に必要な電源が供給可能、蓄電池枯渇後は運転員により可搬型計器等を用いた監視(計器等の準備を含む)が十分な時間的余裕をもって可能なことから、蓄電池への電力供給は不要。(EG)
 ・ACS、VCSの機能維持が不要なため、これらの設備への冷却水供給は不要。(補機冷)
- ❑ 2次冷却系の通常時冷却【PWCS】
 原子炉を停止し未臨界となった後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されると共に、圧力バウンダリの健全性も維持され、原子炉は安全に停止・維持可能。

概要説明図3 放射性物質の貯蔵機能(原子炉建家内使用済燃料貯蔵設備)に対する評価概要

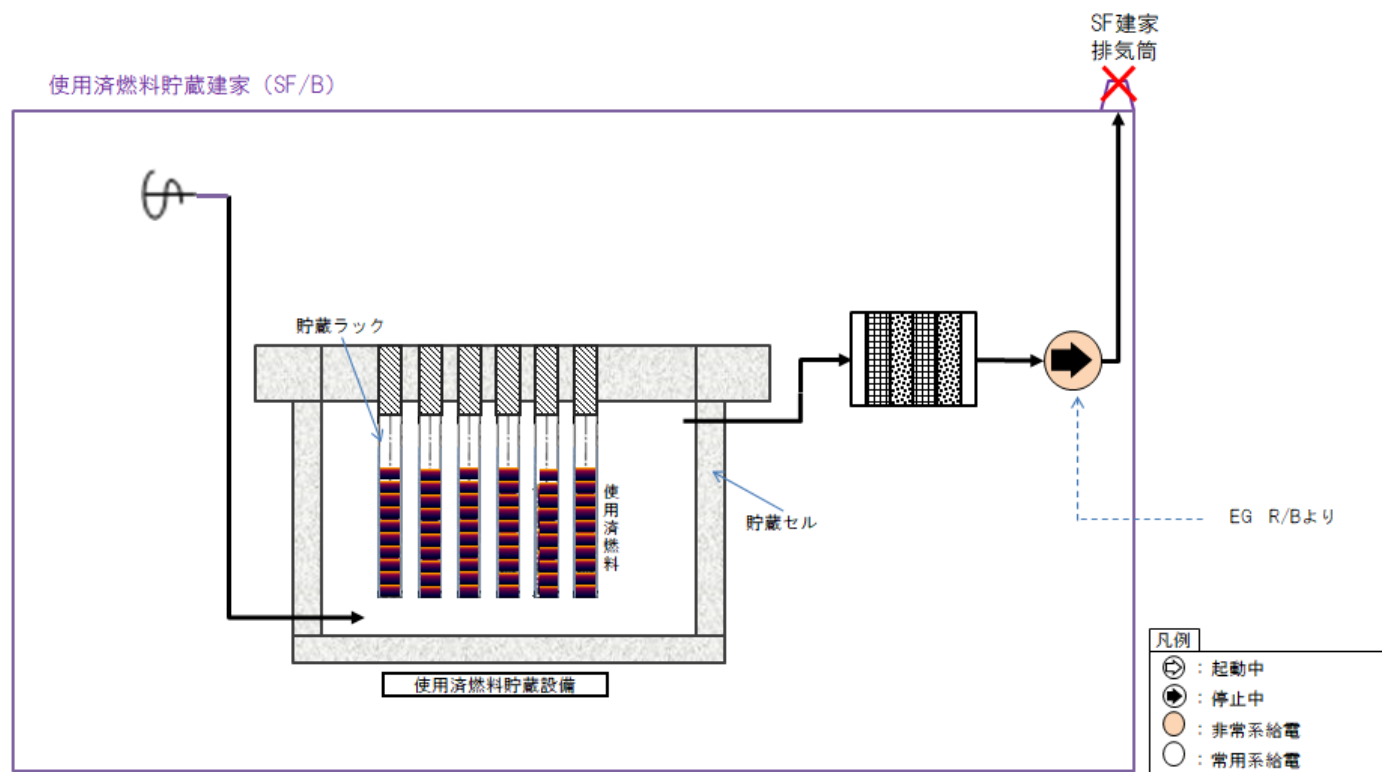


□ 安全上特に重要な関連機能【EG、補機冷】

- ・貯蔵プール・貯蔵ラックは、冷却しなくても、十分な時間的余裕*をもって機能維持できるため、プール水冷却浄化設備への動力源としての電力供給は不要。(EG)
- ・同様にプール水冷却浄化設備への冷却水供給は不要。(補機冷)

*約24日で使用済燃料貯蔵ラックの強度を確保できなくなる800℃に至る。

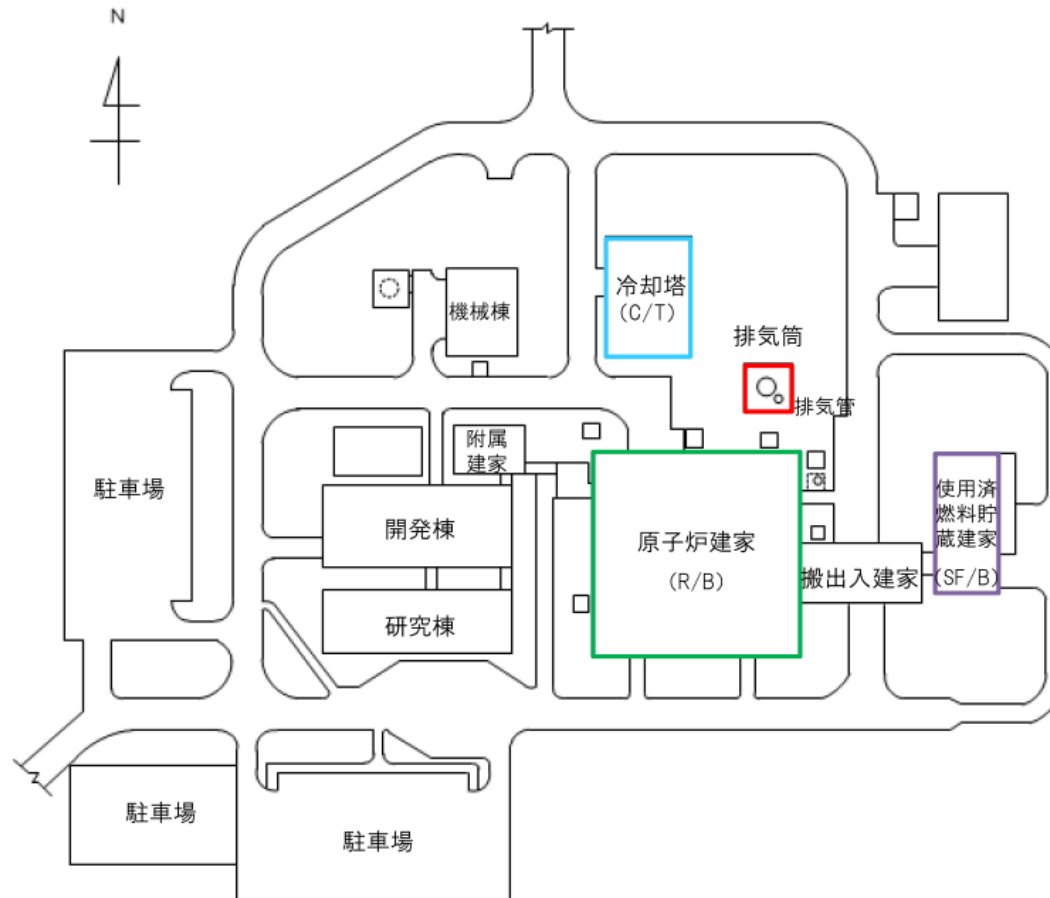
概要説明図4 放射性物質の貯蔵機能(使用済燃料貯蔵建家内使用済燃料貯蔵設備)に対する評価概要



□ 安全上特に重要な関連機能【EG】
 ・貯蔵セル・貯蔵ラックは、冷却しなくても機能維持*できるため、排風機の動力源としての電力供給は不要。(EG)

*使用済燃料貯蔵ラックの最高温度は約670℃となり、使用済燃料貯蔵ラックの健全性を維持できなくなる温度800℃を超えることはない。

建家配置概要図



HTTR原子炉施設

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止 (竜巻)



第6条 外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)

目次

1. 要求事項・基本的な考え方
 2. 評価の手順
 3. 竜巻検討地域の設定
 4. 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定
 5. 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定
 6. 設計荷重の設定
 7. 竜巻影響評価対象施設の抽出
 8. 建屋・構築物の構造健全性等の確認
 9. 設備の構造健全性等の確認
 10. 竜巻随件事象に対する考慮
 11. 竜巻による影響評価の結果
- 補足資料



1. 要求事項・基本的な考え方(1/2)

外部からの衝撃による損傷の防止について、設置許可基準規則第6条における要求事項、その解釈及び基本的な考え方は以下のとおりである。

試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則		基本的な考え方
規則	解釈	
<p>第6条 安全施設は、想定される自然現象(地震及び津波を除く。次項において同じ。)が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。</p>	<p>第6条(外部からの衝撃による損傷の防止) 1 第6条は、設計基準において想定される自然現象(地震及び津波を除く。)に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等への措置を含む。</p> <p>2 第1項に規定する「想定される自然現象」とは、敷地の自然環境を基に、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。</p> <p>3 第1項に規定する「想定される自然現象(地震及び津波を除く。)が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組合せに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として試験研究用等原子炉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>1 防護対象施設は、「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針」(平成3年7月18日原子力安全委員会決定)の「添付 水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方」を参考に、HTTRの特徴・経験を踏まえて分類された安全機能の重要度が特に高い施設(自然現象に対する重要安全施設)とし、当該施設については、最大風速92m/sの竜巻の発生を考慮しても、原子炉施設の安全性を確保するために必要な安全機能を損なわない設計とする。</p> <p>気象庁の「竜巻等の突風データベース」(1961～2012年)に基づき、竜巻検討地域における過去に発生した竜巻による最大風速及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速によって定めた基準竜巻の最大風速は92m/sである。HTTR原子炉施設の立地する地域特性から地形効果による風速の割り増しは必要ないため、設計竜巻の最大風速は92m/sである。</p> <p>設計竜巻による設計荷重に対して、原子炉建家に生じる層せん断力は、設計用地震力値(設置時)より十分低く、原子炉建家の構造健全性は維持できることを確認する。</p>



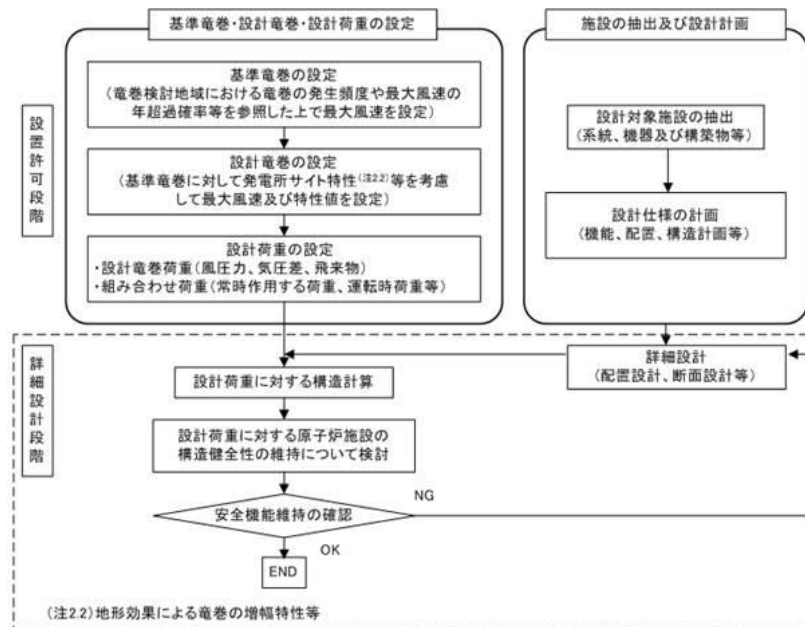
1. 要求事項・基本的な考え方(2/2)

試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則		基本的な考え方
規則	解釈	
<p>2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。</p>	<p>4 第2項に規定する「重要安全施設」については、「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針」(平成3年7月18日原子力安全委員会決定)の「添付水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方」の「4. (1)自然現象に対する設計上の考慮」に示されるものとする。水冷却型研究炉以外の炉型についても、これを参考とすること。</p> <p>5 第2項に規定する「大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象」とは、対象となる自然現象に対応して、最新の科学的技術的知見を踏まえて適切に予想されるものをいう。なお、過去の記録、現地調査の結果、最新知見等を参考にし、必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させるものとする。</p> <p>6 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは、大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。</p>	<p>2 原子炉施設のうち、次に示す重要安全施設は、予想される自然現象のうち、最も過酷と考えられる条件、又は自然力に設計基準事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮する。 (1)クラス1 (2)クラス2のうち、PS-2及びMS-2のうち設計基準事故時にプラント状態を把握する機能を有する系統</p> <p>竜巻発生時においても重要安全施設の安全機能を維持できることを確認する。 なお、設計竜巻の発生頻度が小さい(10⁻⁶/年程度)ため、竜巻と設計基準事故等が同時に発生することはない。</p> <p>重要安全施設の設置場所は、全て屋内であり、竜巻防護施設の外殻となる施設により防護されており、竜巻による影響はないことから安全性を損なうことがないことを確認する。</p>



「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下、「ガイド」という。)を参考に、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の確認を実施する。基本設計フローを以下に示す。

【基本設計フロー】



竜巻検討地域の設定

(1) 竜巻検討地域の設定方針

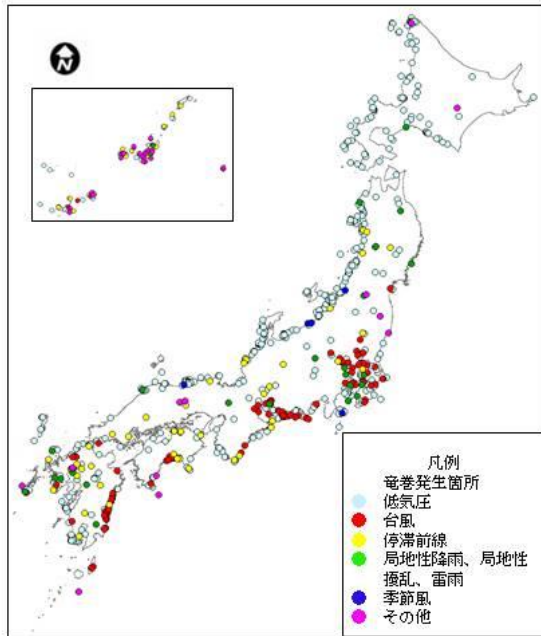
竜巻検討地域は、HTTRが立地する地域及び竜巻発生 viewpoint から、HTTRが立地する地域と気象条件等が類似の地域から設定した。

(2) 気象条件の類似性(総観場)による検討

気象庁の「竜巻等の突風データベース」の総観場を、低気圧、台風、停滞前線、局地的降雨等、季節風及びその他の6つの発生要因に分類し、竜巻発生分布の特徴を分析した。

竜巻検討地域の設定

【気象要因】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成



気象要因別の竜巻発生箇所

竜巻発生時の気象条件に基づき、発生実績の整理を行い、総観場の分類ごとに発生場所の傾向を確認した。図に気象要因別の竜巻発生位置を示す。

気象条件は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」の総観場を基に、低気圧、台風、停滞前線、局地的降雨(局地的擾乱、雷雨含む)、季節風、その他の6つに分類した。なお、低気圧には、気圧の谷、暖気の移流、寒気の移流、前線(停滞前線除く)を含めている。【補足資料1】

竜巻検討地域の設定

気象条件の観点から類似性のある地域を保守的に選定

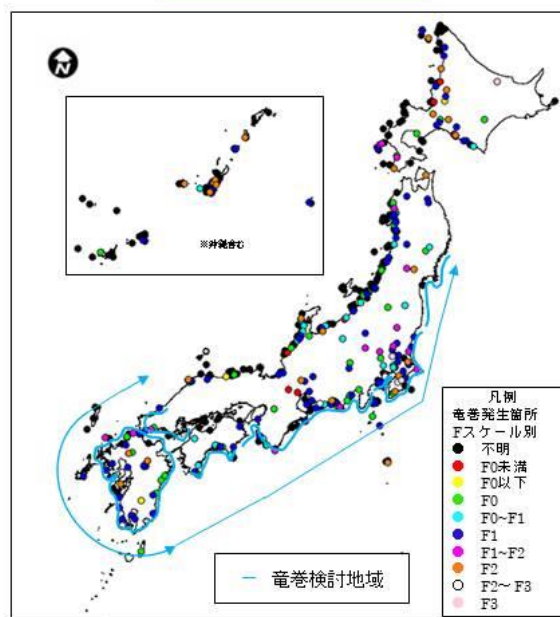


各気象要因により抽出したエリアの重なりを考慮し、台風起因と停滞前線起因で評価すると、九州、山口の沿岸部及び太平洋側沿岸部において竜巻発生の観点から類似性があると判断した。



▽ 宮城県、福島県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県、山口県、及び九州(沖縄県を含む。)の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの地域を竜巻検討地域に設定した。(面積: 約89500km²)

竜巻検討地域



基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

(1) 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設計方針

「過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})」、「竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})」のうち大きな風速とする。

(2) 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

日本で過去(1961年から2012年6月)に発生した最大の竜巻は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」によるとF3スケール(風速:70m/s~92m/s)であることから、過去に発生した竜巻による最大風速はF3クラスの最大風速である92m/sとした。

F3の竜巻発生リスト(1961年~2012年6月)

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



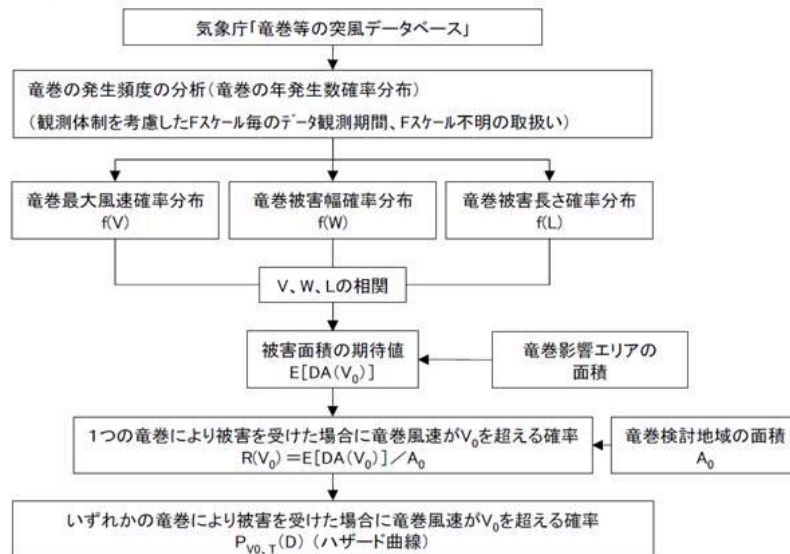
過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) = 92m/s

基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

(3) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

ハザード曲線の算定は、竜巻データの分析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率密度分布および相関係数の算定、ならびにハザード曲線の算出によって構成される。

ハザード算定フローを以下に示す。



基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

【ハザード曲線の算定範囲】

- ・竜巻最大風速のハザード曲線は、1961年～2012年6月までに発生した竜巻観測についてデータベース化されている気象庁の「竜巻等の突風データベース」を基に算定した。
- ・観測体制は近年になるほど強化されており、年代により観測値の品質にばらつきあり。
- ・2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻が顕著である。また、これら海上竜巻の多くは、そのFスケールや被害幅・長さ等の詳細が「不明」となっている。

【ハザード曲線の算定ケース】

- ・竜巻発生確認数のばらつきや、発生の偏りがあることから、ハザード曲線に保守性をもたせるために、竜巻検討地域における海側及び陸側5km範囲内における算定を行った。【補足資料2】

基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

【竜巻の発生頻度の分析】

- ・竜巻の発生数は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」における1961年～2012年6月までの51.5年間のデータを基にした。
- ・観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮して、竜巻データ分析の対象観測期間を以下のように分類した。
 - a. 観測体制が強化された2007年～2012年6月の5.5年間
 - b. 観測体制が整備された1991年～2012年6月の21.5年間
 - c. 観測記録が整備された1961年～2012年6月の51.5年間

【竜巻発生頻度の分析方針】

- ・F0及び不明竜巻に関しては、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採用する。
- ・F1竜巻は被害が比較的軽微であり、1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ・F2及びF3竜巻は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ため、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採用する。

【Fスケール不明竜巻の取扱い】

- ・Fスケール不明の海上竜巻については、その竜巻スケールを推定することは困難であるが、海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様であるとし、陸上竜巻の各Fスケールに配分した。【補足資料3】

基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

【竜巻の発生頻度の分析】

竜巻検討地域	発生数の統計	陸上で発生した竜巻						海上で発生して陸上へ移動した竜巻						海上竜巻		総数
		F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F0	F1	F2	F3	F不明	小計	F不明		
1961～2012/6(51.5年間)	期間内総数	38	78	30	3	14	163	13	43	19	3	7	85	98	346	
	平均値	0.74	1.51	0.58	0.06	0.27	3.17	0.25	0.83	0.37	0.06	0.14	1.65	1.90	6.72	
	標準偏差	1.85	1.50	0.73	0.24	0.66	2.98	0.52	1.29	0.63	0.24	0.40	1.77	4.77	8.06	
1991～2012/6(21.5年間)	期間内総数	38	47	12	1	10	108	13	33	9	0	5	60	98	266	
	平均値	1.77	2.19	0.56	0.05	0.47	5.02	0.60	1.53	0.42	0.00	0.23	2.79	4.56	12.37	
	標準偏差	2.56	1.72	0.75	0.22	0.92	3.58	0.67	1.68	0.67	0.00	0.43	2.03	6.62	9.93	
2007～2012/6(5.5年間)	期間内総数	27	10	1	0	6	44	7	3	0	0	3	13	73	130	
	平均値	4.91	1.82	0.18	0.00	1.09	8.00	1.27	0.55	0.00	0.00	0.55	2.36	13.27	23.64	
	標準偏差	3.73	1.73	0.43	0.00	1.64	5.08	0.80	0.58	0.00	0.00	0.58	1.25	9.12	14.87	
疑似51.5年間(陸上竜巻)	期間内総数	253	113	30	3	57	456	66	80	19	3	29	197	684	1337	
	平均値	4.91	2.19	0.58	0.06	1.11	8.85	1.27	1.55	0.37	0.06	0.55	2.36	13.28	25.96	
	標準偏差	3.73	1.72	0.73	0.24	1.64	4.48	0.80	1.68	0.63	0.24	0.58	2.06	9.12	10.37	
疑似51.5年間(全竜巻)	期間内総数	870	363	94	11	138	1338									
	平均値	16.89	7.05	1.83	0.21	25.88										
	標準偏差	6.51	3.19	1.31	0.44	7.38										

・1961年以降の51.5年間で346個の竜巻が観測されている。そのうちF1及びF2竜巻が約5割を占め、Fスケール不明竜巻の数も約4割となっている。Fスケール不明竜巻の多くは2007年以降の5.5年間に観測されており、それらのほとんどが海上竜巻である。F0竜巻についても、その6割強が2007年以降に観測されている。

F2およびF3竜巻については、51.5年間で55個観測されているが、2007年以降の発生数はF2竜巻が1件のみであり、観測体制の強化に伴う影響を受けていないことが示唆される。



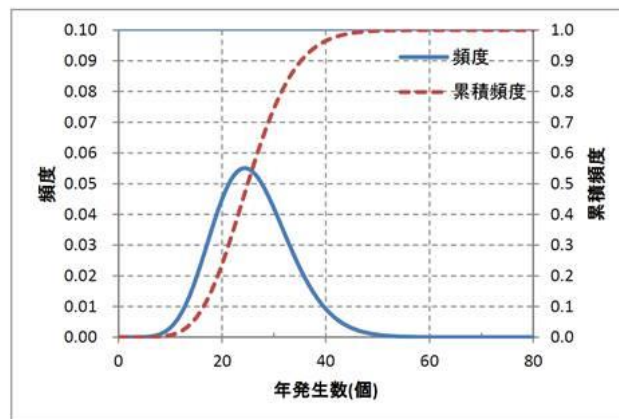
・分析方針に従い、擬似的な51.5年間のデータや統計量をFスケール毎に算出した結果、竜巻検討地域における竜巻総発生数は1338個で、約6割がF0竜巻、約3割がF1竜巻と推計した。また、海上竜巻を考慮したため、F2竜巻は94個、F3竜巻は11個に増加した。

基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

【竜巻の年発生数の確率分布】

確率分布の設定にあたっては、竜巻は極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから、カイデ及び原子力安全基盤機構の委託成果*1にならってポリア分布により設定した。

*：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. 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定(7/11)

基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

【竜巻の被害幅、被害長さの分析】

竜巻発生数と同時に、竜巻被害幅、被害長さの観測データを分析方針に従い推定した。

【分析方針】

- ①統計量を確保するため、1961年以降のデータを使用し、Fスケール別に被害幅、被害長さデータを抽出する。
- ②各スケール別の51.5年間のデータ数は、観測値ではなく疑似データの発生数とする。
- ③①の被害幅、被害長さデータを大きい順に並び替え、51.5年間の発生数分、繰り返しサンプリングを行い、疑似データを作成する。
- ④③で作成したデータの平均値、標準偏差を求める。

竜巻被害幅の分布結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害幅 の統計(m)	Fスケール				小計	Fスケール不明	総数 (含む不明)
		F0	F1	F2	F3			
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	41	102	42	6	191	155	346
	平均値(m)	58.41	121.90	210.24	525.00	140.36		
	標準偏差(m)	58.46	183.25	340.93	740.78	255.88		
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	870	363	94	11	1338	0	1338
	平均値(m)	59.30	132.54	250.64	563.64	96.76		
	標準偏差(m)	58.50	190.86	382.18	727.36	175.85		

竜巻被害長さの分布結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害長さ の統計(km)	Fスケール				小計	Fスケール不明	総数 (含む不明)
		F0	F1	F2	F3			
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	42	108	44	6	200	146	346
	平均値(km)	1.13	2.57	4.81	13.93	3.10		
	標準偏差(km)	0.94	2.96	4.38	14.82	4.44		
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	870	363	94	11	1338	0	1338
	平均値(km)	1.14	2.87	5.36	14.86	2.02		
	標準偏差(km)	0.93	3.12	4.77	14.43	3.03		

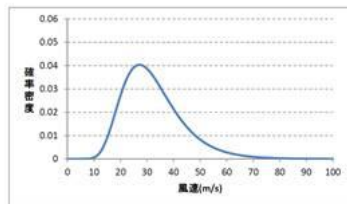
4. 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定(8/11)

基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

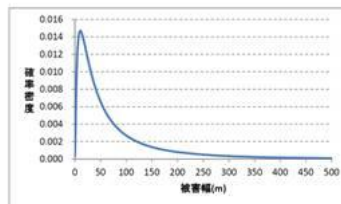
【竜巻風速、被害幅、被害長さの確率分布および相関係数】

竜巻検討地域における51.5年間の竜巻の発生数、被害幅、被害長さのデータを用いて確率密度分布を求めた。確率密度分布は、ガイド及び原子力安全基盤機構の委託成果を参照して、対数正規分布に従うものとした。以下に、各確率密度分布の結果を示す。

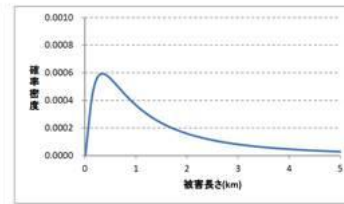
また、竜巻風速、被害幅、被害長さについての相関係数を求めた。



竜巻風速の確率密度分布



竜巻被害幅の確率密度分布



竜巻被害長さの確率密度分布

竜巻風速、被害幅、被害長さの統計量

個数	風速(個)	被害幅(個)	被害長さ(個)
風速(個)	227	191	200
被害幅(個)	-	196	193
被害長さ(個)	-	-	204

竜巻風速、被害幅、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(km)
風速(m/s)	1.000	0.397	0.435
被害幅(m)	-	1.000	0.397
被害長さ(km)	-	-	1.000

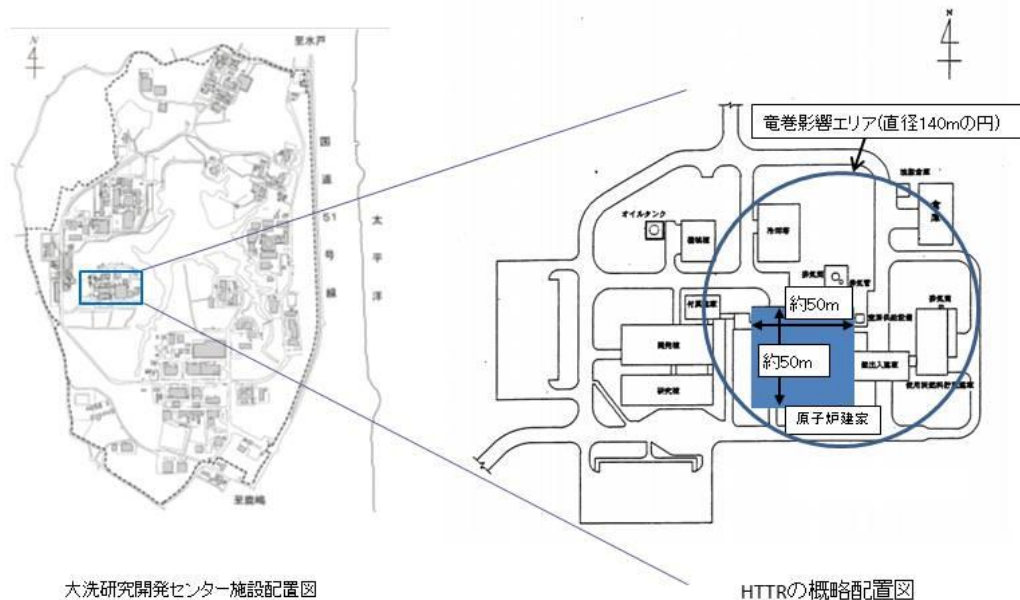
*: 観測データのみを用いて算出

4. 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (9/11)

基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

【竜巻影響エリア】

HTTRの概略配置図に示すように、原子炉建家などの主要な施設が、直径140mの円内に収まることから、この直径140mの円(面積約15400m²)を竜巻影響エリアに設定する。



4. 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定 (10/11)

基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

【ハザード曲線の算定】

- ・竜巻の年発生数の確率密度分布は、ポリヤ分布の適合度が高い。
- ・以下の式に示すように、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た。
- ・ハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} における風速を求めると63.6m/sとなる。【補足資料4】

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 を超える確率

$$P_{v_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta}$$

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

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

$$E[DA(V_0)] = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W(V_0) f(V,w,l) dV dw dl$$

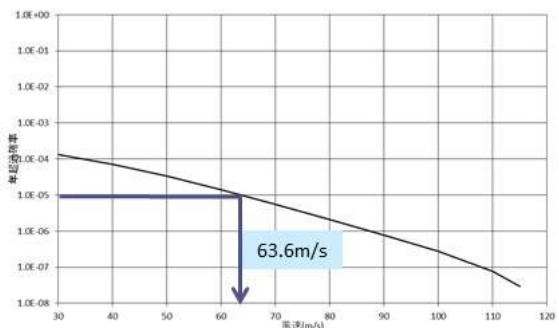
$$+ L \int_0^{\infty} f(V,l) dV dl$$

$$+ L \int_0^{\infty} W(V_0) f(V,w) dV dw$$

$$+ \int_0^{\infty} f(V) dV$$

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0} \right)^{1/1.8} w$$

パラメータ説明:
 β : 竜巻の年発生数の平均と標準偏差で表されるパラメータ
 $R(V_0)$: 1つの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 を超える確率
 $E[DA(V_0)]$: 被害面積の期待値
 v : 竜巻の年平均発生数
 σ : 竜巻の年発生数の標準偏差
 $E(\bullet)$: 期待値を意味する
 $DA(V_0)$: 1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積
 A_0 : 竜巻検討地域の面積
 V : 風速
 w : 被害幅
 l : 被害長さ
 $f(\bullet)$: 確率密度分布
 L : 竜巻影響エリアの直径
 S : 竜巻影響エリアの面積
 V_{min} : 被害幅 w 内の最小竜巻風速
 $W(V_0)$: 被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅



竜巻最大風速のハザード曲線

基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

【基準竜巻の最大風速(V_B)の算定結果】

➤ 基準竜巻の最大風速 V_B は、 V_{B1} と V_{B2} のうちの大きな風速とすることから、HTTRにおける基準竜巻の最大風速 V_B は92m/sとする。

基準竜巻の最大風速の算定結果

過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1}	92m/s
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2}	63.6m/s



➤ 基準竜巻の最大風速(V_B)=92m/s

設計竜巻の最大風速(V_D)の設定

(1) 設計竜巻の最大風速(V_D)の設計方針

- 設計竜巻の最大風速(V_D)は、原子炉施設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)を考慮して、基準竜巻の最大風速(V_B)の適切な割増し等を考慮して設定する。

(2) 地形効果の検討

- 設計竜巻の設定に当たっては、丘陵等によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、立地する地域において設計対象施設の周辺地域等の地形について検討した。



➤ HTTRは標高約36mの台地上に立地しており、施設の東西方向及び南北方向からみても、台地上に位置し、下り斜面には位置しておらず、ほぼ平坦である。

設計竜巻の最大風速(V_D)の設定

【設計竜巻の最大風速(V_D)の算定結果】

➤ HTTRは標高約36mの台地上に立地しており、施設の東西方向及び南北方向からみても、台地上に位置し、ほぼ平坦であることから、地形効果による竜巻の増幅は考えられないため、設計竜巻の最大風速 V_D は92m/sとする。



➤ 設計竜巻の最大風速(V_D)=92m/s

6. 設計荷重の設定(1/7)

設計荷重の設定

【評価に用いる設計竜巻の特性値の設定】

竜巻影響評価に用いる竜巻の最大風速は、保守性を十分に考慮し、国内最大級F3クラスの発生実績から最大風速92m/sに余裕を考慮して100m/sを用いることとする。表に竜巻影響評価に使用する設計竜巻の特性値を示す。

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

$$\begin{aligned}
 & \cdot V_T = 0.15 \times V_D \\
 & \cdot V_{Rm} = V_D - V_T \\
 & \cdot R_m = 30 \\
 & \cdot \Delta P_{max} = \rho \times V_{Rm}^2 \quad (\text{空気密度 } \rho = 1.22 \text{ (kg/m}^3)) \\
 & \cdot (dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \times \Delta P_{max}
 \end{aligned}$$

設定した設計荷重に対して、以下の項目を確認する。

- (1) 竜巻による風荷重、気圧差荷重及び衝撃荷重に対して構造健全性を確認する。
- (2) 建家・構築物の外壁、屋根等について、構造健全性を確認し、破損した場合には安全機能維持について確認を行う。
- (3) 設備(系統・機器)については、各設備の竜巻により損傷する恐れのある部位に対して構造健全性を確認し、破損する可能性が確認された場合には安全機能維持への影響評価を実施する。

設計荷重の設定

【設計竜巻による風圧力の設定】

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設(屋根を含む)に作用する風圧力(P_D)は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会建築物荷重指針・同解説2015」に準拠して、以下の式により算出する。
 なお、ガスト影響係数(G)は $G=1.0$ とし、風力係数(C)は施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて設定する。

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

q : 設計用速度圧、 G : ガスト影響係数(=1.0)、 C : 風力係数、 A : 施設の受圧面積

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

ρ : 空気密度、 V_D : 設計竜巻の最大風速

【設計竜巻による気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による荷重の設定】

設計竜巻による評価対象施設内外の気圧差による荷重は、最大気圧低下量(ΔP_{max})に基づき設定する。
 設定に際し、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重 W_P を、以下の式により算出する。

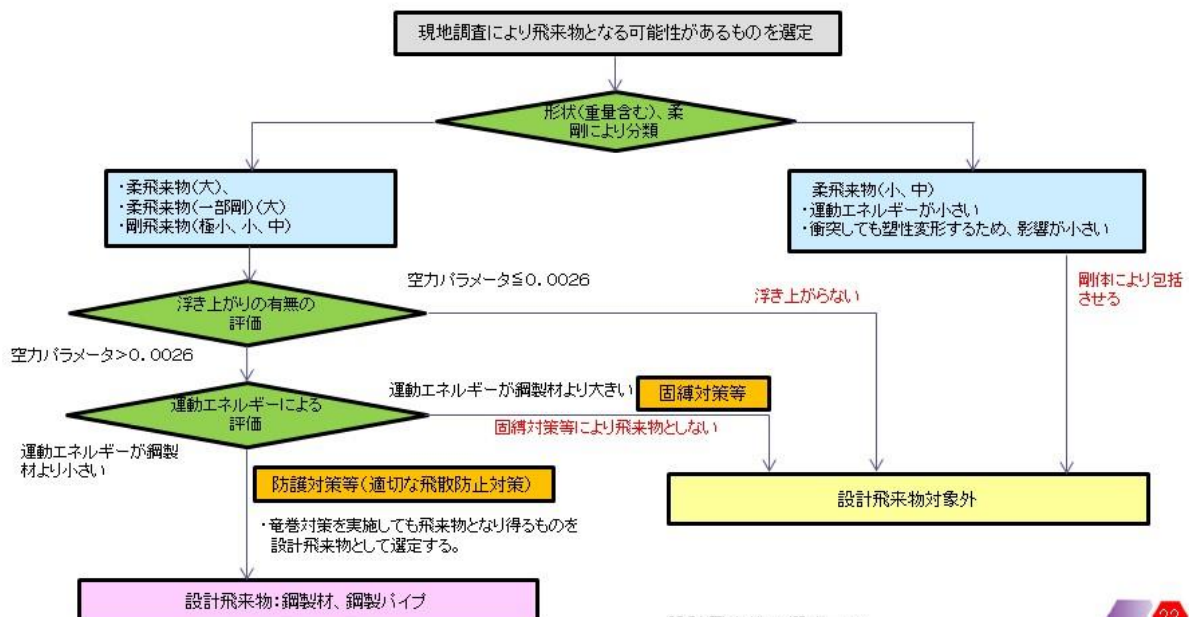
$$W_P = \Delta P_{max} \cdot A$$

ΔP_{max} : 最大気圧低下量、 A : 施設の受圧面積

以上の評価に従って、建家・構築物等及び設備(系統・機器)の影響評価を実施する。

設計飛来物の選定

HTTRの竜巻影響評価における設計飛来物については、HTTR敷地内の飛来物に係る現地調査結果と、ガイドを参考に、設計飛来物を設定した。【補足資料6】
 設計飛来物の選定フローを以下に示す。
 設計飛来物による飛来の影響を上回る飛来物については、固縛等の措置を行い、飛来物とならない対策を講じる。



設計飛来物の選定フロー

設計飛来物の選定

HTTRの飛来物調査によって選定した飛来物となる可能性があるものの中から、前項のフローに従い、以下の観点にて設計飛来物を選定した。

- 飛来の有無
- 運動エネルギーの大きさ
- 防護対象施設に対する貫通しやすさ
- 防護対象施設に対する評価において鋼製材に包含できるか

HTTRの設計飛来物の諸元*1($V_0=100\text{m/s}$)

飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ(m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量(kg)	8.4	135
最大水平速度(m/s)	49	51*2
最大鉛直速度(m/s)	33	34*2
運動エネルギー(水平)(kJ)	11*3	176*3
運動エネルギー(鉛直)(kJ)	5*3	79*3

- *1: 諸元の数値はガイドに記載されている値。
- *2: 鋼製材の最大水平速度、最大鉛直速度は改正後のガイドの値。
- *3: 最大速度より算出した値。

竜巻防護対策

【HTTRにおける竜巻防護対策】 【補足資料e】

HTTR原子炉施設の竜巻防護対策は、以下に示す方針により実施する。

- (1) 飛来物調査結果により抽出した竜巻飛来物のうち、竜巻防護施設の直近にある物品(マンホール蓋等)は、飛散したとしても、竜巻防護施設及び竜巻防護施設の外殻となる原子炉建家に影響を及ぼすような衝突がないことを確認する。
- (2) 乗用車については、駐車禁止区域を設け、原則として区域内に駐車しないこととする。また、竜巻注意情報等の発令により、区域外に退避させる等の措置を行うことで、竜巻防護施設及び竜巻防護施設の外殻となる施設に影響を及ぼさないことを確認する。

設計荷重の設定

【設計荷重の組合せ】

評価対象施設の設計竜巻荷重は、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)を組合わせた複合荷重とし、以下の式により算定する*。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$$

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

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

*:複合荷重 W_{T1} 、及び W_{T2} は米国NRCの基準類を参考として設定
 U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : STANDARD REVIEW PLAN, 3.3.2 TORNADO LOADS, NUREG-0800, Revision3—March 2007

設計荷重の設定

【設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定】

設計竜巻荷重と組合せる荷重は以下のとおりとする。

- (1) 評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重
 評価対象施設により、常時作用する荷重(自重、死荷重、活荷重)を適切に組合せる。
- (2) 竜巻以外の自然現象による荷重
 竜巻と同時に発生する雷、雪、雹、大雨については、以下の理由により施設への影響が相乗しないため、考慮しない。
 - ① 雷
 竜巻は建家、構築物、及び設備(系統・機器)に対する風荷重、気圧差荷重及び飛来物の衝撃荷重があるが、落雷は雷撃であり影響モードが異なることから、竜巻との組合せは考慮しない。
 - ② 雪
 冬期に発生した海上竜巻が襲来する場合は、竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪は竜巻の風に吹き飛ばされ、施設への影響は生じないことから竜巻との組合せは考慮しない。
 - ③ 雹
 上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に降雹は生じない。竜巻通過前に積もった雹は竜巻の風に吹き飛ばされ、施設への影響は生じない。また、下降流により降雹があっても、直径5cm程度の大型の雹を想定した場合、その重量は約60g、終端速度は33m/s*となり、運動エネルギーは約0.036kJとなり、設計飛来物に含まれる。【参考資料1】
 - ④ 大雨
 上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雨は降らない。下降流の竜巻通過時や竜巻通過前後に雨が降っても施設への影響は建家への浸水であり、影響モードが異なることから、竜巻との組合せは考慮しない。
- (3) 設計基準事故時荷重
 設計竜巻風速92m/sの竜巻の発生頻度は小さいことから(10⁻⁶/年)、設計基準事故時荷重との組合せは考慮しない。

*:小倉義光、一般気象学、東京大学出版会

竜巻防護施設の抽出

竜巻防護施設は、以下の方針により抽出した。

- ・原子炉の停止機能、放射性物質の閉じ込め機能(原子炉冷却材バウンダリ)及びそれらの状態監視に必要な監視機能を維持するために必要な設備
- ・使用済燃料貯蔵プールの貯蔵機能を維持するために必要な設備
- ・使用済燃料貯蔵建家については、貯蔵セル及び貯蔵ラックを竜巻防護施設として抽出

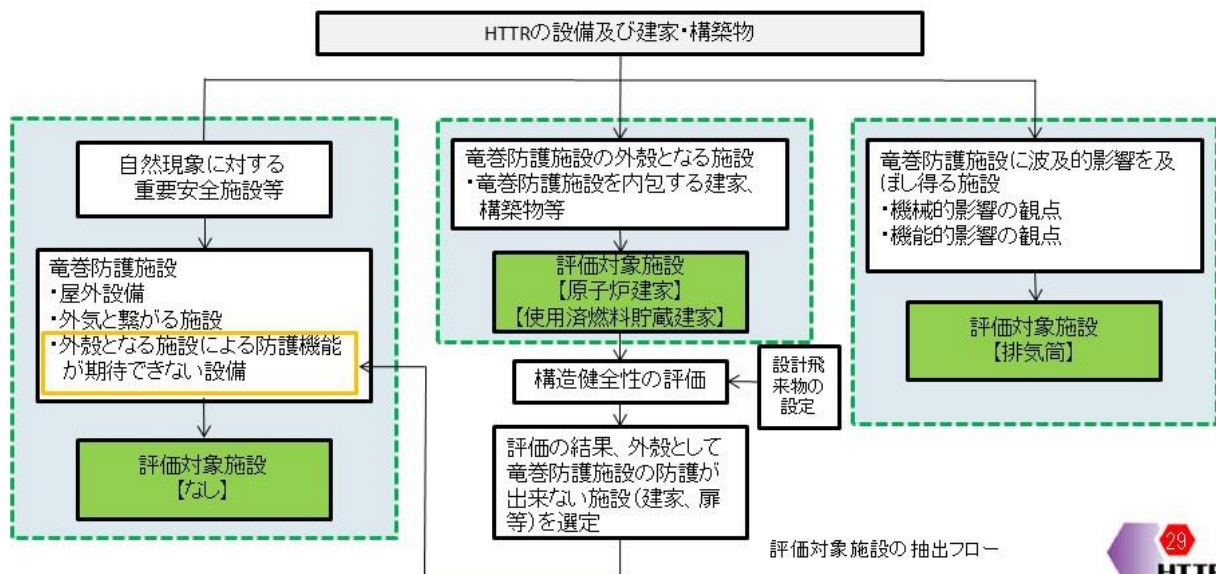
竜巻防護施設の抽出結果(原子炉建家)

No.	安全機能	構築物・系統・機器	備考
1	原子炉冷却材圧力バウンダリ	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系	閉じ込め機能
2	過剰反応度の印加防止	スタンドパイプ、スタンドパイプクローザ	閉じ込め機能
3	炉心の形成	炉心構成要素、炉心支持鋼構造物、炉心支持黒鉛構造物	炉内構造物
4	放射性物質の貯蔵	使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール、貯蔵ラック	使用済燃料の貯蔵機能維持
5	1次冷却材の内蔵	1次ヘリウム純化設備(原子炉冷却材圧力バウンダリとの接続部から原子炉格納容器外側隔離弁までの範囲)	閉じ込め機能(隔離弁)
6	実験・照射に供する機能	実験設備の一部	未設置
7	原子炉の緊急停止・未臨界維持	制御系	原子炉の停止機能
8	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止	1次冷却設備の安全弁	閉じ込め機能
9	原子炉停止系への起動信号の発生	安全保護系(停止系)	原子炉の停止機能
10	安全上特に重要な関連機能	中央制御室	状態監視機能
11	事故時のプラント状態の把握	事故時監視計器の一部	状態監視機能
12	安全上特に重要な関連機能	直流電源設備・安全保護系用交流無停電装置	その他、必要な関連機能

竜巻影響評価対象施設の抽出

評価対象施設は、以下の方針に従って抽出する。

- ・竜巻防護施設のうち、屋外設備、外気と繋がる施設及び外殻となる施設による防護機能が期待できない設備。
- ・竜巻防護施設の外殻となる施設。
- ・竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設。

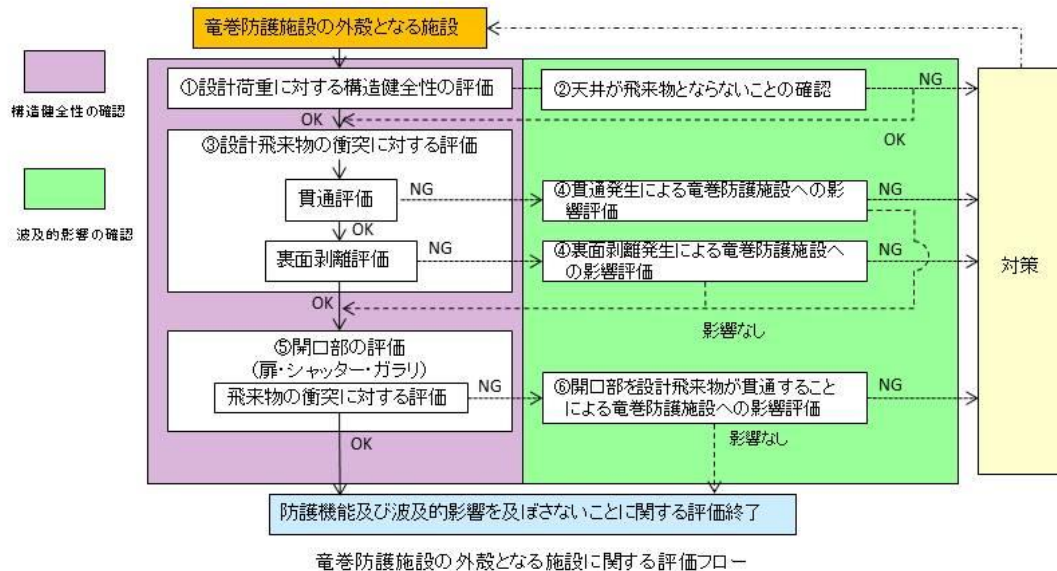


評価対象施設の抽出フロー

建家・構築物等の構造健全性の確認

【竜巻防護施設の外殻となる施設の評価方法】

竜巻防護施設の外殻となる施設に求められる機能は、防護機能及び波及的影響を及ぼさないことである。防護機能については、評価に用いる設計竜巻に対し、竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性を確認することにより、内包する竜巻防護施設が影響を受けないことを確認する。壁や屋根など竜巻防護施設の外殻となる施設の各部に損傷が生じる場合は、損傷による竜巻防護施設への波及的影響を確認する。



建家・構築物等の構造健全性の確認

竜巻防護施設の外殻となる施設の構造健全性の評価及び竜巻防護施設の破損による波及的影響の評価内容をそれぞれ一覧として、表8.1、8.2に示す。

表8.1 竜巻防護施設の外殻となる施設の健全性の評価方法

評価項目	構造種別	荷重	評価内容		
			評価対象	評価基準値	
① 設計荷重に対する構造骨組の評価	鉄筋コンクリート造	W_{T1} , W_{T2}	建家各層に発生する層せん断力	保有水平耐力値以下*	
③ 設計飛来物の衝突に対する評価	外壁及び屋根への表面剥離の発生	鉄筋コンクリート造	設計飛来物(鋼製材)の衝突	屋根及び壁の最小厚さ	表面剥離を生じさせないための最小必要厚さ以上
	外壁及び屋根における設計飛来物の貫通				貫通を生じさせないための最小必要厚さ以上
⑤ 開口部の評価	扉、シャッターにおける設計飛来物の貫通	鉄筋コンクリート造	設計飛来物(鋼製材)の衝突	貫通するものとし、波及的影響評価を実施	

*:「HTTR設計及び工事の方法の認可申請書」等に記載された値

建家・構築物等の構造健全性の確認

表8.2 竜巻防護施設の外殻となる施設の破損による波及的影響の評価方法

	評価項目	構造種別	荷重	評価内容	
				評価対象	評価基準値
②	天井が飛散物とならないことの確認	鉄筋コンクリート造	W_{T1} 、 W_{T2} *	屋根スラブに発生する応力	床スラブの断面算定の応力値以下
④	貫通発生による竜巻防護施設への影響評価	鉄筋コンクリート造	-	貫通した飛散物及び飛散コンクリートが竜巻防護施設に衝突しないこと	
	表面剥離による竜巻防護施設への影響評価			<ul style="list-style-type: none"> 飛散コンクリートが竜巻防護施設に衝突しないこと 衝突したとしても竜巻防護施設に影響がないこと 	
⑤	開口部を設計飛来物が貫通することによる竜巻防護施設への影響評価	鉄筋コンクリート造	-	貫通した飛来物が竜巻防護施設に衝突しないこと	

*: 負圧に対し検討を実施するため、設計飛来物による衝撃荷重 w_{in} は考慮しない



建家・構築物等の構造健全性の確認

①設計荷重に対する構造骨組の評価方法

評価に用いる設計竜巻による複合荷重(w_{T1} 、 w_{T2})に対し、建家各層に生じる層せん断力が、評価基準値を下回ることを確認する。

評価基準値は、複合荷重(w_{T2})により生じる層せん断力が、HTTRの設計及び工事の方法の認可申請書等に記載された値(以下、「保有水平耐力値」という。)と比較し、値を下回ることを確認する。

②天井が飛散物とならないことの確認方法

屋根は、複合荷重(w_{T1} 、 w_{T2})が面外方向に作用する。これらの荷重に対し、破損のおそれがある部位として考えられるため、破損による波及的影響を及ぼさないことの確認として、屋根が飛散物とならないことを確認する。具体的には、設計竜巻による複合荷重により生じる応力が、断面算定により得た許容曲げモーメント値を下回ることを確認する。

風圧力算定に用いる風圧係数は、「日本建築学会建築物荷重指針・同解説2015」をもとに建家形状を考慮して算出した各部の風圧係数のうち、最大の荷重が作用する値とする。

③設計飛来物の衝突に対する評価方法

設計飛来物(鋼製材)が竜巻防護施設の外殻となる施設に衝突した場合の、貫通及び表面剥離によるコンクリート片の飛散の評価を実施する。設計飛来物のうち鋼製パイプは質量と飛散速度が共に鋼製材より十分小さいことから、鋼製材に対する健全性検討で包含させる。

飛来物の衝突に対する表面剥離または貫通を生じないための必要最小壁厚さを算出し、建家の外壁または屋根の厚さと比較する。

貫通または表面剥離が生じないための必要最小壁厚さの評価は、次項に記載する評価式を用いる。

また、天井に表面剥離が発生する場合は、剥離したコンクリートが飛散しないことをデッキプレートの有無により確認する。



建家・構築物等の構造健全性の確認

鉄筋コンクリート造部

屋根及び外壁について、設計飛来物の衝突に対する裏面剥離または貫通を生じさせないための必要最小厚さと、評価部材の厚さを比較し、裏面剥離または貫通の有無を確認する。

貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さは、以下の評価式によって算出する。

なお、貫通限界厚さは、貫入深さを①に示す修正NDRC式により算出し、②に示すDegen式により求める。また、裏面剥離限界厚さは、③式に示すChang式により算出する。

$$X_c = \alpha_c \sqrt{4kWN D (V/1000D)^{1.8}} \quad \text{..... ①}$$

$$t_p = \alpha_p D \{ 2.2(X_c/\alpha_c D) - 0.3(X_c/\alpha_c D)^2 \} \quad \text{..... ②}$$

X_c : 貫入深さ(in)	α_c : 飛来物低減係数	k : $180/\sqrt{F_c}$
W : 飛来物重量(lb)	N : 形状係数	D : 飛来物直径(in)
V : 衝突速度(ft/s)	F_c : コンクリート強度(psi)	
t_p : 貫通厚さ(in)	α_p : 飛来物低減係数	

貫通評価

$$t_s = \alpha_s 1.84(200/V)^{0.13}(MV^2)^{0.4}/(D/12)^{0.2}(144F_c)^{0.4} \quad \text{..... ③}$$

t_s : 裏面剥離厚さ(ft)	α_s : 飛来物低減係数	V : 衝突速度(ft/s)
M : 質量(lb/(ft ² s ²))	g : 重力加速度(32.2 ft/s ²)	
D : 飛来物直径(in)	F_c : コンクリート強度(psi)	

裏面剥離評価

評価式に適用する低減係数*1については、剛飛来物の低減係数は、貫通・裏面剥離=1.0、柔飛来物の低減係数は、貫通=0.65、裏面剥離=0.6とする。また、形状係数*2については、剛飛来物=1.14、柔飛来物=0.72とする。

*1 : Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part 4:Overall Evaluation of Local Damage, Kiyoshi Muto, etc., 10th SMIRT

*2 : 「構築物の衝撃挙動と設計法」土木学会

先端の形状係数で、非常に鋭い場合は1.14、平坦な場合は0.72とあることから、剛飛来物は、角が当たることを想定し、非常に鋭い場合とする。柔飛来物は先端がつぶれて平坦になると考えられることから、平坦な場合とする。



建家・構築物等の構造健全性の確認

鋼板部

HTTRにおける設計飛来物が建家開口部等(鋼板部分)に衝突した場合の貫通限界厚さを、BRL式*を用いて算出し、貫通力がある鋼製材の貫通厚さと開口部鋼板部分の板厚を比較し、飛来物による貫通の有無を確認する。

飛来物による鋼板の貫通限界厚さは、以下の評価式によって算出した。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2/17400K^2d^{3/2}$$

T : 鋼板貫通厚さ(in)	M : ミサイル質量(lb・s ² /ft)	V : ミサイル速度(ft/s)
d : ミサイル直径(in)	K : 鋼板の材質に関する定数=1	

* : BRL式については、「ISES7607-3 軽炉炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討(高温構造安全技術研究組合)」「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)」の中で、鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている。



建家・構築物等の構造健全性の確認

【④貫通及び裏面剥離発生による竜巻防護施設への影響評価方法】

天井または外壁に貫通が発生する場合は、貫通した飛来物及び飛散コンクリートが竜巻防護施設に衝突しないことを確認する。

同様に、天井または外壁に裏面剥離が発生する場合は、裏面剥離による飛散コンクリートが竜巻防護施設に衝突しないこと、または衝突したとしても竜巻防護施設に影響がないことを確認する。

【⑤開口部の評価方法(扉、シャッター、ガラリー)】

設計飛来物の開口部への衝突について評価を行う。

建家開口部のシャッター、ガラリー等への設計飛来物の衝突については、設計飛来物が貫通するものとする。

【⑥開口部を設計飛来物が貫通することによる竜巻防護施設への影響評価】

建家開口部のシャッター、ガラリー等を貫通した設計飛来物が、竜巻防護施設に衝突しないことを確認する。

設備の構造健全性の確認

(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定

- ・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評価対象施設に生じる変形や応力等を算定する。
- ・評価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に準拠して算定する。

(2) 構造健全性の確認

- ・評価対象施設が許容応力度などに基づく許容限界に対して、妥当な安全余裕を有していることを確認する。
- ・設計飛来物が評価対象施設あるいはその特定の区画に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えないことを確認する。

竜巻随件事象に対する考慮

竜巻随件事象として想定される事象について影響評価を行い、竜巻防護施設の安全機能が維持されることを確認する。

- (1) 火災
設計竜巻により、飛来する竜巻飛来物が敷地内の危険物タンクに衝突し、火災が発生した場合においても、竜巻防護施設に影響を及ぼさないこと。
- (2) 溢水
設計竜巻により、飛来する竜巻飛来物により、建家・構築物等が損壊し、溢水に至っても影響がけないこと。
- (3) 外部電源喪失
設計竜巻により、送電網等が損傷して外部電源が喪失した場合でも、竜巻防護施設の安全機能が維持され、原子炉の健全性が確保できること。

竜巻による影響評価の結果

竜巻による影響評価については、竜巻影響評価書(仮称)に、評価結果を記載する。

目次(案)

1. 竜巻検討地域の設定
 - 1.1 竜巻の発生状況
 - 1.2 竜巻検討地域
2. 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定
 - 2.1 過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1}
 - 2.2 竜巻最大風速のハザード曲線による V_{B2}
 - 2.3 基準竜巻の最大風速 V_B
3. 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定
 - 3.1 増幅特性を考慮した設計竜巻の最大風速 V_D
4. 設計竜巻荷重の設定
 - 4.1 設計竜巻の特性値
 - 4.2 設計竜巻による風圧力による荷重
 - 4.3 設計竜巻における気圧差による荷重
 - 4.4 設計飛来物及び設計飛来物による衝撃荷重
 - 4.5 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重
5. 建屋、構築物の構造健全性
 - 5.1 評価対象施設
 - 5.2 設計荷重の設定
 - 5.3 竜巻防護施設の外殻となる施設の評価
 - 5.4 竜巻防護施設に波及的影響を与える施設の評価

【竜巻検討地域の設定について】

竜巻検討地域は、HTTRが立地する地域及び竜巻発生の観点から、HTTRのある大洗研究開発センターが立地する地域と気象条件等が類似の地域から、竜巻検討地域を設定する。

【気象条件の類似性による地域分類】

気象条件の類似性の観点から、気象総観場毎の竜巻発生場所の分析を行い、HTTRが立地する大洗研究開発センターと類似の地域を抽出する。

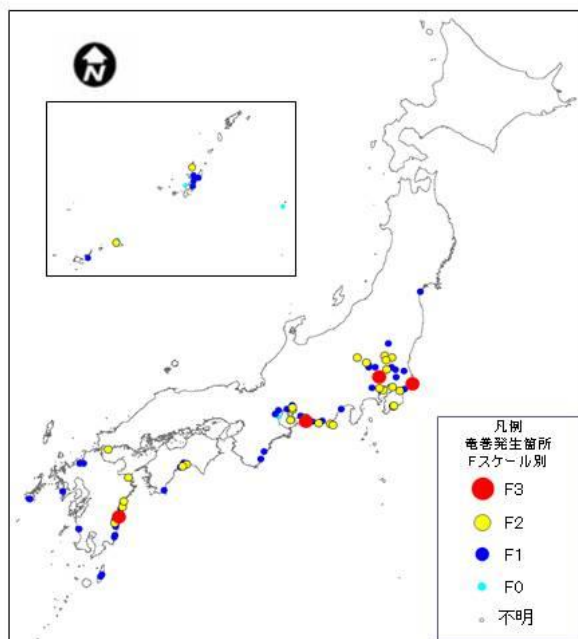
まず、竜巻発生時の気象条件に基づき、竜巻発生実績を整理した。

気象条件は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」の総観場を基に、低気圧、台風、停滞前線、局地性降雨(局地性擾乱、雷雨含む)、季節風、その他の6つに分類した。なお、低気圧には、気圧の谷、暖気の移流、寒気の移流、前線(停滞前線除く)を含めている。使用したデータは1961年から2012年6月のものとしている。

次頁以降に6つの総観場の分類ごとに、発生場所の傾向を確認した結果を示す。

竜巻検討地域の設定

【総観場の違い】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

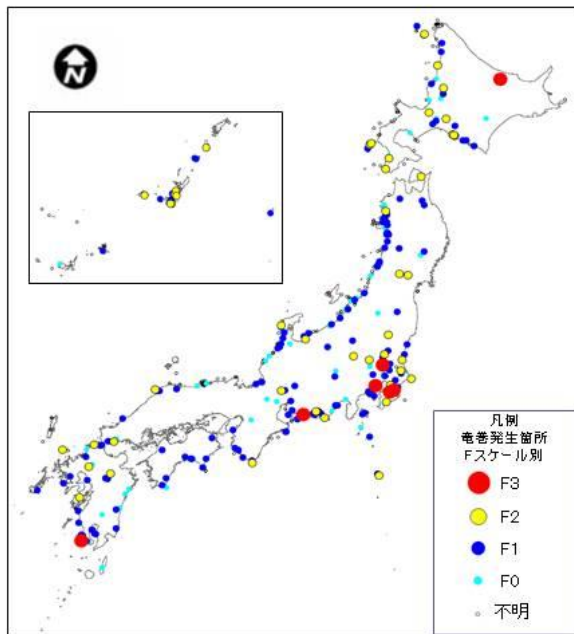


竜巻発生位置(台風)

台風起因の竜巻には、台風を取り巻く雲が発生させる竜巻を含めている。台風起因の竜巻は、九州から太平洋側の沿岸に多く発生している。

竜巻検討地域の設定

【総観場の違い】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

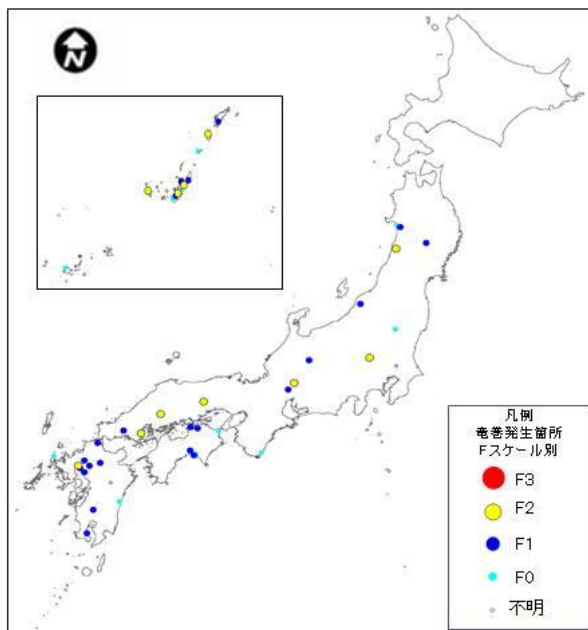


竜巻発生位置(低気圧)

低気圧起因の竜巻には、いくつかの種類(温帯低気圧の他に、温暖前線や寒冷前線など、寒気と暖気が接することにより傾圧不安定が生じるとともに、主に南からの下層の暖気の移流により発達した親雲から発生した竜巻を含んでいる。低気圧起因の竜巻は、日本全国で発生している。

竜巻検討地域の設定

【総観場の違い】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

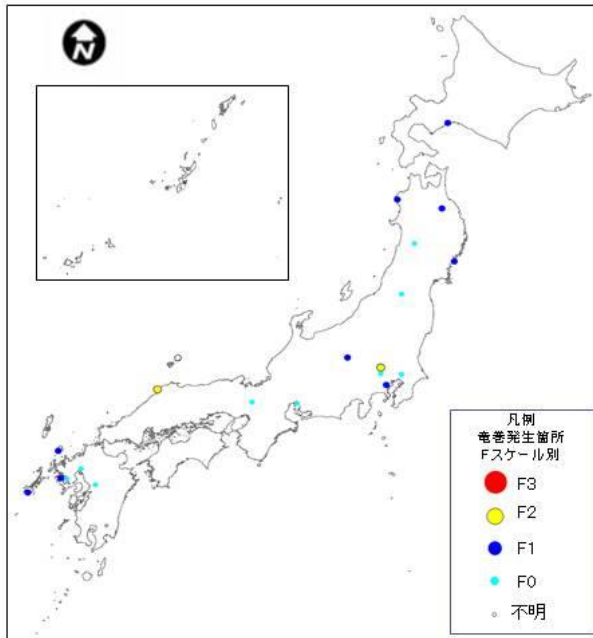


竜巻発生位置(停滞前線)

停滞前線起因の竜巻には、停滞前線や梅雨前線など、南からの暖気や水蒸気の移流により形成される親雲から発生する竜巻を含んでいる。停滞前線起因の竜巻は、北海道を除く地域で発生している。

竜巻検討地域の設定

【総観場の違い】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

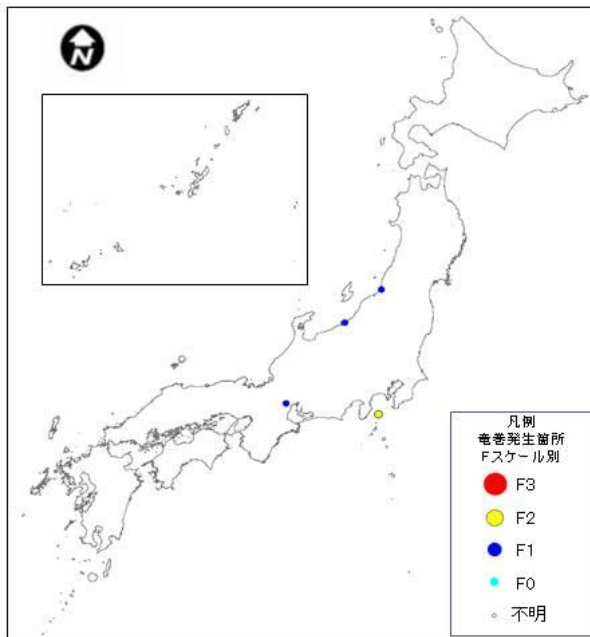


竜巻発生位置(局地性降雨等)

局地性降雨等に起因する竜巻には、雷雨などの局所的な循環により形成される親雲から発生する竜巻を含めている。局地性降雨等起因の竜巻については、日本全国で発生している。

竜巻検討地域の設定

【総観場の違い】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成

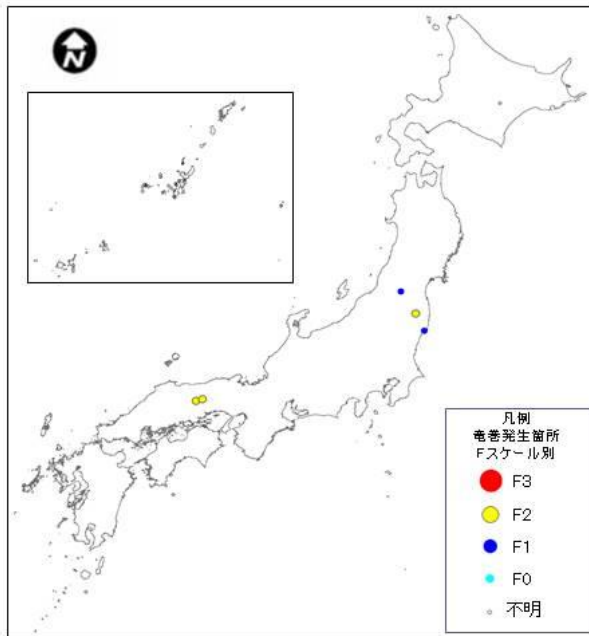


竜巻発生位置(季節風)

季節風起因の竜巻には、大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり、竜巻の親雲から発生する竜巻を含めている。季節風起因の竜巻は、日本全国で発生している。

竜巻検討地域の設定

【総観場の違い】 気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成



竜巻発生位置(その他)

その他の竜巻には、上記に当てはまらない条件下で発生する竜巻(移動性高気圧、中緯度高気圧、太平洋高気圧等)を含めている。その他の竜巻は日本全国で発生している。

竜巻検討地域の設定

各気象要因により抽出したエリアの重なりを考慮し、台風起因と停滞前線起因で評価すると、九州、山口の沿岸部、及び太平洋側沿岸部において竜巻発生の観点から類似性があると判断した。



以上の検討を踏まえ、宮城県、福島県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県、山口県及び九州(沖縄県含む)の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲(面積:約89500km²)を竜巻検討地域に設定した。

HTTRは、海岸線から約1kmの場所に立地している。竜巻影響評価ガイドにおいて、解説図3.3の「日本の海岸線付近における竜巻の発生状況」のグラフの分布より、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であることが示されていることから、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。

【ハザード曲線の保守性について】

竜巻最大風速のハザード曲線算定に関する保守性については、疑似データ作成におけるFスケール不明竜巻の取扱いにより、例えばF3スケールの竜巻の発生数については、観測実績のおよそ2倍に見積もっている。

なお、F3スケールの竜巻の観測実績には、F3スケールの竜巻に加えてF2～F3スケールの竜巻を考慮している。竜巻検討地域として設定した海岸線から陸側5km、海側5kmの範囲外で発生した竜巻(北海道網走支庁佐呂間町、茨城県常総市など)は含めていない。

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

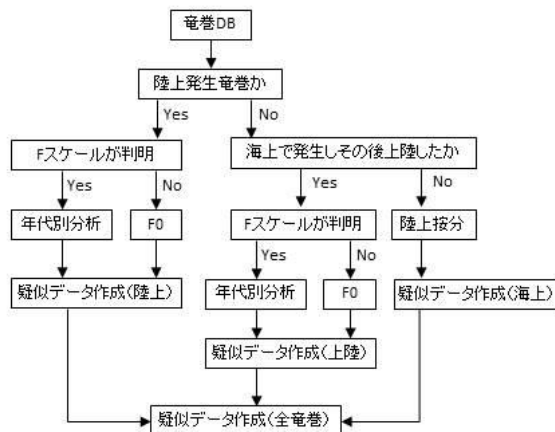
また、昨今においては、竜巻検討地域においてF2及びF3竜巻は発生しておらず、将来においても影響はないと考える。

【Fスケール不明竜巻の取扱いについて】

ハザード曲線算出における不明竜巻データの取扱いについて、竜巻検討地域の海側、陸側 ±5km範囲での、竜巻パラメータを推定した際のフロー図を以下に示す。±5km範囲では、気象庁の「竜巻等の突風データベース」(以下、「竜巻DB」という。)より竜巻検討地域における竜巻について、発生位置により、「陸上」か「海上」かの2つに大別し、それぞれについてFスケール毎の解析を行っている。

陸上で発生した竜巻でFスケールが判明しているものは、年代別分析を行う。一方、Fスケールは、被害があつて初めてそのスケールが推定されることから、Fスケール不明竜巻は、Fスケールを正確に推定できるほどの竜巻被害はなかったものとして、F0竜巻として取扱っている。

海上発生竜巻は上陸の有無に関わらず、フロー図右側に進む。海上発生竜巻のうち、海上発生・海上消滅するもののFスケールを推定することは困難である。そこで、沿岸部近傍での竜巻発生特性が陸上と海上で類似していると仮定し、海上発生のFスケール不明竜巻は、観測された陸上発生竜巻のFスケール別発生比率で按分している。なお、海上で発生し、その後上陸した竜巻についても、陸上竜巻と同様にFスケールによる分析を行っている。



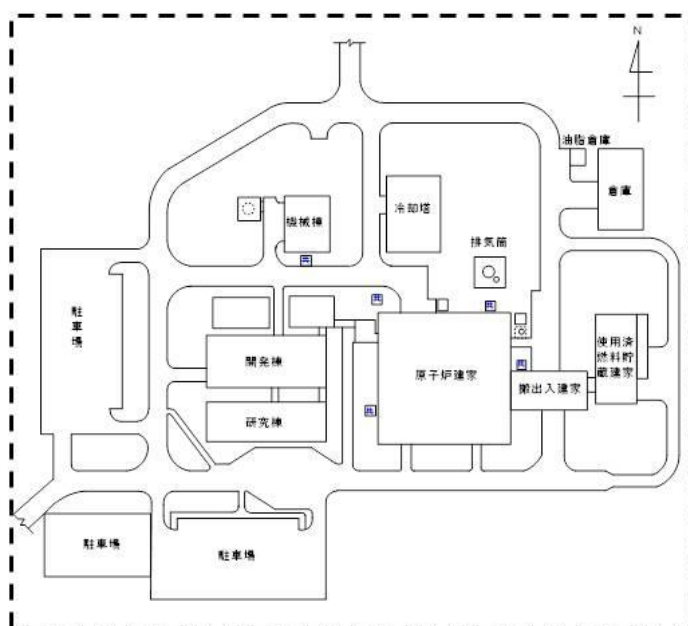
【ハザード曲線における最大風速 V_{B2} の妥当性】

設計基準事故の定義が、 10^{-4} 程度の発生頻度であるが、竜巻発生データの数や信頼性が十分でないことを踏まえ、保守的に一桁下げて、年超過確率 10^{-5} に相当する風速を V_{B2} として算定した。

また、ハザード曲線から求められる、基準竜巻の最大風速92m/sにおける年超過確率は、さらに一桁低い 10^{-6} である。

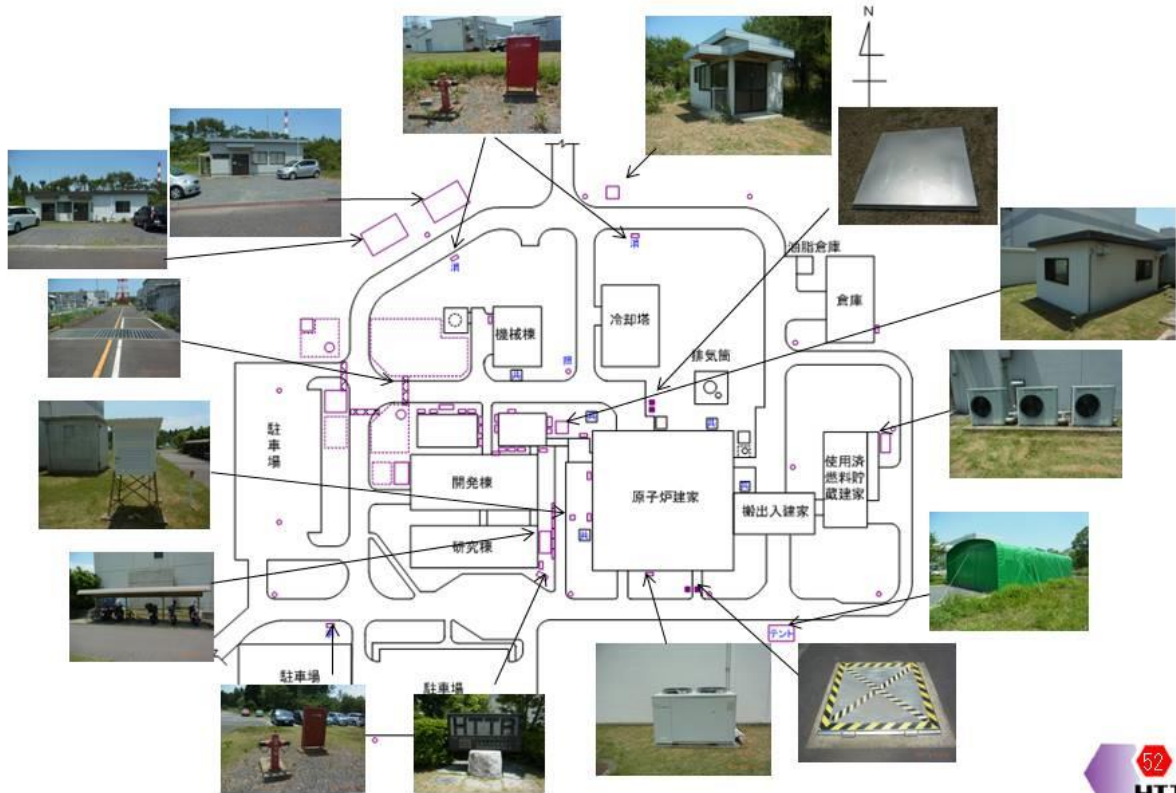
【HTTR原子炉施設における竜巻飛来物】

HTTR原子炉施設において、平成26年5月29日及び6月13日に飛来物に関する現地調査を実施した。調査範囲は、図に示す点線枠内約53000m²について実施した。

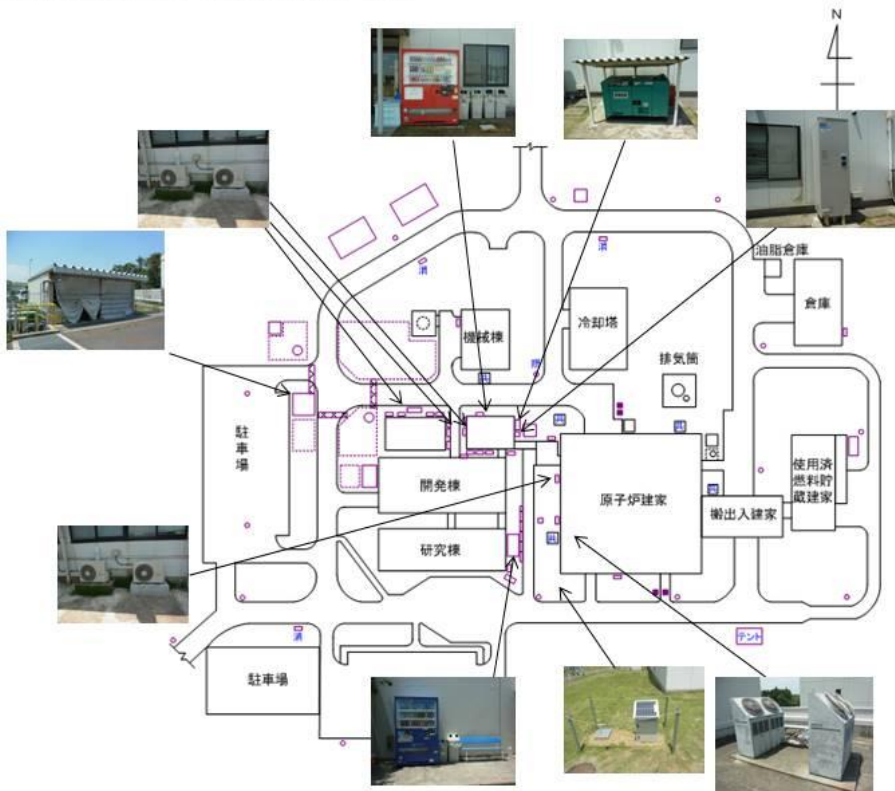


HTTRの概略配置図及び飛来物調査範囲

HTTR原子炉施設における主な竜巻飛来物を以下に示す。



HTTR原子炉施設における主な竜巻飛来物を以下に示す。



現地調査により確認された竜巻飛来物について、以下の目安に基づいてサイズの種類及び柔剛判定を実施し、その中で代表となるものを選定した。

選定した想定飛来物を以下の①～⑦に分類し、更に飛来物の形状(棒状、板状、塊状)による分類を加え整理した。

- ①極小サイズで剛な飛来物
非常に小さく軽いため衝撃力は小さいため、竜巻防護施設に影響が小さいと考えられる。
- ②小サイズで柔な飛来物
小さくて軽量なため、飛びやすいが衝撃力は小さい。また衝突した場合、塑性変形すると考えられるため、竜巻防護施設への影響は少なく、剛体により包括される。
- ③小サイズで剛な飛来物
衝撃力は小さいが飛来時の速度が大きい場合、衝突によって局所的な損傷をもたらす可能性が考えられる。
- ④中サイズで柔な飛来物
②の小サイズで柔な飛来物より大きく衝撃力は大きい。衝突した場合に塑性変形すると考えられるため、竜巻防護施設への影響は少なく、剛体により包括される。
- ⑤中サイズで剛な飛来物
断面積は比較的小さく局所的な衝撃力が考えられる。
- ⑥大サイズで柔な飛来物
断面積が大きく風を受けて飛びやすいため、衝突した場合、衝撃力が大きいと考えられる。
- ⑦大サイズで柔な飛来物(一部剛)
大きく重いので飛びにくい。衝突した場合、衝撃力が大きいと考えられる。

HTTR原子炉施設における竜巻飛来物として①～⑦に分類するとともに衝撃力の大きさを考慮して以下を選定した。

竜巻飛来物の分類結果

	柔飛来物			柔飛来物 (一部剛)	剛飛来物		
	小 ②	中 ④	大 ⑥	大 ⑦	極小 ①	小 ③	中 ⑤
棒状		照明(外灯)	-	-		鋼製パイプ* 物干し台 回転灯 標識	-
板状	消火栓 消火ホース格納箱 百葉箱 太陽光モジュール	自転車置き場	-	-	砂利	グレーチング マンホール蓋 チェッカープレート 地下タンク蓋	敷鉄板
塊状	ベンチ ゴミ箱	室外機 自転車 バイク	電気温水器 テント 自販機 プレハブ小屋 事務所 小型発電機	乗用車 純水運搬車			鋼製材* 石碑



鋼製パイプ、鋼製材を設計飛来物として選定した。

【HTTR原子炉施設における竜巻防護対策】

竜巻飛来物の飛散防止対策の考え方

設計竜巻により飛来物となり得る物品の飛散を防止することにより、飛来物の衝突によって竜巻防護施設に影響を与える飛来物の発生防止を行う。また、飛来物防止対策は、固縛、固定化及び竜巻防護施設との離隔等により実施する。

なお、HTTRは周辺を森林に囲まれているため、施設外からの竜巻飛来物は、森林により衝撃荷重が減衰し、仮に竜巻防護施設に到達したとしても、運動エネルギーはほぼなくなっていると考えられる。

- (1) 固縛
固縛が必要な運動エネルギーの大きな物品については、それに耐え得る強度を有する連結治具、ロープ、アンカーにより固縛する。
- (2) 固定化
固定化が可能な物品については、それに耐え得る強度を有する固定プレート、アンカーにより基礎コンクリートに固定する。
- (3) 竜巻防護施設との離隔
固縛や固定化による対応が図り難い物品については、設計竜巻風速による飛散距離を算出し、それに基づき竜巻防護施設との離隔を図る。
- (4) その他
 - 維持管理
原子炉運転前点検等により、飛来物飛散防止対策の状況を確認し、適切に維持する。
 - 竜巻監視とその対応
運転員がインターネット等により竜巻注意情報等の有無を確認し、竜巻注意情報等が発令されたことを確認した場合、運転員はページング等により屋外作業員に周知し、竜巻が発生しやすい兆候があれば、建家開口部の閉鎖等の対応を行う。

これらの対応については、規程類に記載し、適切に管理するものとする。



【竜巻以外の自然現象による荷重(雹の大きさ)】

竜巻以外の自然現象による荷重として雹を想定し、その大きさを直径5cm程度として評価する。

関東・甲信地方は日本の中で最も降ひょう回数が多い地域であり、季節的には梅雨入り前後の5月下旬から6月前半に集中して多く、次いで7月下旬ごろに多いという特徴がある。降ひょうの記録から、ひょう粒の大きさについて3段階に区分し、最大区分の5cm以上には、野球ボール大、大きい鶏卵大、湯呑茶碗大も含めているが、5cm以上のひょうが降った回数は、関東甲信地方においては40年間に24回あったとされているが、茨城県においては少ないと報告されている(図1参照)⁽¹⁾。

以上から、雹の大きさを直径5cmとして評価を行う。



図1 直径5cm以上の降ひょう分布(1931-1970年)

参考文献

(1)吉野正敏他、「関東甲信地域の降ひょうとひょう害:その分布とそのときの大気構造」:農業気象(J.Agr.Met. 43(3):239-246,1987)



HTTR原子炉施設

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止 (竜巻)



〈目次〉

1. 基本的な考え方
 2. 竜巻影響評価フロー
 3. 基準竜巻の設定
 - 3.1 基準竜巻の設定
 - 3.2 設計竜巻の設定
 - 3.3 設計竜巻の特性値の設定
 - 3.4 設計竜巻の特性値の評価式
 - 3.5 設計荷重の設定
 - 3.6 評価対象施設への影響評価
 - 3.7 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定
 4. HTTR施設の竜巻防護対象施設
 5. 設計飛来物の設定
 6. 評価対象施設の影響評価結果
 - 6.1 設計竜巻による設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性評価
 - 6.2 設計飛来物による評価対象施設の健全性評価
 7. 竜巻影響評価での保守性
- 参考資料
- 1 竜巻風速場の概要
 - 2 飛来物評価法での物体の浮上に関する保守性
 - 3 物体の初期配置に関する保守性
- まとめ



1. 基本的な考え方

外部からの衝撃による損傷の防止について、設置許可基準規則第6条における要求事項、その解釈及び基本的な考え方は以下のとおりである。

試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則		基本的な考え方
規則	解釈	
<p>第6条 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。</p>	<p>第6条（外部からの衝撃による損傷の防止） 1 第6条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等への措置を含む。 2 第1項に規定する「想定される自然現象」とは、敷地の自然環境を基に、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。 3 第1項に規定する「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組合せに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として試験研究用等原子炉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>1 防護対象施設は、「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針」（平成3年7月18日原子力安全委員会決定）の「添付 水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方」を参考に、HTTRの特徴・経験を踏まえて分類された安全機能の重要度が特に高い施設（自然現象に対する重要安全施設）とし、当該施設については、最大風速92m/sの竜巻の発生を考慮しても、原子炉施設の安全性を確保するために必要な安全機能を損なわない設計とする。</p> <p>気象庁の「竜巻等の突風データベース」（1961～2012年）に基づく、竜巻検討地域における過去に発生した竜巻による最大風速及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速によって定めた基準竜巻の最大風速は92m/sである。HTTR原子炉施設の立地する地域特性から地形効果による風速の割り増しは必要ないため、設計竜巻の最大風速は92m/sである。</p> <p>設計竜巻による設計荷重に対して、原子炉建家に生じる層せん断力は、設計用地震力値（設置時）より十分低く、原子炉建家の構造健全性は維持できることを確認する。</p>



試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則		基本的な考え方
規則	解釈	
<p>2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。</p>	<p>4 第2項に規定する「重要安全施設」については、「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針」（平成3年7月18日原子力安全委員会決定）の「添付水冷却型試験研究用原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する基本的な考え方」の「4. (1)自然現象に対する設計上の考慮」に示されるものとする。水冷却型研究炉以外の炉型についても、これを参考とすること。 5 第2項に規定する「大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象」とは、対象となる自然現象に対応して、最新の科学的技術的知見を踏まえて適切に予想されるものをいう。なお、過去の記録、現地調査の結果、最新知見等を参考にし、必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させるものとする。 6 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは、大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的変化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。</p>	<p>2 原子炉施設のうち、次に示す重要安全施設は、予想される自然現象のうち、最も過酷と考えられる条件、又は自然力に設計基準事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮する。 (1)クラス1 (2)クラス2のうち、PS-2及びMS-2のうち設計基準事故時にプラント状態を把握する機能を有する系統</p> <p>竜巻発生時においても重要安全施設の安全機能を維持できることを確認する。 なお、設計竜巻の発生頻度が小さい（10^{-6}/年程度）ため、竜巻と設計基準事故等が同時に発生することはない。</p> <p>重要安全施設の設置場所は、全て屋内であり、竜巻防護施設の外殻となる施設により防護されており、竜巻による影響はないことから安全性を損なうことがないことを確認する。</p>



2. 竜巻影響評価フロー

竜巻影響評価においては、原子炉施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻、及びその随伴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の確認を実施する。

設計上考慮する竜巻は「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「ガイド」という。）を参考に設定し、竜巻評価モデルについては、地上にある物体の挙動評価がより現実的に解析することが可能なフジモデルにより評価を行う。竜巻影響評価フローを図1に示す。

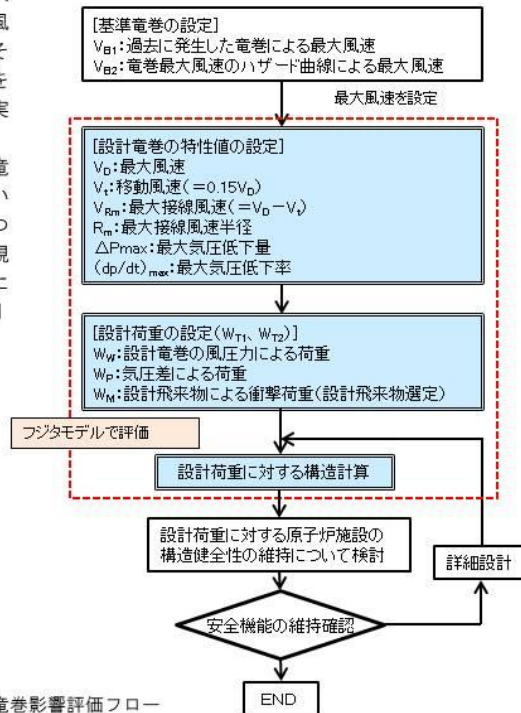


図1 竜巻影響評価フロー



3. 基準竜巻の設定

3. 1 基準竜巻の設定

竜巻影響評価に用いる基準竜巻の最大風速は、「過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})」、「竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})」のうち大きな風速とする。

日本で過去（1961年から2012年6月）に発生した最大の竜巻は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」によるとF3スケール（風速：70m/s～92m/s）であることから、過去に発生した竜巻による最大風速はF3クラスの最大風速である92m/sとした。

また、ハザード曲線を算定し、年超過確率 10^{-5} における風速を求めると63.6m/sとなる。

以上の結果から、HTTRにおける基準竜巻の最大風速 V_B は92m/sとする。

3. 2 設計竜巻の設定

設計竜巻の最大風速(V_D)は、原子炉施設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）を考慮して、基準竜巻の最大風速(V_B)の適切な割増し等を考慮して設定する。

HTTRは標高約36mの台地上に立地しており、施設の東西方向及び南北方向からみても、台地上に位置し、ほぼ平坦であることから、地形効果による竜巻の増幅は考えられないため、設計竜巻の最大風速 V_D は92m/sとする。

3. 3 設計竜巻の特性値の設定

竜巻影響評価に用いる竜巻の最大風速は、保守性を十分に考慮し、国内最大級F3クラスの発生実績から最大風速92m/sに余裕を考慮して100m/sを用いることとする。以下に竜巻影響評価に使用する設計竜巻の特性値を示す。

表1 設計竜巻の特性値（ガイドの評価式より算出）

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

$$\cdot V_T = 0.15 \times V_D$$

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

$$\cdot R_m = 30$$

$$\cdot \Delta P_{max} = \rho \times V_{Rm}^2 \quad (\text{空気密度 } \rho = 1.22 \text{ (kg/m}^3\text{)})$$

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



3. 4 設計竜巻の特性値の評価式

(1) 設計竜巻の移動速度

最大風速 $V_D=100\text{m/s}$ の竜巻について、移動速度 V_T については、ガイドを参照し、下記の式にて設定する。

$$V_T=0.15 \cdot V_D$$

なお、この式は日本の竜巻観測記録（気象庁データベース）に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係を参照して設定されており、風速場モデルに関わらず用いることができる。

(2) 最大接線風速 V_{Rm}

最大接線風速 V_{Rm} については、ガイドを参照し、竜巻の最大風速から移動速度 V_T を引いた値として、下記の式にて設定する。

この値も風速場モデルによらず用いることができる。

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

(3) 最大接線風速半径

最大接線風速 R_m については、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に準拠して以下の値を用いる。

この値も風速場モデルによらず用いることができる。

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

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量（ ΔP_{\max} ）・最大気圧低下率（ $(dp/dt)_{\max}$ ）

フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり、中心付近が低圧になりにくい。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなることから、有限要素法の数値解析により算出した以下の値を設定する。

$$\text{最大気圧低下量 } (\Delta P_{\max}) = 76\text{hPa}$$

$$\text{最大気圧低下率 } (dp/dt)_{\max} = 53\text{hPa}$$



3. 5 設計荷重の設定

評価対象施設について、風荷重、気圧差荷重及び衝撃荷重を設定する。

(1) 風荷重の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設（屋根を含む）に作用する風圧力（ P_D ）は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会建築物荷重指針・同解説2015」に準拠して、以下の式により算出する。

なお、ガスト影響係数（ G ）は $G=1.0$ とし、風力係数（ C ）は施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定する。

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

q ：設計用速度圧、 G ：ガスト影響係数（ $=1.0$ ）、 C ：風力係数、 A ：施設の受圧面積

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

ρ ：空気密度、 V_D ：設計竜巻の最大風速

(2) 気圧差荷重の設定

設計竜巻による評価対象施設内外の気圧差による荷重は、フジタモデルの最大気圧低下量（ ΔP_{\max} ）に基づき設定する。設定に際し、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重 W_P を、以下の式により算出する。

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

ΔP_{\max} ：最大気圧低下量、 A ：施設の受圧面積

(3) 衝撃荷重の設定

設計竜巻の設計飛来物による衝撃荷重は、運動エネルギーが最も大きい飛来物について算出する。算出においては、最も衝撃荷重が大きくなる衝突方向の荷重とする。なお、設計飛来物の物性値についてはガイド記載の値を採用する。



3. 6 評価対象施設への影響評価

評価対象施設について、設計飛来物の衝突に対する評価を実施し、構造健全性を確認する。

- (1) 評価対象施設の設計竜巻荷重は、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)を組合せた複合荷重とし、以下の式により算定する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$$

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

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

- (2) 設計飛来物の評価

竜巻防護施設の外皮を構成する屋根、外壁及び開口部について、設計飛来物の衝突に対する裏面剥離または貫通を生じさせないための必要最小厚さを算出し、評価部材の厚さと比較する。

鉄筋コンクリート造部の貫通限界厚さは、貫入深さを修正NDRC式により算出し、Degen式により求める。

また、裏面剥離限界厚さは、Chang式により算出する。

鋼板部については、衝突した場合の貫通限界厚さを、BRL式を用いて算出し、鋼板部の板厚を比較する。



鉄筋コンクリート造部

屋根及び外壁について、設計飛来物の衝突に対する裏面剥離または貫通を生じさせないための必要最小厚さと、評価部材の厚さを比較し、裏面剥離または貫通の有無を確認する。

貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さは、以下の評価式によって算出する。

なお、貫通限界厚さは、貫入深さを①に示す修正NDRC式により算出し、②に示すDegen式により求める。また、裏面剥離限界厚さは、③式に示すChang式により算出する。

$$X_C = \alpha_C \sqrt{4kWN(D/V/1000D)^{1.8}} \quad \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$t_p = \alpha_P D \{2.2(X_C / \alpha_C D) - 0.3(X_C / \alpha_C D)^2\} \quad \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

X_C : 貫入深さ(in)	α_C : 飛来物低減係数	k : $180 / \sqrt{F_C}$
W : 飛来物重量(lb)	N : 形状係数	D : 飛来物直径(in)
V : 衝突速度(ft/s)	F_C : コンクリート強度(psi)	
t_p : 貫通厚さ(in)	α_P : 飛来物低減係数	

貫通評価

$$t_s = \alpha_S 1.84(200/V)^{0.13}(MV^2)^{0.4}/(D/12)^{0.2}(144F_C)^{0.4} \quad \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

t_s : 裏面剥離厚さ(ft)	α_S : 飛来物低減係数	V : 衝突速度(ft/s)
M : 質量(lb/(ft/s ²))	g : 重力加速度(32.2 ft/s ²)	
D : 飛来物直径(in)	F_C : コンクリート強度(psi)	

裏面剥離評価

評価式に適用する低減係数*1については、剛飛来物の低減係数は、貫通・裏面剥離=1.0、柔飛来物の低減係数は、貫通=0.65、裏面剥離=0.6とする。また、形状係数*2については、剛飛来物=1.14、柔飛来物=0.72とする。

*1 : Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part 4:Overall Evaluation of Local Damage, Kiyoshi Muto, etc., 10th SMRT

*2 : 「構造物の衝撃挙動と設計法」土木学会
 先端の形状係数で、非常に鋭い場合は1.14、平坦な場合は0.72とあることから、剛飛来物は、角が当たると想定し、非常に鋭い場合とする。柔飛来物は先端がつぶれて平坦になると考えられることから、平坦な場合とする。



鋼板部

HTRRにおける設計飛来物が建家開口部等（鋼板部分）に衝突した場合の貫通限界厚さを、BRL式*を用いて算出し、貫通力がある鋼製材の貫通厚さと開口部鋼板部分の板厚を比較し、飛来物による貫通の有無を確認する。飛来物による鋼板の貫通限界厚さは、以下の評価式によって算出する。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / 17400K^2d^{3/2}$$

T：鋼板貫通厚さ(in) M：ミサイル質量(lb・s²/ft) V：ミサイル速度(ft/s)
d：ミサイル直径(in) K：鋼板の材質に関する定数=1

*：BRL式については、「ISES7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討(高温構造安全技術研究組合)」「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)」の中で、鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている。

3. 7 設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定

設計竜巻荷重と組合わせる荷重は以下のとおりとする。

- (1) 評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重
評価対象施設により、常時作用する荷重（自重、死荷重、活荷重）を適切に組合わせる。
- (2) 竜巻以外の自然現象による荷重
竜巻と同時に発生する雷、雪、雹、大雨については、以下の理由により施設への影響が相乗しないため、考慮しない。
 - ①雷
竜巻は建家、構築物、及び設備（系統・機器）に対する風荷重、気圧差荷重及び飛来物の衝撃荷重があるが、落雷は雷撃であり影響モードが異なることから、竜巻との組合わせは考慮しない。
 - ②雪
冬期に発生した海上竜巻が襲来する場合は、竜巻通過後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪は竜巻の風に吹き飛ばされ、施設への影響は生じないことから竜巻との組合わせは考慮しない。
 - ③雹
上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に降雹は生じない。竜巻通過前に積もった雹は竜巻の風に吹き飛ばされ、施設への影響は生じない。また、下降流により降雹があっても、直径5cm程度の大型の雹を想定した場合、その重量は約60g、終端速度は33m/sとなり、運動エネルギーは約0.036kJとなり、設計飛来物に包含される。
 - ④大雨
上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雨は降らない。下降流の竜巻通過時や竜巻通過前後に雨が降っても施設への影響は建家への浸水であり、影響モードが異なることから、竜巻との組合わせは考慮しない。
- (3) 設計基準事故時荷重
設計竜巻風速92m/sの竜巻の発生頻度は小さいことから（10⁻⁶/年）、設計基準事故時荷重との組合わせは考慮しない。なお、竜巻防護施設は原子炉建家内に全て設置しており、竜巻の影響を直接受けることはない。

4. HTTR施設の竜巻防護施設

設計竜巻に対するHTTR施設の健全性評価を実施する上で、竜巻防護施設を、以下の方針により抽出した。

- ・HTTRの特徴・経験を踏まえて分類された安全機能の重要度が特に高い施設（自然現象に対する重要安全施設）
- ・原子炉の停止機能、放射性物質の閉じ込め機能（原子炉冷却材バウンダリ）及びそれらの状態監視に必要な監視機能を維持するために必要な設備
- ・使用済燃料貯蔵プールの貯蔵機能を維持するために必要な設備
- ・使用済燃料貯蔵建家については、貯蔵セル及び貯蔵ラックを竜巻防護施設として抽出

竜巻防護施設は全て原子炉建家内に設置していることから、外殻となる原子炉建家を健全性評価の対象とする。

表2 竜巻防護施設の抽出結果（原子炉建家）

No.	安全機能	構築物・系統・機器	備考
1	原子炉冷却材圧力バウンダリ	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器配管系	閉じ込め機能
2	過剰反応度の印加防止	スタンドパイプ、スタンドパイプクロージャー	閉じ込め機能
3	炉心の形成	炉心構成要素、炉心支持鋼構造物、炉心支持黒鉛構造物	炉内構造物
4	放射性物質の貯蔵	使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール、貯蔵ラック	使用済燃料の貯蔵機能維持
5	1次冷却材の内蔵	1次ヘリウム純化設備（原子炉冷却材圧力バウンダリとの接続部から原子炉格納容器外側隔離弁までの範囲）	閉じ込め機能（隔離弁）
6	実験・照射に供する機能	実験設備の一部	未設置
7	原子炉の緊急停止・未臨界維持	制御棒系	原子炉の停止機能
8	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止	1次冷却設備の安全弁	閉じ込め機能
9	原子炉停止系への起動信号の発生	安全保護系（停止系）	原子炉の停止機能
10	安全上特に重要な関連機能	中央制御室	状態監視機能
11	事故時のプラント状態の把握	事故時監視計器の一部	状態監視機能
12	安全上特に重要な関連機能	直流電源設備・安全保護系用交流無停電装置	その他、必要な関連機能



5. 設計飛来物の設定

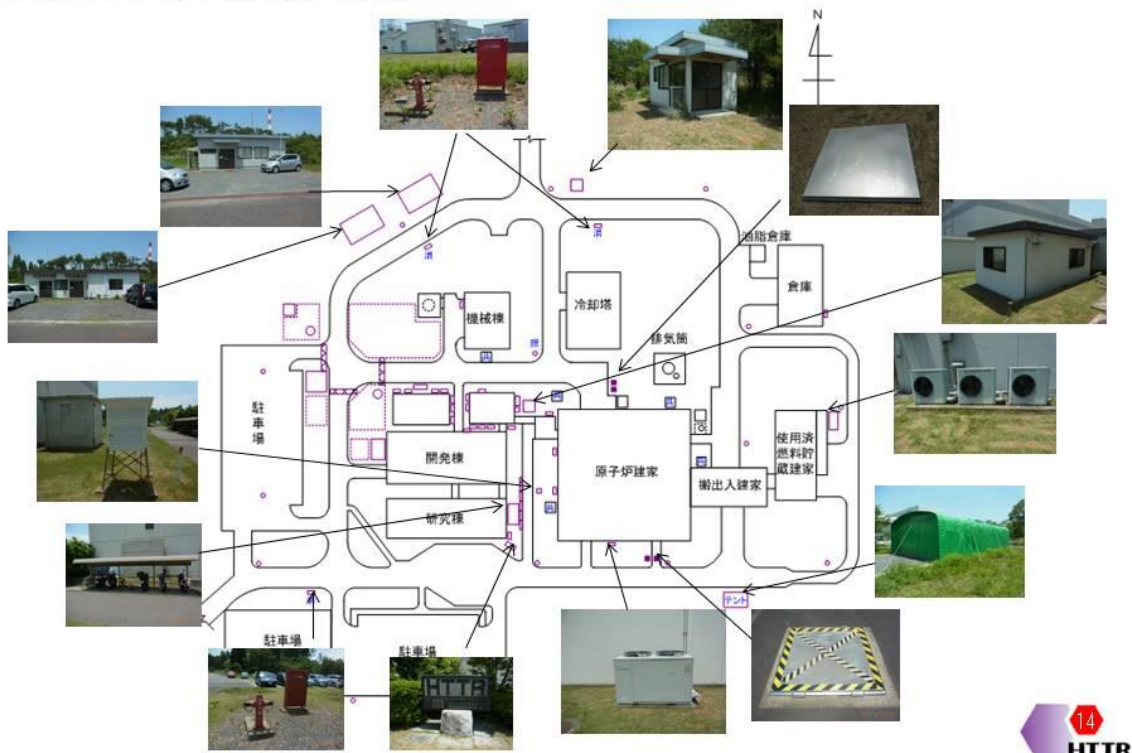
HTTRの竜巻影響評価における設計飛来物を選定するに当たり、HTTR敷地内の飛来物に係る現地調査（ウォークダウン）を行った。現地調査により確認された飛来物について、サイズ、柔・剛による分類及び飛来物の形状（棒状、板状、塊状）による分類を実施し、その中で飛来物発生防止対策の可否、固定状況、運動エネルギー、貫通力等を考慮し、代表となるものを選定した。

表3 竜巻飛来物の分類結果

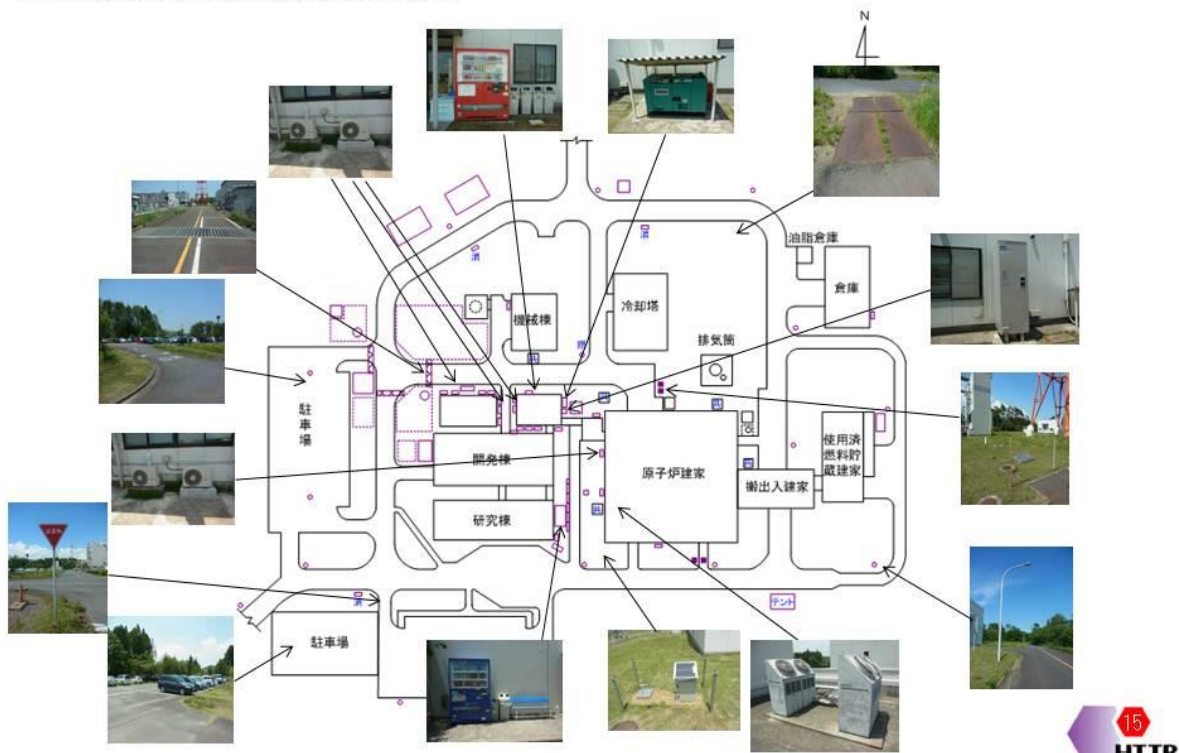
形状	柔飛来物			剛飛来物		
	小	中	大	極小	小	中
棒状	—	照明（外灯）	—	—	鋼製パイプ物干し台 回転灯 標識 柵	—
板状	ベンチ	自転車置き場	—	—	クレーンクマンホール蓋 チェッカープレート 地下タンク蓋	敷鉄板
塊状	消火栓 消火ホース 格納箱 太陽光モジュール 百葉箱 ゴミ箱	室外機 自転車 バイク	電気温水器 テント 自販機 プレハブ小屋 事務所 小型発電機 普通自動車 軽自動車 大型バス トラック 純水運搬車	砂利	—	鋼製材 石碑



HTTR施設における主な竜巻飛来物を以下に示す。



HTTR施設における主な竜巻飛来物を以下に示す。



竜巻飛来物の飛散速度等について算定結果を以下に示す。

表5 竜巻飛来物の飛散速度等算定結果(1/3)

網掛部：設計飛来物

形状	名称	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	重量 (kg)	空力パラメータ (m ² /kg)	運動エネルギー (kJ)	衝撃荷重 (kN)	最大水平速度 (m/s)	飛散高さ (m)	飛散距離 (m)	鉛直速度 (m/s)	浮上有無	
剛	塊状	砂利	0.03	0.03	0.03	0.04	0.009	1	1	6.31	0.02	2.02	0.21	○
		砂利	0.05	0.05	0.05	0.183	0.0055	1	0	0	0	0	0	○
柔	板状	ベンチ	0.4	1.5	0.75	18.5	0.0723	56	278	77.52	>293	>397	11.24	○
		百葉箱	0.84	0.84	1.97	100	0.0266	223	530	66.68	27.64	223.3	15.08	○
	塊状	ゴミ箱	0.5	0.5	0.86	2.3	0.3186	9	36	88.42	49.49	297.5	6.42	○
		消火栓	0.2	0.2	0.75	80	0.0029	0	0	0	0	0	0	○
		ホース収納箱	0.27	0.6	0.9	60	0.0104	55	406	42.74	2.80	55.7	6.25	○
		太陽光モジュール	0.41	0.38	0.67	12	0.0377	29	148	68.4	16.64	176.0	11.36	○
剛	板状	マンホール蓋	0.6	0.6	0.05	37	0.0071	1	15	4.38	0.02	1.0	0.18	○
		地下タンク蓋	1.4	1.4	0.02	47	0.028	9	865	19.18	0.07	16.2	0.78	○
		グレーチング	1.9	8	0.15	1840	0.0058	48	628	7.16	0.05	2.6	0.42	○
		チェッカープレート	0.6	1	0.03	119	0.0035	0	0	0	0	0	0	○
剛	棒状	鋼製パイプ	2	0.05	0.05	8.4	0.0057	11	404	49	21.92	293.5	33	○
		物干し台	0.46	2.5	1.32	65.7	0.0253	140	608	65.20	20.37	206.1	13.49	○
		回転灯	0.08	0.08	2.6	14	0.0072	17	412	48.52	8.87	133.7	10.09	○
		標識	0.06	0.06	3.1	15	0.0059	16	525	45.83	8.25	129.3	9.64	○
		柵	0.05	0.05	1.2	3.7	0.008	3	119	39.95	2.92	55.4	6.49	○

(凡例) ○：浮上あり ×：浮上なし

*設計飛来物の物性値はガイドの値を採用



表5 竜巻飛来物の飛散速度等算定結果(2/3)

網掛部：設計飛来物

形状	名称	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	重量 (kg)	空力パラメータ (m ² /kg)	運動エネルギー (kJ)	衝撃荷重 (kN)	最大水平速度 (m/s)	飛散高さ (m)	飛散距離 (m)	鉛直速度 (m/s)	浮上有無	
柔	塊状	室外機	1.1	2	1.13	365	0.0104	407	740	47.22	3.85	80.6	7.13	○
		自転車	1.9	1.1	0.6	20	0.1284	73	241	84.98	36.75	239.8	9.32	○
		バイク	2.2	0.8	1.15	224	0.0154	362	905	56.83	8.74	159.4	9.76	○
	板状	自転車置き場	8	2	2.3	118	0.1667	464	464	88.67	>51	>362	8.96	○
	棒状	外灯	0.2	0.2	8	60	0.0128	92	920	55.38	38.78	251.8	20.15	○
剛	塊状	鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	0.0065	176	1756	51	28.33	307	34	○
		石碑	0.32	1.6	0.77	2000	0.0007	0	0	0	0	0	0	×
柔	塊状	純水運搬車	2.49	8.82	2.82	8550	0.0042	5385	4326	35.50	3.48	63.1	6.86	○
		普通乗用車1	4.0	1.7	1.46	1080	0.0093	1300	1780	49.05	5.01	139.5	7.76	○
		大型バス	8.99	2.3	2.91	9530	0.0037	4474	3890	30.64	2.49	49.1	5.50	○
		トラック	11.99	2.46	2.42	4270	0.0100	6104	5045	53.47	14.40	177.8	13.10	○
		普通乗用車2	4.54	1.76	1.47	1360	0.0084	1522	2071	47.31	4.16	89.8	7.4	○
		普通乗用車 (ミニバン)	4.7	1.7	1.83	1570	0.0083	1892	2225	49.09	5.89	143.3	8.22	○
		軽自動車1	3.4	1.48	1.78	950	0.0096	1243	1680	51.15	7.72	156.2	9.20	○
		軽自動車2	3.4	1.48	1.62	840	0.0102	1128	1524	51.82	7.09	158.2	8.69	○
		自販機2	0.75	1.5	2	450	0.0083	552	1472	49.53	7.28	142.1	8.63	○

(凡例) ○：浮上あり ×：浮上なし

*設計飛来物の物性値はガイドの値を採用



表5 竜巻飛来物の飛散速度等算定結果(3/3)

形状	名称	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	重量 (kg)	空力パラメータ (m ² /kg)	運動エネルギー (kJ)	衝撃荷重 (kN)	最大水平速度 (m/s)	飛散高さ (m)	飛散距離 (m)	鉛直速度 (m/s)	浮上 有無
柔塊状	プレハブ小屋1	2.9	3.6	3.26	1050	0.0199	2097	1446	63.19	30.25	235.8	16.65	○
	プレハブ小屋2	3.7	5.7	2.65	1200	0.0258	2654	2003	66.50	31.91	232.3	16.10	○
	事務所1	5.5	13.6	3.15	9000	0.0099	12988	8247	53.73	19.17	196.0	15.15	○
	事務所2	7.3	12.8	3.45	11100	0.0097	15974	9260	53.65	20.27	199.3	15.60	○
	自動販売機	0.72	1.1	1.87	310	0.009	396	1100	50.54	7.49	148.7	9.02	○
	電気温水器	0.72	0.62	2.27	539	0.0043	268	864	31.51	2.64	46.5	5.85	○
	小型発電機	0.66	1.4	0.91	490	0.0038	46	139	13.67	0.24	9.4	1.07	○
	テント	7.5	13	3	88	1.1925	397	265	94.98	>260	>340	3.38	○

(凡例) ○：浮上あり ×：浮上なし

竜巻飛来物の調査結果及び飛散速度等算定結果から、飛散して衝突した場合に、衝撃力が大きいと考えられる大サイズで柔な飛来物に分類されるもの(表3参照)について竜巻防護対策を検討した。

検討の結果、車両については影響のない距離への退避、自動販売機は撤去又は移設、電気温水器と小型発電機はアンカー固定(既設)、プレハブ小屋、事務所及びテントについては、分解されて飛散するため鋼製材の評価に包絡するものとした。



竜巻飛来物の分類結果及び飛散速度等算定結果から、衝撃力は小さいが飛来時の速度が大きい場合、衝突によって局所的な損傷をもたらす可能性が考えられる小サイズで剛な飛来物、断面積は比較的小さく局所的な衝撃力が考えられる中サイズで剛な飛来物、及び断面積が大きく風を受けて飛びやすいため、衝突した場合に、衝撃力が大きいと考えられる大サイズで柔な飛来物の中から、竜巻防護対策を取ることが困難なものとして、ガイドを参考に、鋼製材と鋼製パイプを設計飛来物として選定した。

表4 HTTRの設計飛来物の諸元*1 (V₀=100m/s)

飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ (m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	49	51
最大鉛直速度 (m/s)	33	34
運動エネルギー(水平) (kJ)	11	176
運動エネルギー(鉛直) (kJ)	5	79

*1：諸元の数値はガイドに記載されている値。



6. 評価対象施設への影響評価

6. 1 設計電圧による設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性評価

設計電圧による設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性評価結果を以下に示す。
その結果、評価対象施設である原子炉建家は、設計電圧による設計荷重に対し、発生する層せん断力については、健全性が確認されている地震力値^{a)}を下回ることから、原子炉建家は損壊しない見通しを得た。

表6 鉄筋コンクリート造部分の構造骨組の健全性評価結果（参考）

核物質防護情報が含まれているため非公開

6. 2 設計飛来物による評価対象施設の健全性評価

設計飛来物に対する評価対象施設の健全性評価結果を以下に示す。
評価の結果、原子炉建家の外壁及び屋根スラブの厚さは、必要最小厚さを十分に上回っており、設計飛来物による影響はない見通しを得た。

表7 設計飛来物による裏面剝離、貫通評価結果

核物質防護情報が含まれているため非公開

7. 竜巻影響評価での保守性

竜巻影響評価での保守性について各項目ごとにまとめたものを表7に示す。

表7 竜巻影響評価での保守性

項目	評価	備考
設計風速	設計風速をF3竜巻の発生実績から、F3スケールの風速範囲上限値の92m/sとし、評価においては余裕を考慮して100m/sで評価を行う。	
物体の浮上	揚力係数と物体の見附面積の積 ($C_L a$) の代わりに、抗力係数と見附面積の積の平均値 ($C_D A$) を用い、実際より大きな揚力を作用させ浮上しやすくなるように設定する。	参考資料2
飛来物の初期配置	飛来物を多点数配置し、その直上で瞬時に竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場での飛来物が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛散速度が評価できるような設定とする。	参考資料3
設計飛来物の飛来速度	設計飛来物が必ずしも最大速度で防護対象施設に衝突するとは限らないが、設計竜巻によって飛来した際の最大速度（水平方向・垂直方向）を設定する。	
竜巻防護対策*	車両については退避を原則とするが、評価上の最大飛散距離約160mに対し、余裕を考慮して離隔距離を200m以上とする。	
防護対象施設の健全性	防護対象施設である原子炉建家の外壁厚さは、設計飛来物が衝突しても、貫通を生じることのない十分な厚さを有している（全方向で確認）。また、竜巻防護施設は全て原子炉建家内に設置しており、竜巻の影響を直接受けることはない。	

*竜巻防護対策（車両退避等）については、大洗研究開発センターの竜巻対応要領（作成中）により実施する。

参考資料1(1/14)

竜巻の風速場モデルの概要

(1) フジタモデルの概要

- ・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、竜巻動画の写真図化分析、地上痕跡調査、被災状況調査に基づき提案された。
- ・ランキン渦モデルと同様に代数式で風速場が表現されるがやや複雑。
- ・半径方向に3つの領域（内部コア・外部コア・最外領域）に分割して風速場をモデル化する。
- ・接線風速はランキン渦モデルと同様であるが、高さ依存性がある。
- ・上昇流は外部コアのみに存在する。
- ・地面付近で竜巻中心に向かう強い流れがある。

(2) フジタモデルのメリットと問題点

- (メリット)
- ・観測に基づき考案されたモデルであり、実際の風速場に近い。
 - ・比較的簡単な代数式で風速場を表現しうる。
- (問題点)
- ・不確かさを考慮する必要がある。

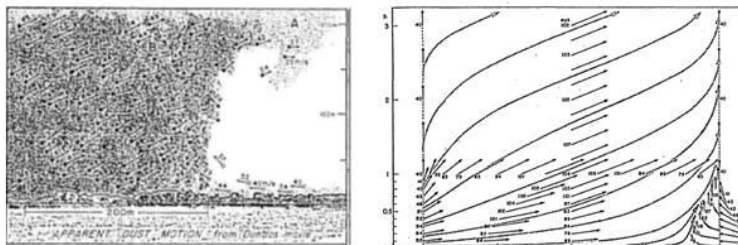


図 参一1 分析によって作成した風速ベクトル（左）、ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）¹⁾

1) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.

フジタモデルの概要

「フジタモデル」の風況イメージを以下に示す。

フジタモデルの風速場は、図に示すように半径方向に3つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）で構成されており、鉛直方向は流入層と非流入層とで構成される。流入層では圧力勾配が遠心力よりも卓越するため、竜巻の中心方向に向かう強い流れがあり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。内部コアと外部コアの接線風速は半径に比例し、最外領域では半径に反比例する。内部コアには上昇風速や半径方向風速は存在しないが、外部コアには存在する。流入層より上部では、外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。図中に示すフジタモデルDBT-77における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book^(*)に記載されている。

フジタモデル モデル概要*

実際の竜巻観測記録を元に、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）に分割してモデル化

$V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$ 接線風速 (V_θ) は高さ依存性あり

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ \frac{1}{r} & (r \geq 1) \end{cases}, \quad F_h(z) = \begin{cases} z^0 & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

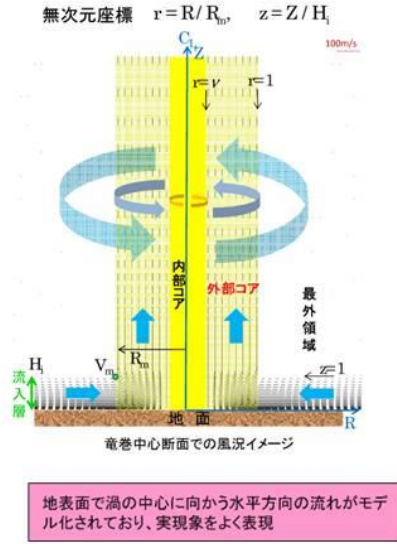
$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq V) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1 - \nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^2)^3 & (z < 1) \\ B[1 - \exp(-k(z-1))] & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1 - \nu^2} A(16z^2 - 7z^4) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{K(1 - \nu^2)} [2 - \exp(-k(z-1))] & (z \geq 1) \end{cases}$$

V_θ : 接線風速 V_z : 上昇風速 V_r : 流入層高さ
 V_r : 半径方向風速 V_m : 最大旋回風速 V_c : コア半径

* Fujita, T.T. Workbook of Tornadoes and High Winds for Engineering Applications, U.Chicago, 1978



竜巻中心断面での風況イメージ
 地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れがモデル化されており、実現象をよく表現

図 参一2 フジタモデルの風況場イメージ



ランキン渦モデルの概要

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」の風況イメージを以下に示す。

ランキン渦モデルは、米国NRCガイド¹⁾でも採用されており、上空の周方向風速分布を良く再現することができることから、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデルは、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を付加している。そのため、流れの連続の式（質量保存式）を満たしておらず、図に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体に対して、初期条件として高所にあることを仮定して評価する場合には保守性が大きくなる。

ランキン渦モデル モデル概要*

- ・風速分布は高さに依存しない
- ・半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z は飛来物速度評価のみに付加される(最大接線風速 V_m に $2/\sqrt{5}$ を乗じる)

無次元座標 $r = R/R_m$

$$V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$$

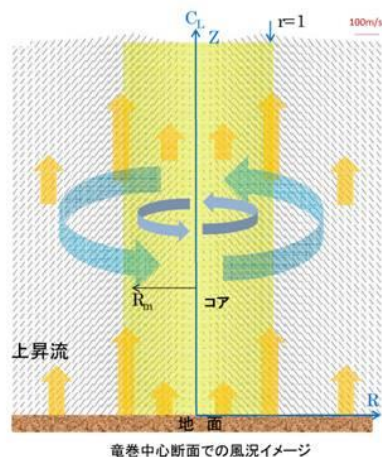
$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ \frac{1}{r} & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$$

$$V_z = \frac{2}{3} V_\theta$$

$$\text{旋回風速 } V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$$

V_θ : 接線風速 V_z : 上昇風速
 V_r : 半径方向風速 V_m : 最大旋回風速



竜巻中心断面での風況イメージ

* Simiu, E. and Cordes, M. NBSIR 76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976

1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.

図 参一3 ランキン渦モデルの風況場イメージ

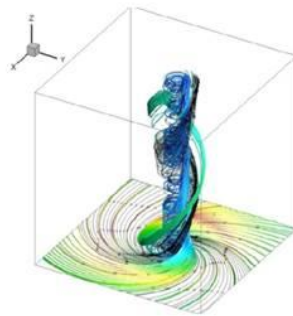


各風速場モデルの比較(1/3)

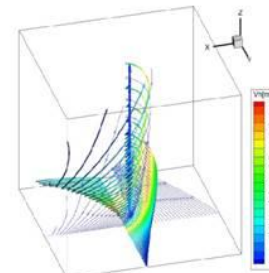
竜巻の風速場モデルとして利用されている「ランキン渦モデル」、「フジタモデル」の風速場を以下に示す。
 ここで気象庁HPに竜巻のついて次のような記載がある。
 「竜巻」とは、発達した積乱雲又は積雲に伴って発生する上下方向の回転軸を持つ激しい渦巻きで、しばしば漏斗状または柱状の雲を伴う。竜巻の中心では周囲より気圧が低いため、地面の近くでは、空気は渦の中心に向かうように狭い範囲に吹き込み、回転しながら急速に上昇し、積乱雲等と共に移動する¹⁾。
 この表現をフジタモデルの風速場構造と比較すると、地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れが、「竜巻」の表現とよく一致しており、フジタモデルは実現象を良く再現できている。



竜巻のイメージ図¹⁾



フジタモデルの風速場



ランキン渦モデルの風速場

1)気象庁HP

図 参一4 竜巻影響評価フローと評価に用いる竜巻モデル



各風速場モデルの比較(2/3)

飛来物評価でのランキン渦モデルとフジタモデルの比較を表に示す。

表 参一1 各風速場モデルの比較

モデル名	メリット	使用実績	課題
ランキン渦モデル	・非常に簡単な式で風速場を記述することができる。	・米国NRCガイドで採用されており、利用実績が高い。	・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、地面付近では非現実的な風速場となる。
フジタモデル	・観測に基づき考案されたモデルであり、実際の風速場に近い。 ・比較的簡単な代数式で風速場を表現できる。 ・流体の連続式を満たす定式化。 ・地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる。	・米国DOE重要施設的设计基準作成に利用されている。	・不確かさを考慮する必要がある。



各風速場モデルの比較(3/3)

○フジタモデルの中で竜巻工学モデルDBT-77を適用している理由について

フジタモデルには、Fujita Work Book¹⁾に記載されるDBT-77とDBT-78があり、DBT-77は単一渦型のモデル、DBT-78は多重渦型のモデルという違いがある。

米国NRCガイドにおいては、以下のように多重渦型のDBT-78について記載されている。

(In the annulus between the inner core radius and the outer core radius, suction vortices from in strong tornadoes and rotate around the center of the parent tornado)

また、DBT-78モデルは、Fujita Work Book において、最大風速や発生率がモデル化されているのみであり、飛散解析に必要な風速場に関する数式が完全には定義されていない。また、仮にDBT-78モデルを適用した場合、竜巻半径が東京工芸大の報告書に示されている、日本で観測された被害幅に基づく竜巻半径との整合が取れなくなる。

さらに、フジタモデルの竜巻風速場における物体の浮上解析を目的に開発された解析コード「TONBOS」においてもDBT-77を風速場モデルに設定している。

以上より、竜巻影響評価に関しては、フジタモデルのDBT-77を適用している。

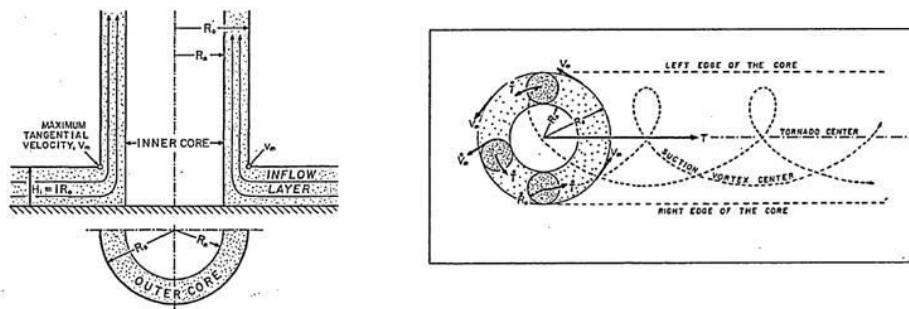


図 参一5 DBT-77モデル(左)とDBT-78モデル(右)の模式図¹⁾

1)Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.



被災事例に対する飛散解析

(1) フジタスケールとの比較

フジタスケールの風速条件で自動車の浮上・飛散を評価し、各スケールにおける被災状況との整合性を確認した。

表 参一2 フジタスケールで示されている自動車飛散状況

フジタスケール	風速	自動車の被災状況 ¹⁾
F 2	50~69m/s	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F 3	70~92m/s	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F 4	93~116m/s	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる、またはかなりの距離を転がる)



自動車の飛散状況は概ね整合している

表 参一3 フジタモデルによる自動車の飛散評価結果²⁾

フジタスケールとの対応	最大水平風速 V_0 (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)
F 2 (静止)	69	59	10	1.0	1.4	0
F 2 (走行)	89*	59	30*	23	25	0.9
F 3 (静止)	92	79	13	23	34	1.1
F 4 (静止)	116	99	17	42	59	3.1

*: 竜巻の移動速度10m/sに自動車の相対走行速度20m/s (72km/h)を加えたもの。

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)江口謙, 杉本聡一郎, 平口広丸, 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



(2) 米国Grand Gulf原子力発電所への竜巻来襲事例 (1/2)

1978年4月17日 ミシシッピ州で建設中のGrand Gulf 原子力発電所に竜巻が来襲した¹⁾²⁾。図は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、竜巻の規模はF2であったと考えられている。パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上しなかったが転倒し、パイプが散乱したものの7m~9mの範囲に留まったことが報告されている。このパイプはTransuteパイプと呼ばれる、コンクリート・石綿製で、長さ8フィート、直径（外径）9インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデル及びランキン渦モデルを風速場として用いた飛散解析を行った。



- 1) McDonald, J. R., 2001: T. Theorore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, 63-72.
- 2) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, 1978: Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys. NUREG/CR-0383, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 61 pp

図 参-6 Grand Gulf原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況



(2) 米国Grand Gulf原子力発電所への竜巻来襲事例 (2/2)

(Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散の再現計算)

表 参-4 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散の再現解析条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9inch(0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m ³
	飛行定数C _p A/m	0.0080m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数51個×51個、竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内に等間隔配置。 ・ 設置高さ1m（パイプが収納されていた木箱が2段重ねで配置されていた状況を想定。） 	

表 参-5 Grand Gulf 原子力発電所資材のパイプの飛散解析結果

風速場モデル	初期物体高さ	結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	1m	1.2m	0m	4.9m/s
ランキン渦モデル	1m*	42.6m	0.34m	30.7m/s
ランキン渦モデル	40m	227m	0.34m	40.9m/s

*：フジタモデルと同条件とした

飛散解析の結果、フジタモデルでは、初期高さからの浮上はないとの結果が得られ、実際に確認された状況（浮上せず転倒した木箱からパイプが散乱）に相似している。

一方、ランキン渦モデルでは、飛散距離が初期高さを1mとした場合においても実際に確認された状況（浮上せず転倒した木箱からパイプが散乱）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実現象と乖離した結果となった。



(3) 佐呂間竜巻での自動車飛散事例 (1/5)

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町で発生した竜巻（以下、「佐呂間竜巻」と呼ぶ。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている¹⁾。被災状況を図に示す。この事例では被災時に4tトラックに2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている。また、4tトラックの他に2台の自動車について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は、竜巻が頻発する米国でも殆ど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明瞭な場合が多いことが挙げられる。



- 1)札幌管区気象台：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。災害時気象調査報告、災害時自然現象報告書、2006年第1号、2006。
- 2)奥田泰雄、喜々津仁密、村上知徳、2006年佐呂間町竜巻補外調査報告。建築研究所災害調査、46、2006。

図 参一七 佐呂間竜巻による被災状況¹⁾²⁾に一部加筆



(3) 佐呂間竜巻での自動車飛散事例 (2/5)

フジタモデルを風速場として用い、入手可能なデータ¹⁾²⁾に基づき竜巻特性条件と4tトラックの物体条件を表参一6のように設定し、竜巻とトラックの距離を合理的な範囲で変化させて飛散解析を行った。車両と竜巻中心との距離を18m、20m、22mとした場合の解析結果を表参一7及び図参一8に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向と同様であり、特に車両と竜巻中心との距離20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

表 参一六 佐呂間竜巻の4 tトラックの解析条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s	
	最大接線風速	70m/s	
	移動速度	22m/s	
	コア半径	20m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそうPA-FK71Dの仕様を採用	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両重量	4000kg
	飛行定数 $C_p A/m$	0.0056m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数1個。 ・ 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない。 ・ 設置高さ0m 		

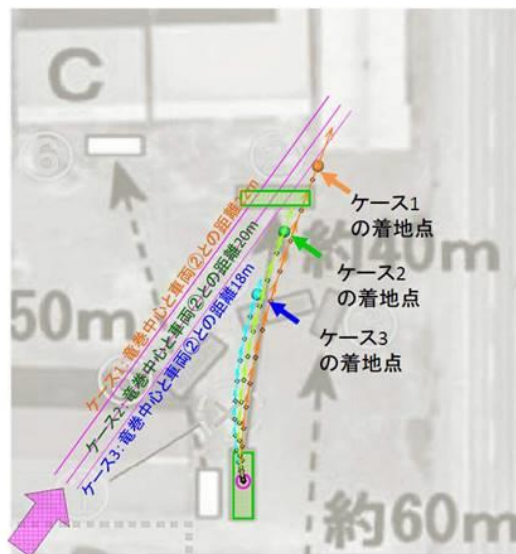
表 参一七 佐呂間竜巻の4 tトラックの飛散解析結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	45.4m	2.8m	25.8m/s
2	20m	35.5m	2.3m	22.2m/s
3	18m	25.9m	1.7m	18.8m/s

- 1)札幌管区気象台：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。災害時気象調査報告、災害時自然現象報告書、2006年第1号、2006。
- 2)奥田泰雄、喜々津仁密、村上知徳、2006年佐呂間町竜巻補外調査報告。建築研究所災害調査、46、2006。



(3) 佐呂間竜巻での自動車飛散事例 (3/5)



1) 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻および飛来物速度の設定に関するガイドライン：日本保全学会原子力規制関連事項検討会

図 参一八 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果¹⁾



(3) 佐呂間竜巻での自動車飛散事例 (4/5)
(多点多数配置を考慮した飛来物評価)

次に、フジタモデルを用いた飛来物評価法を検証するため、佐呂間竜巻における4tトラックの被災事例を多点多数配置を考慮して評価し、実際の被災状況と比較した。
この飛来物評価では、多点多数配置した飛来物それぞれがとる最大水平速度及び最大飛散速度のうち、最も大きな値を評価値として採用した。解析条件を表に示す。

表 参一八 佐呂間竜巻の乗用車の解析条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	佐呂間竜巻の4tトラックと同条件	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数51個×51個、竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内に等間隔配置。 ・ 設置高さ0m 	

表参一八に実際の被災状況と、多点多数配置による飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図参一八に被災後の4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる多点多数配置を考慮した飛来物評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は36m/s、最大飛散高さは3.6m、最大飛散距離は63.4mとなった。実際の4tトラックの飛散距離は約40mであることから、フジタモデルによる多点多数配置を考慮した飛来物評価は保守的な結果となった。

また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形を留めていることなどから、多点多数配置における飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して再現性は高い。

ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して過大な結果となった。

これらの結果から、飛来物の飛散評価においてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。



(3) 佐呂間竜巻での自動車飛散事例 (5/5)
(多点配置を考慮した飛来物評価)



図 参一9 竜巻による被災後の4tトラックの様子¹⁾²⁾

1)札幌管区気象台：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・災害時気象調査報告、災害時自然現象報告書、2006年第1号、2006。
2)奥田孝雄、喜々津仁密、村上知徳、2006年佐呂間町竜巻補外調査報告。建築研究所災害調査、46、2006。

表 参一9 実際の被災状況と多点配置による飛来物評価法の結果比較

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ ^{*2}	最大水平速度
フジタモデル（地上）	63.4m	3.6m	36.0m/s
ランキン渦モデル（地上 ^{*1} ）	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル(40m)	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約40m	4tトラックの運転席に乗車していた乗員2名が幸い存命で救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じており ¹⁾ 、被災した4tトラックが地面からは3.6m以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形を留めていることが示されており ¹⁾ 、実際の飛来物速度は本解析で得られた最大飛来物速度を大きく下回るものと推察できる。

*1：フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較するため、フジタモデルと同条件とした。
*2：初期物体高さからの飛散高さ。



飛来物評価法での物体の浮上に関する保守性 (1/2)

(1) 物体の揚力の計算式

飛来物の飛行モデルとして、空中では、ガイドの飛来物運動モデル¹⁾²⁾と同様に、図参一10(a)のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力 F_D と重力のみが作用している飛行モデルを採用している。
一方、地上にある物体には図参一10(b)のように地面効果による揚力を考慮している³⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、地面の存在により流れが非対称になるため、物体の上部の圧力が低くなることで、物体を浮上させる駆動力が生じることから、物体が対称形であっても揚力 F_L が作用する。この場合、物体の空中での運動方程式は次式にて求められる。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |V_w - V_M|_{xy}^2 \quad \dots (1)$$

ただし、 ρ は空気密度、 V_M は飛来物の速度ベクトル、 V_w は風速ベクトル、 $|*|_{xy}$ は*のx,y成分（水平成分）の大きさを表す。

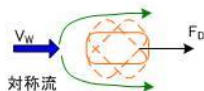


図 参一10(a) 空中で飛来物へ作用する力

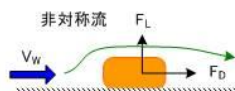


図 参一10(b) 地面付近飛来物へ作用する力

1)Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
2)東京工業大学、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
3)江口謙、杉本聡一郎、服部康男、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



飛来物評価法での物体の浮上に関する保守性 (2/2)

(2) 揚力係数の設定

物体浮上・飛散評価での保守性を確保するため、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 C_{DA} を用いる。

$$C_{DA} = \frac{1}{3} (C_{Dx}A_x + C_{Dy}A_y + C_{Dz}A_z) \quad \dots (2)$$

ここで、 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、その他も同様である。 C_{DA} は空中飛行物体に作用する流体抗力に関連するパラメータであるが、このような代用が保守的であることを確認するため、地面に置かれた物体の C_{La} の値（風洞実験等で得られた実測値）と(2)式で計算される空中での C_{DA} の値について、参考文献から引用した比較例を表添-1に示す。

これらの結果は、 $C_{DA} > C_{La}$ の関係があることを示しており、揚力係数 C_L は特殊な形状を除く通常の物体に対して、一般に抗力係数 C_D よりも小さいことから、 C_{La} を C_{DA} で代用することで保守的に物体の浮き上がり等を評価することができる。

表 参-10 主な物体の C_{DA} と C_{La} の値の比較

物体	円柱 $\Phi : d$	自動車 (Dodge Dart)	自動車 (セダン)	自動車 (ミニバン)
参考文献	EPRI, 1978 ¹⁾		Schmidlin et al., 2002 ²⁾	
C_{La}	2.8d ²	48.7ft. ²	9.5m ² *1	9.7m ² *1
C_{DA}	7.1d ²	129ft. ²	12.0m ²	14.4m ²

*1 : 4つのタイヤに作用する地面からの反力のうち、少なくとも一つがゼロとなった時点の風速Uから計算した C_{La} 値 ($C_{La} = 2mg / \rho U^2$)を使用

1) Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, EPRI, NP-748, 1978

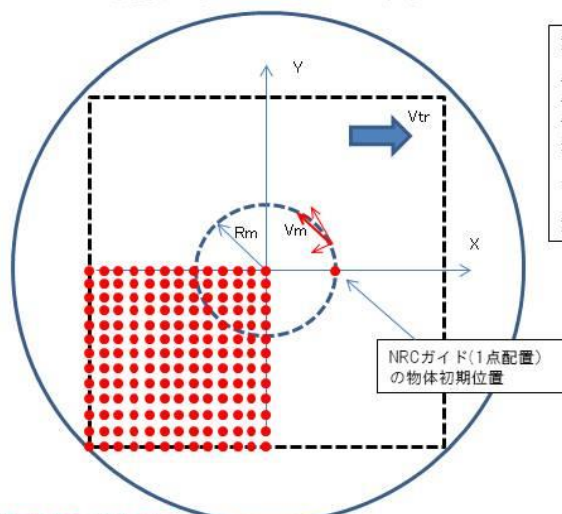
2) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G. Unsafe at any (wind) speed? Testing the stability of motor vehicles in severe winds, pp.1821-1830, Vol.83, No.12, Bulletin of the American Meteorological Society, 2002.



物体の初期配置に関する保守性 (1/3)

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散速度は、物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。米国NRCガイドに記載されている方法は物体の1点配置であることから、物体を多数配置した場合との飛来速度を比較した。配置の違いを図参-11に示す。

【竜巻中心周りに51×51個配置する場合】



評価条件

竜巻の最大風速	: 100m/s
竜巻の移動速度	: 15m/s
竜巻コア半径	: 30m
飛散させる物体	: 東京工芸大の成果報告書 ¹⁾ に記載の物体
1点配置	: 竜巻進行方向の竜巻半径の位置
多点配置	: 竜巻半径の4倍の正方形に51×51個を配置
評価モデル	: フジタモデル

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、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

第3象限のみ●で物体を表示

図 参-11 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係



物体の初期配置に関する保守性 (2/3)

1点配置時と多点数配置時の最大飛散速度の比較と物体のパラメータを図参-12に示す。
 米国NRCで用いられている1点配置の手法と比較し、多点数配置の手法では物体の多くが1点配置に比べて大きな飛来速度となった。物体を多点数配置することによって、その竜巻風速場における最大風速を受ける物体が出てくることからこのような結果となった。
 従って、物体を多点数配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられる。

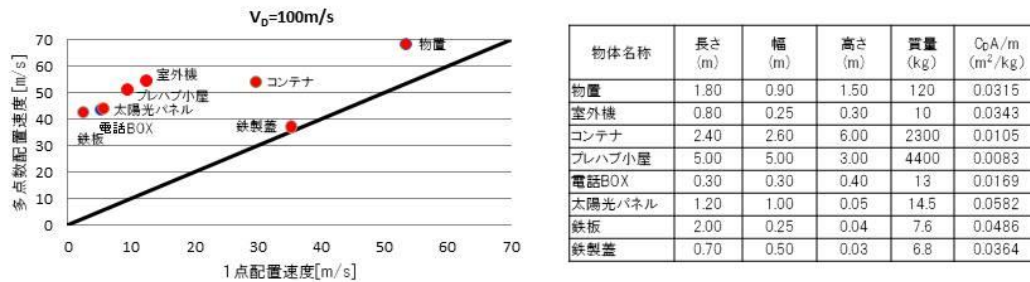


図 参-12 1点配置時と多点数配置時の最大飛散速度の比較と物体のパラメータ



物体の初期配置に関する保守性 (3/3)

遠方から物体に接近する竜巻と、物体真上に発生する竜巻による飛散の比較イメージを図参-13に示す。実際の竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合など）を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝されて飛散することになるが、物体の真上に竜巻を発生させる設定とした場合、実際の竜巻による飛散と比較すると、より厳しい結果となる。

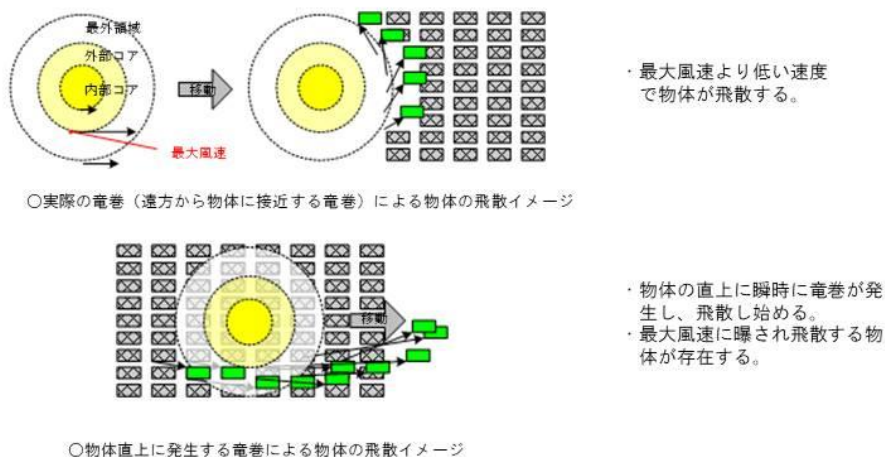


図 参-13 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ



まとめ

- フジタモデルは、米国NRCの要望で実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国DOEの重要施設に対する設計基準の作成にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルでは出来なかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。
- このことは、フジタスケールとの比較、米国Grand Gulf 原子力発電所の資材パイプの飛散及び佐呂間竜巻での車両飛散事例の検証結果において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が、実際の飛散状況により近い結果を与えることが分かった
また、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とすること、さらに、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した、飛来物速度等を保守的に評価できるようにした。
- 以上のように、評価全体における保守性を確保しつつ、飛来物評価結果が現実と大きく乖離しないことから、竜巻影響評価において、フジタモデルを適用することは妥当な方法である。

竜巻影響評価における フジタモデルの適用について

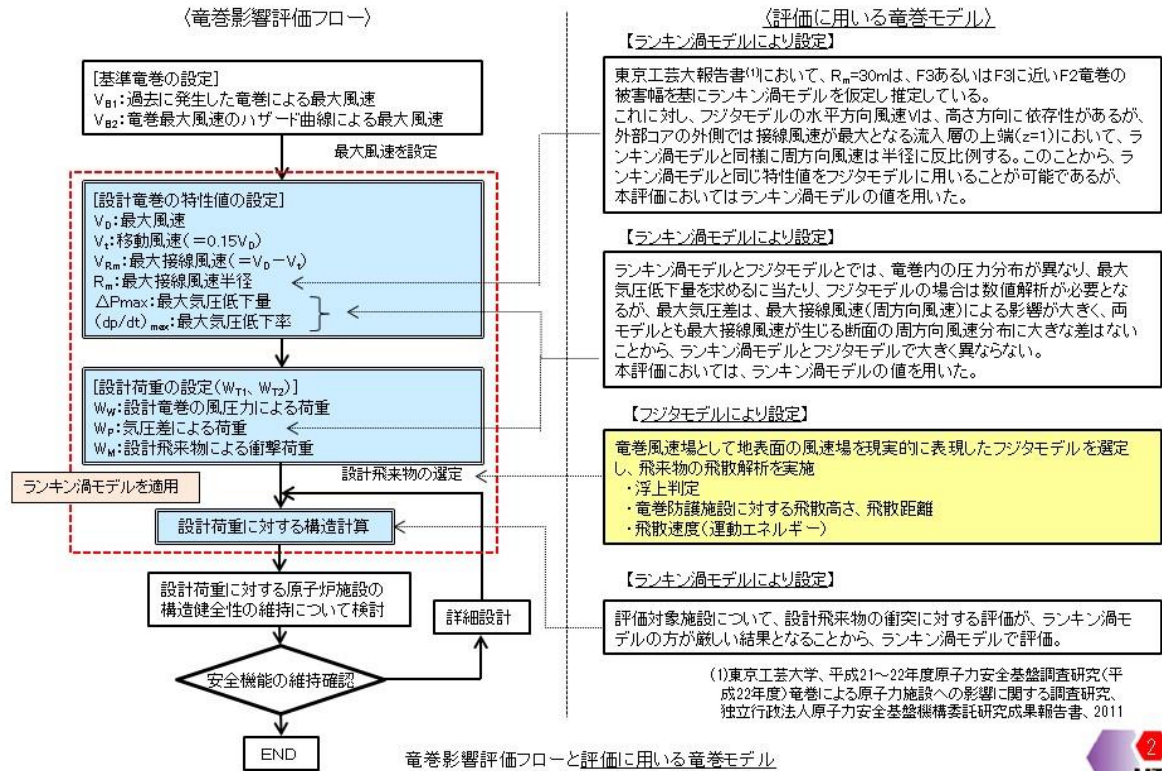
基本的な考え方

- 竜巻影響評価にあたっては、設計竜巻の特性値の設定、設計荷重の設定を行う必要があり、これらの設定にはランキン渦モデルとフジタモデルで評価が可能と考えている。
- ランキン渦モデルとフジタモデルとでは、下表に示すように、最大気圧低下率や飛来物の飛散速度には大きな差がなく、これらの評価には何れのモデルも適用可能と考えている。
- 飛来物の飛散高さや飛散距離については、風速場モデルにより、大きな違いが出ることから、現実的な評価が出来るフジタモデルを採用する。
- これ以外については、評価結果の厳しくなるランキン渦モデルで評価することが合理的と考えている。

飛来物評価モデルの比較(最大風速100m/s)

	ランキン渦モデル	フジタモデル
最大気圧低下量	89hPa	76hPa
飛散速度(軽自動車)*	56m/s	50m/s
飛散高さ(軽自動車)*	61m	11m
飛散距離(軽自動車)*	344m	229m

*: 初期配置を地上40mとして評価。



＜設計竜巻の特性値の設定＞

(1) 設計竜巻の移動速度

最大風速 $V_0=100\text{m/s}$ の竜巻について、移動速度 V_T については、ガイドを参照し、下記の式にて設定する。

$$V_T=0.15 \cdot V_0 \quad (\text{ガイドの3.1式})$$

なお、この式は日本の竜巻観測記録(気象庁データベース)に基づいた竜巻移動速度(平均値)と最大風速との関係性を参照して設定されており、風速場モデルに関わらず用いることができる。

(2) 最大接線風速 V_{Rm}

最大接線風速 V_{Rm} については、ガイドを参照し、竜巻の最大風速から移動速度 V_T を引いた値として、下記の式にて設定する。この値も風速場モデルによらず用いることができる。

$$V_{Rm}=V_0 - V_T \quad (\text{ガイドの3.2式})$$

(3) 最大接線風速半径

最大接線風速 R_m については、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に準拠して以下の値を用いる。この値も風速場モデルによらず用いることができる。

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

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量(ΔP_{max})

フジタモデルは、地面との摩擦の影響により回転が弱まり、中心付近が低圧になりにくい。そのため、ランキン渦モデルより最大気圧低下量が小さくなるが、大きな差はない。

フジタモデル
最大気圧低下量(ΔP_{max})=76hPa、

ランキン渦モデル
最大気圧低下量(ΔP_{max})=89hPa

〈設計飛来物の選定〉

竜巻風速場として地表面の風速場を現実的に表現したフジタモデルを選定し、飛来物の飛散解析を実施。

○竜巻防護施設に対する飛散高さ・飛散距離

フジタモデルによる飛来物の飛散高さ・飛散距離の評価結果とランキン渦モデルによる評価結果を以下に示す。この結果から、飛来物を地上高さ40mに配置して評価したランキン渦モデルでは、過大な評価結果となる。

名称	フジタモデルによる解析結果 (初期配置:地上40m)		ランキン渦モデルによる解析結果 (初期配置:地上40m)	
	飛散距離(m)	飛散高さ(m)	飛散距離(m)	飛散高さ(m)
普通車	211	7	337	52
軽自動車	229	11	344	61

解析に用いたパラメータ値

最大風速 V_0 (m/s)	100
移動速度 V_T (m/s)	15
最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	85
最大接線風速半径 R_m (m)	30

解析に用いた物性値

普通車 : 4.4m(縦)×1.7m(幅)×1.5m(高さ)
 軽自動車: 3.4m(縦)×1.5m(幅)×1.5m(高さ)

〈設計飛来物の選定〉

竜巻風速場として地表面の風速場を現実的に表現したフジタモデルを選定し、飛来物の飛散解析を実施。

○飛散速度(運動エネルギー)

フジタモデルによる飛来物の飛散速度は、飛来物の最大水平速度を求め、その運動エネルギーを算定することで評価を行う。その結果、フジタモデルとランキン渦モデルでは、有意な差はない。(条件:初期位置を40mとした。)

主な飛来物の飛散速度算定結果

名称	長さ(m)	幅(m)	高さ(m)	重量(kg)	空力パラメータ(m^2/kg)	フジタモデル	ランキン渦モデル
						最大水平速度(m/s)	最大水平速度(m/s)
プレハブ小屋	3.7	5.7	2.65	1200	0.0253	61	66
事務所	7.3	12.8	3.45	11100	0.0097	49	54
自動販売機	0.72	1.1	1.87	310	0.009	48	53
電気温水器	0.72	0.62	2.27	539	0.0043	41	45
小型発電機	0.66	1.4	0.91	490	0.0038	40	44
車両(普通車)	4.4	1.7	1.5	1140	0.0097	49	54
車両(軽自動車)	3.4	1.5	1.5	710	0.0116	50	56
テント	7.5	13	3	88	1.1925	96	96

〈設計荷重の設定〉

評価対象施設について、風荷重、気圧差荷重及び衝撃荷重を設定する。

(1) 風荷重の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設(屋根を含む)に作用する風圧力(P_D)は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会建築物荷重指針・同解説2015」に準拠して、以下の式により算出する。

なお、ガスト影響係数(G)は $G=1.0$ とし、風力係数(C)は施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて設定する。本設定に関して、風速場モデルに関わらず同一となる。

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

q : 設計用速度圧、 G : ガスト影響係数(=1.0)、 C : 風力係数、 A : 施設の受圧面積

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

ρ : 空気密度、 V_D : 設計竜巻の最大風速

(2) 気圧差荷重の設定

設計竜巻による評価対象施設内外の気圧差による荷重は、最大気圧低下量(ΔP_{max})に基づき設定する。

設定に際し、気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し、内外気圧差による圧力荷重 W_P を、以下の式により算出する。最大気圧低下量(ΔP_{max})はランキン渦モデルの方が保守的となることからランキン渦モデルにより設定した。

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

ΔP_{max} : 最大気圧低下量、 A : 施設の受圧面積

(3) 衝撃荷重の設定

設計竜巻の設計飛来物による衝撃荷重は、運動エネルギーが最も大きい鋼製材について算出する。算出においては、最も衝撃荷重が大きくなる衝突方向の荷重とする。



〈評価対象施設への影響評価〉

評価対象施設について、設計飛来物の衝突に対する評価を実施し、構造健全性を確認する。

(1) 評価対象施設の設計竜巻荷重は、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)を合わせた複合荷重とし、以下の式により算定する。本評価については、設計飛来物の最大水平速度に依存することから、ランキン渦モデルの方が保守的となることからランキン渦モデルにより設定した。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$$

W_{T1} 、 W_{T2} : 設計竜巻による複合荷重

W_W : 設計竜巻の風圧力による荷重

W_P : 設計竜巻の気圧差による荷重

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

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

(2) 設計飛来物の評価

竜巻防護施設の外殻を構成する屋根、外壁及び開口部について、設計飛来物の衝突に対する裏面剥離または貫通を生じさせないための必要最小厚さを算出し、評価部材の厚さと比較する。

鉄筋コンクリート造部の貫通限界厚さは、貫入深さを修正NDRC式により算出し、Degen式により求める。

また、裏面剥離限界厚さは、Chang式により算出する。

鋼板部については、衝突した場合の貫通限界厚さを、BRL式を用いて算出し、鋼板部の板厚を比較する。

本評価については、設計飛来物の最大水平速度に依存することから、ランキン渦モデルの方が保守的となることから、ランキン渦モデルにより設定した。



＜竜巻の風速場＞

地上にある物体に対して浮上・飛散現象を評価するため、藤田博士が提案した竜巻風速の工学モデルDBT-77(以下、「フジタモデル」)により評価した。ランキン渦モデルでは、物体の初期高さを一律に40mと仮定して飛来経路、飛来速度を計算する方法だが、フジタモデルでは、地上に置かれた物体の浮上・飛散を模擬する竜巻飛来物評価法である。フジタモデルは、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)に分割するとともに、高さ方向に2つの領域(流入層、非流入層)に分割してモデル化したものである。このフジタモデルを竜巻の風速場として用い、これに地上物体の浮上モデルを付加した数値解析コードTONBOSにより飛散計算を実施する。

＜飛来物評価での各風速場モデルの比較＞

表1及び表2に各風速場モデルの比較及び概要について示す。

表1 各飛来物評価モデルの比較

モデル名	メリット	課題
ランキン渦モデル	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。	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、地面付近では非現実的風速場となる。 <u>地比からの飛散距離を解析できない。</u>
フジタモデル	観測に基づき考案されたモデルであり実際の風速場に近い。 比較的簡単な代数式で風速場を表現できる。 NRCガイドでもランキン渦モデルと同様に参照されている。 <u>地比に設置した状態から飛来物の挙動解析できる。</u>	特になし。(風況をモデル化する上でのプログラミングがやや複雑。)

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
2014年9月9日日本保全学会原子力規制関連事項検討会（一部加筆して作成）



表2 飛来物評価での各風速場モデルの概要

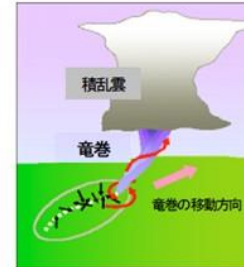
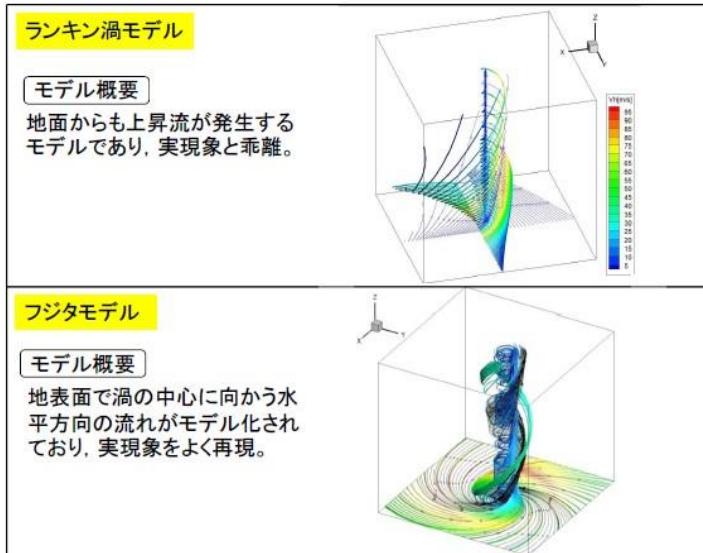
モデル名	風速場モデルの概要
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> 風速場の接線風速V_θをランキン渦で模擬する。 $V_\theta = (r/R_m) V_{\theta max}$ ($r < \text{コア半径 } R_m$)、$V_\theta = (R_m/r) V_{\theta max}$ ($r > \text{コア半径 } R_m$) 飛来物評価の場合に限り、半径方向風速V_rと上昇風速V_zを付加する。 $V_r = (1/2) V_\theta$、$V_z = (2/3) V_\theta$ 風速分布は高さに依存しない。
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> 半径方向に3つの領域(内部コア、外部コア、最外領域)に分割して風速場をモデル化する。 接線風速V_θはランキン渦モデルと同様であるが、高さ依存性あり。 上昇流(V_z)は外部コアのみに存在する。 地面付近で竜巻中心に向かう強い流れ(V_r)がある。

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
2014年9月9日日本保全学会原子力規制関連事項検討会（一部加筆して作成）



風速場モデルの比較

➤ 「ランキン渦モデル」、「フジタモデル」の風速場構造のイメージを以下に示す。これらと、気象庁HPの竜巻についての記載と比較すると、フジタモデルは、地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れ等の状況が整合しており、実現象を再現できている。

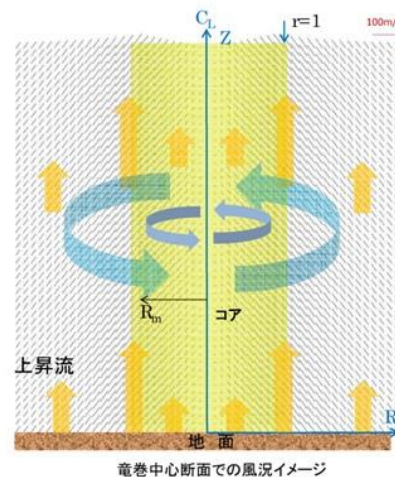
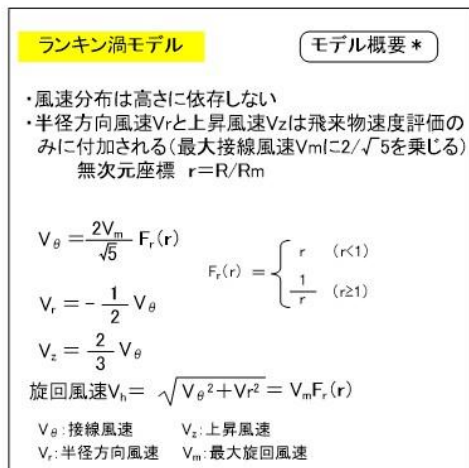


気象庁HPに次のように記載されている。
 「竜巻」とは、発達した積乱雲又は積雲に伴って発生する上下方向の回転軸を持つ激しい渦巻きで、しばしば漏斗状または柱状の雲を伴う。竜巻の中心では周囲より気圧が低いため、地面の近くでは、空気は渦の中心に向かうように狭い範囲に吹き込み、回転しながら急速に上昇し、積乱雲等と共に移動する。

竜巻のイメージ図
 (出典：気象庁HPより)

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
 2014年9月9日日本保全学会原子力規制関連事項検討会

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」の風況イメージを以下に示す。



- ・地面からも吹出しが発生する。
- ・風速分布は高さに依存せず、全域に上昇風がある。

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
 2014年9月9日日本保全学会原子力規制関連事項検討会

竜巻の風速場モデルとして利用されている「フジタモデル」の風況イメージを以下に示す。

フジタモデル
モデル概要*

実際の竜巻観測記録を元に、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)に分割してモデル化

$V_\theta = F_r(r) F_h(z) V_m$ 接線風速(V_θ)は高さ依存性あり

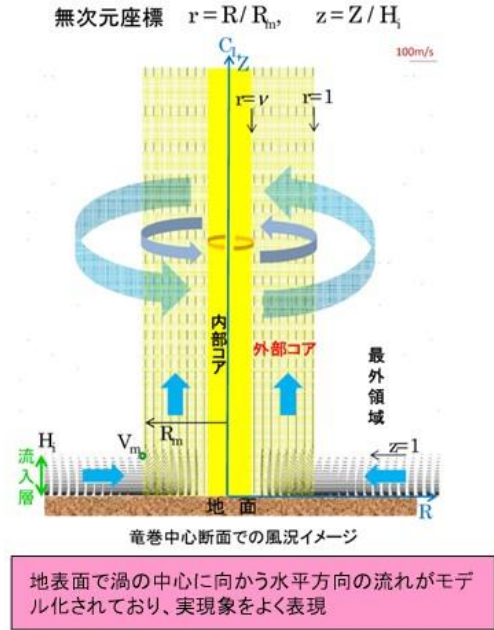
$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ \frac{1}{r} & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{\nu_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1 - \nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B [1 - \exp(-k(z-1))] & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1 - \nu^2} A \left(16 \frac{z}{\nu} - 7 \frac{z^2}{\nu^2} \right) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-K(z-1)) [2 - \exp(-k(z-1))]}{K(1 - \nu^2)} & (z \geq 1) \end{cases}$$

* Fujita, T.T. Workbook of Tornadoes and High Winds for Engineering Applications, U.Chicago, 1978



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
2014年9月9日日本保全学会原子力規制関連事項検討会

竜巻飛来物の現地調査範囲を HTTR 敷地内としている理由について説明すること。

<回答>

調査範囲を設定するに当たり、HTTR 敷地内の竜巻飛来物を抽出して評価した結果、竜巻防護施設の外殻に影響を与える可能性のある物の最大飛散距離は約 170m であった(第 1 表参照)。

その結果を基に、原子炉建家から 170m までの範囲を確認したところ、調査済みの範囲外では第 1 図に示すように森林しか存在しないことから、森林の内側である HTTR 敷地を調査範囲とした。

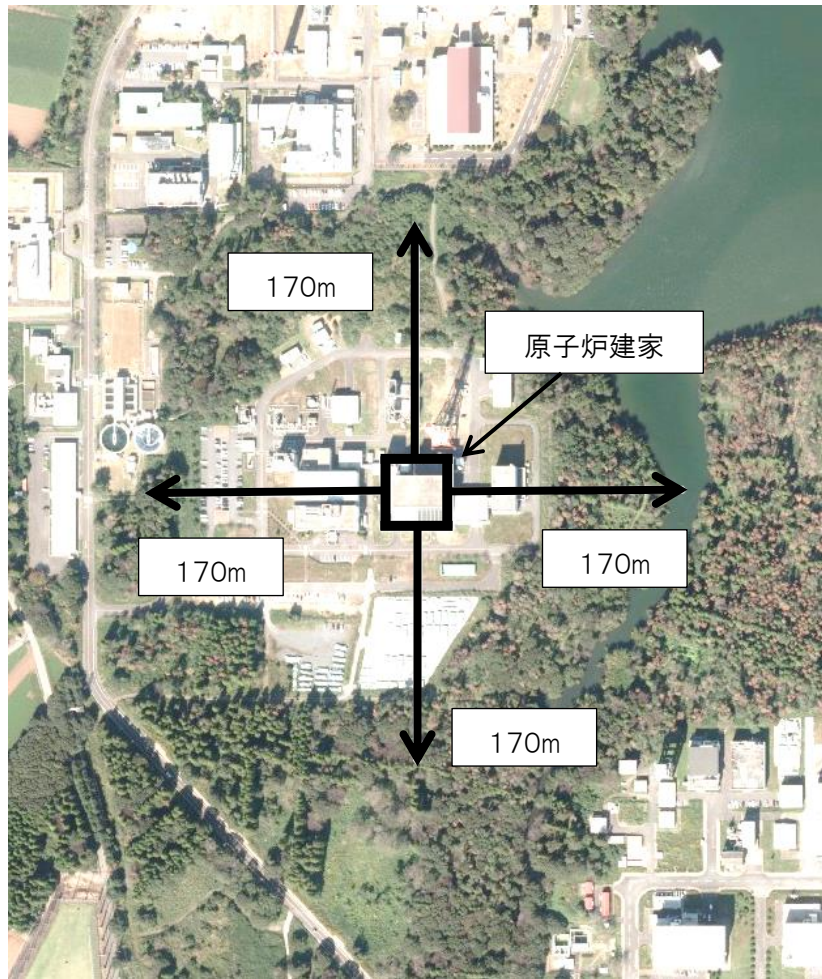
なお、樹木については、F3 時における飛散指標によると、「森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、引き抜かれることもある。」となっていることから、実際に発生した F3 竜巻の竜巻被害調査報告^{※2}を確認したところ、幹の折損及び根の引抜きによる被害の報告がされていた。しかしながら樹木が折損及び引抜かれた後はいずれの場合もその場に留まっており、さらに竜巻により巻き上げられることはないため飛来物とは設定していない。

第 1 表 主な竜巻飛来物の飛散距離

名称		飛散距離[m] ^{※1}
車両	普通車	148
	軽自動車	165
鋼製材(設計飛来物)		168

※1 フジタモデルによる評価

※2 参考文献：「平成 24 年 5 月 6 日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) (URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0703pdf/ks070306.pdf>)



出典：国土地理院（資料を加工して作成）

第1図 HTTR 周辺の状況

竜巻情報を確認してからの車両の避難の考え方について説明すること。

<回答>

原子炉運転中における原子炉運転員の車両については、竜巻による飛来の影響を考慮しなくても良いように、第 2 表に示す飛散距離を考慮し、車両をあらかじめ HTTR 敷地範囲外の場所に駐車することとする。

また、原子炉運転員以外の車両については、竜巻注意情報等が発令された後、気象状況の確認により、原子炉施設へ迫ってくる竜巻と判断した場合には、一斉放送等の指示により、車両を HTTR 敷地範囲外の場所へ避難させる。(第 2 図参照)

なお、竜巻注意情報等が発令した場合の対応は以下のとおりとする。

①注意喚起

防災情報の配信サービス等により、竜巻の発生が予想される注意報などが発令された場合、気象庁のホームページ等を確認して、その旨を施設全体に注意喚起する。

②竜巻準備

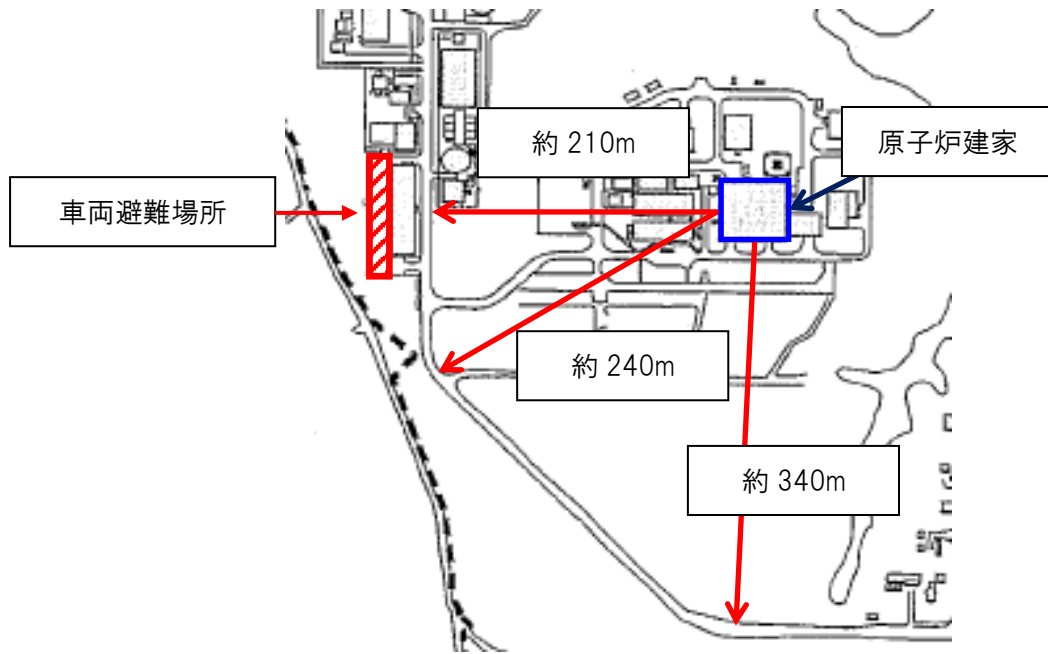
注意喚起後は、随時インターネット等による竜巻情報や屋外の周辺空の気象状況の目視確認を行い、竜巻が迫ってくると判断した場合に、施設全体に竜巻準備を指示し、車両を退避させる。

なお、竜巻発生時の具体的な判断基準及び対応については、大洗研究開発センターで検討した上で報告する。

第 2 表 車両の飛散距離

名称	飛散距離[m] ^{※3}
普通車	148
軽自動車	165

※3 フジタモデルによる評価



第 2 図 車両避難場所

平成 27 年 12 月 18 日審査会合におけるコメント

設計竜巻荷重と設計基準事故時荷重との組み合わせについて説明すること。

<回答>

重要安全施設は原子炉建家内に全て設置されており、設計竜巻に対して原子炉建家が外殻となることから当該重要安全施設は防護され、設計竜巻の影響を直接受けることはない。

設計竜巻は、発生頻度が 10^{-6} /年であり、発生頻度が 10^{-4} /年^{※4}である設計基準事故との同時発生を考慮しない。

また、原子炉建家内の機器に起因した設計基準事故が発生した場合は、原子炉保護設備により原子炉は自動停止し、設計基準事故は短時間で安全に終止するため、その後の設計竜巻との重畳を考慮する必要はない。なお、1次冷却設備二重管破断事故等のバウンダリの破損を伴う事故については、事象収束までの継続時間が長い、発生確率が 10^{-8} /年と非常に低く、設計竜巻との重畳は考慮しない。

設計竜巻によって影響を及ぼす恐れのある原子炉建家外の安全施設には、加圧水冷却設備、補助冷却設備、補機冷却水設備、商用電源があり、それぞれの設備が損傷した場合、以下が想定される。

- ・加圧水冷却設備が損傷した場合は「1次冷却材加圧水差圧高」警報により原子炉は自動スクラムし、補助冷却設備による崩壊熱除去が行われる。
- ・商用電源が損傷した場合は「中間熱交換器1次冷却材流量低」警報により原子炉は自動スクラムし、補助冷却設備による崩壊熱除去が行われる。
- ・補助冷却設備が損傷した場合は原子炉を通常停止する。
- ・補機冷却水設備が損傷した場合は「中間熱交換器1次冷却材流量低」警報により、原子炉は自動スクラムし、自然冷却による崩壊熱除去が行われる。

なお、原子炉建家内の非常用発電機は外気と直接繋がった場所に設置されており、竜巻の襲来により損傷する可能性があるが、損傷によって原子炉は自動スクラムしない。そのため、非常用発電機の復旧ができない場合は、原子炉を速やかに停止する。

以上のことから、原子炉建家外に設置している設備が損傷し、機能を喪失した場合は、自動スクラム、又は通常停止を行う事ができ、崩壊熱を除去することができる。また、原子炉への影響評価は、事象ごとの異常な過渡変化時の評価、若しくは設計基準事故時の評価に包絡される。また、これらの原子炉建家外の安全施設は、全て耐震クラスがBクラス以下であることから、Ss地震時に全て破損し、原子炉に外乱が入ることが想定される。そのため、原子炉建家外の安全施設全てが損傷した場合に、建家内の設備に発生する荷重についての評価は、当該安全施設全ての破損が想定される地震による評価に包絡される。従って、設計竜巻荷重と設計基準事故時荷重とを組合わせた評価を実施する必要はない。

※4 出典：発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策規制の基本的考え方について（平成 24 年 8 月 27 日 原子力安全・保安院）

竜巻飛来物の飛散防止対策を説明すること。

<回答>

飛来物調査では飛散防止対策を考慮するものとして、大サイズで柔な飛来物に分類される以下の表に示すものがある。(第 3 表参照)

なお、プレハブ小屋、事務所及びテントについて竜巻被害調査報告^{※6}によると、作業事務所として使用されていた仮設建築物(軽量鉄骨造)の上部構造とみられる構造部材が分解されて飛散した状況が報告されている。

この事から、藤田スケール F3 時における被害状況として、HTTR に存在するプレハブ小屋、事務所及びテントについても同様に分解されて飛散すると考えられるため、竜巻飛来物の飛散防止対策としては、鋼製材の評価に包絡する。

また、藤田スケールについては、竜巻やダウンバーストなどの突風により発生した被害の状況から風速を大まかに推定するために考案されたものであり^{※7}、飛来物評価モデルによる違いはないと考えられる。

第 3 表 竜巻飛来物の飛散防止対策

名称	飛散防止対策
プレハブ小屋	分解されて飛散 ^{※5} するため鋼製材の評価に包絡
事務所	分解されて飛散 ^{※5} するため鋼製材の評価に包絡
自動販売機	撤去又は移設
電気温水器	アンカー固定(既設)
小型発電機	アンカー固定(既設)
車両	退避
テント	分解されて飛散 ^{※5} するため鋼製材の評価に包絡

※5 藤田スケール F3 時における飛散指標より

※6 参考文献：2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告

(URL : <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2006saroma/index.pdf>)

※7 出典：気象庁 HP より

平成 27 年 12 月 18 日審査会合におけるコメント

竜巻随件事象として、危険物タンク以外に化学薬品等を考慮する必要はないか。

<回答>

竜巻随件事象としては、竜巻による飛来物により屋外に設置している機器が損傷し、原子炉建家に火災などの影響を与えることが考えられる。

このため、屋外に設置している危険物タンクを竜巻随件事象の対象として選定している。HTTR では屋外には化学薬品を貯蔵したタンクは設置していないことから、竜巻随件事象による化学薬品の影響は考慮する必要はない。

ガイドの値を使っている部分とフジタモデルを使っている部分を明確にして説明すること。

<回答>

竜巻評価モデルについては、地上にある物体の挙動評価がより現実的に解析することが可能なフジタモデル*1により行うが、設計竜巻の特性値、設計荷重の設定、設計荷重に対する構造計算においては、ガイド記載の値を採用する。(第 1 図参照)。

なお、フジタモデルを使用した具体的な部分は以下のとおり。

- (1)飛来物の飛散解析をフジタモデルで評価している。車両については、算出した飛散距離をもとに退避距離を考慮しており、最も飛散する軽自動車の結果である約 160m に余裕を持たせた 200m を車両の退避距離とする方向で検討を進めている*2。
- (2)設計飛来物の設定に関しては、現地調査により確認された飛来物の物性値から求めた運動エネルギーと空力パラメータから、ガイドの値により鋼製材と鋼製パイプを選定したが、フジタモデルで飛散解析*3（速度、距離、高さ及びエネルギー）を実施したところ、鋼製材及び鋼製パイプのエネルギーが小さな値となったことから、設計飛来物の物性値についてはガイドに記載されている値を採用することとした。ただし、飛散高さ及び飛散距離については、ガイドに記載がなかったため、TONBOS*4によりランキン渦モデルで算出した。

*1 米国原子力規制委員会 NRC の要望により、1978 年にシカゴ大学の藤田哲也博士が開発した竜巻風速場の工学モデルで、単一渦型の DBT-77 をいう（以下、「Fujita のモデル」という）。この Fujita のモデルを採用し、電力中央研究所が開発した数値解析コード「TONBOS」により飛来物の飛散解析を行ったもの。(第 148 回審査会合資料 3-1 参考資料 1 参照)。

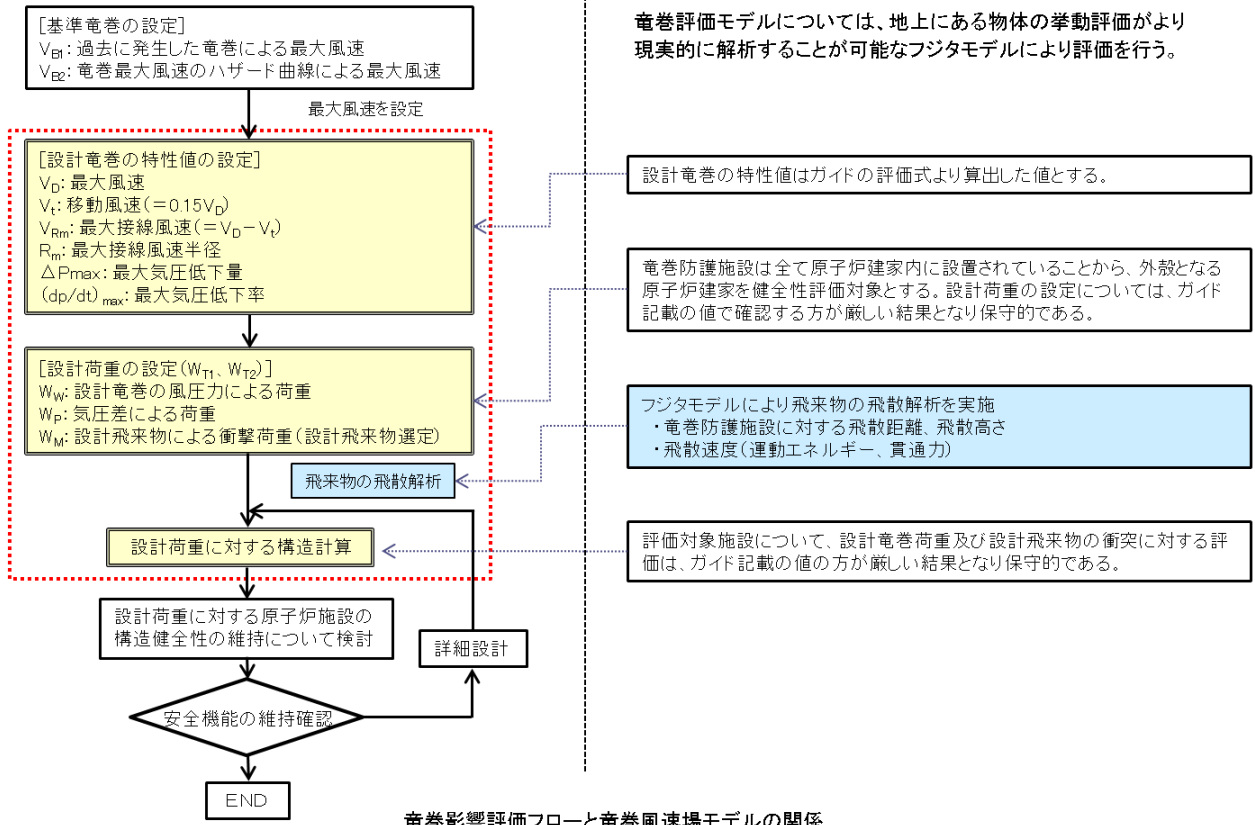
*2 車両退避等については、大洗研究開発センターの竜巻対応要領（作成中）により実施する。

*3 解析条件（設計竜巻風速 100m/s、最大接線風速 85m/s、渦のコア半径 30m、渦の移動速度 15m/s、物体配置 51×51 個、初期設定位置中心の x,y 座標 0,0、飛来物の初期高さ 0m、地上運動なし、飛行定数 $C_D A/m$: 鋼製材 0.006453m²/kg、鋼製パイプ 0.005696 m²/kg)

*4 電力中央研究所が、地上物体を対象とした現実的な竜巻飛来物評価法を提案し、飛来物速度や飛散距離を評価するために開発した数値解析コード。

〈竜巻影響評価フロー〉

〈竜巻風速場モデルとの関係〉



第 1 図 竜巻影響評価フローと竜巻風速場モデルの関係

評価対象施設の貫通、裏面剥離の評価結果について、どの程度の保守性があるか説明すること。

<回答>

飛来物の飛散解析をフジタモデルで評価した結果、設計飛来物である鋼製材が原子炉建家の上層まで到達することはないが、貫通・裏面剥離評価においては、原子炉建家の全ての位置に到達するものとして、ガイドの風速で衝突させた結果である。

外壁厚さは貫通を生じないための必要厚さを十分に上回っているため、飛来物は貫通しないが、裏面剥離の必要最小厚さに対して外壁厚さが一部下回っている部分については、当該区画が裏面剥離しても、以下の理由により、原子炉冷却材圧力バウンダリ等の竜巻防護施設に影響はない。(第 3 図及び第 4 図参照)

- (1)原子炉建家外壁 (EL52.3～53.6m 及び EL53.6～60.7m) のオペレーションフロア (N-409) 及び原子炉建家屋根スラブ (最上部)

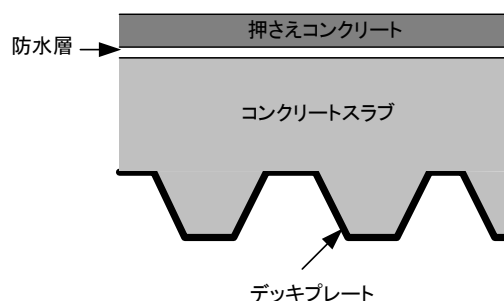
オペレーションフロアには、竜巻防護施設を内包する原子炉格納容器、使用済燃料貯蔵プール等が設置されているが、仮にコンクリート片が落下してもその範囲は限定的であり、鋼製の原子炉格納容器燃料交換ハッチ蓋厚さ (44.5mm)、及び使用済燃料貯蔵プール貯蔵ラック遮へいプラグの蓋板厚さ を有していることから、裏面剥離による影響はないと考えられる。

また、原子炉建家屋根スラブ (最上部) にはデッキプレート (鋼板) が施工されていることから、裏面剥離によりコンクリート片は飛散しない*5 (第 2 図参照)。

- (2)原子炉建家東側外壁 (EL44.7～50.7m) 及び原子炉建家屋根 H-501

当該区画には竜巻防護施設はない。なお、換気空調設備が設置されているが、防護対象設備ではない。

*5「飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法」平成 3 年 7 月 財団法人電力中央研究所：伊藤他 に、デッキプレートが剥離物の飛散防止に有効であることの記載がある。



第 2 図 HTTR 原子炉建家の屋根構造 (最上部)

核物質防護情報が含まれているため非公開

竜巻影響評価の保守性について、具体的な数値を示して説明すること。

<回答>

➤設計風速

設計風速を 100m/s で評価した場合、92m/s での評価と比較し風速で約 8% ($100/92=1.087$)、鋼製材の飛散距離で 19% ($263/220=1.19$)、鋼製材の衝撃荷重で 28% ($1755/1371=1.28$) の裕度がある。(ランキン渦モデルで評価)

➤物体の浮上

揚力係数に代わり抗力係数と見附面積の積の平均値を採用することで 20% ($12.0/9.5=1.2$) の裕度がある。(第 148 回審査会合資料 3-1 表参-10 参照)

➤物体の初期配置

ガイドの値で算出した場合、物体を多点数配置することで、1 点配置に比べ、飛散速度等は大きくなることから保守性がある。(第 1 表参照。車両はフジタモデル、鋼製材はランキン渦モデルで評価)

また、多点数配置の飛散速度等は、1 点配置とした場所においても、ほぼ同様の値であることから、同じ評価条件のもとでは多点数配置は 1 点配置と比較して十分な保守性がある。

第 1 表 車両及び鋼製材の初期配置による比較

評価対象	飛散速度(m/s)	飛散高さ(m)	飛散距離(m)	衝撃荷重(KN)
車両 (軽自動車)	600% (51/8.5=6)	770% (7.7/1.0=7.7)	2200% (156/7=22.2)	3650% (1680/46=36.5)
鋼製材	390% (49/12.5=3.9)	2900% (29/1.0=29)	1870% (263/14=18.7)	1540% (1607/104=15.4)

(表中のカッコ内は、多点数配置/1 点配置の値)

評価条件

竜巻の最大風速： 100m/s

竜巻の移動速度： 15m/s

竜巻コア半径： 30m

1 点配置： 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置として、竜巻進行方向の竜巻半径の位置での値(米国 NRC ガイドに記載されている方法を参考とした。)

多点数配置： 竜巻半径の 4 倍の正形状に 51×51 個 (2601 個) を等間隔に配置し、その中の最大値を採用。

竜巻は物体の真上で瞬時に発生する。

➤車両の退避距離

フジタモデルにより算出した飛散距離に対し 25% ($200/160=1.25$) の裕度を持たせてある。(フジタモデルで評価)

➤評価対象施設の構造健全性

風荷重、気圧差荷重及び衝撃荷重評価はガイド値を使用して評価を行っており、保守性を有していると考えている。

なお、設工認で認可された設計用地震力(参考値)及び保有水平耐力は、設計竜巻荷重に対し、以下のような裕度がある。(第2表参照)

第2表 原子炉建家の構造健全性の裕度

評価対象	NS 方向 (EL50.7~60.7m)	EW 方向 (EL50.7~60.7m)
設計用地震力 (参考値)	200% ($14906/7120=2.09$)	300% ($14219/4725=3.00$)
保有水平耐力 (KN)	800% ($56976/7120=8.00$)	2300% ($110226/4725=23.32$)

(表中のカッコ内は、設計用地震力又は保有水平耐力/設計竜巻荷重の値)

➤評価対象施設の設計飛来物に対する健全性評価

設計飛来物が全ての位置に到達するものとして貫通、裏面剥離評価を行っている。

また、ランキン渦モデルによる評価対象施設への車両の衝突評価において、原子炉建家外壁の厚さが、車両の貫通に対する必要最小厚さを十分に上回っているが、一部に裏面剥離が発生する。但し、裏面剥離しても当該区画には竜巻防護施設はなく、原子炉建家内の竜巻防護施設に影響のないことを確認した。(添付資料)

以上より、竜巻影響評価においては十分な裕度があると考えている。

なお、後段規制において、ランキン渦モデルにおける代表飛来物の評価を行う。

さらに、佐呂間竜巻の自動車飛散事例解析結果及び米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例においては、フジタモデルでの解析結果が過少な結果となったが、実際の飛散状況により近い結果であり、地表面における評価ではランキン渦モデルの結果と比較すれば現実的であること、また、評価全体における保守性を有していることから、本評価では過少評価とならないと考えている。

また、日本版改良藤田スケール (JFE スケール) を採用した評価については、現時点では実施しない。なお、竜巻突風データベースは 2012 年 6 月までのデータを用いて評価しているが、2012 年 7 月以降のデータで評価しても、最大風速 V_B (92m/s) は変わらないことを確認している。

<添付資料>

車両が原子炉建家に衝突した場合の影響について

車両の飛散解析においては、ランキン渦モデルを採用している米国 NRC Reg.Guide1.76 において、飛散物（自動車）が 9.1m（30feet）以下に影響を及ぼすとしていることを参照し、車両の衝突高さを 10m 以下として評価を行った。

車両の飛散解析結果から、ランキン渦モデルでは飛散高さ、飛散距離がフジタモデルによる評価結果と比較し、保守的な結果となる（添付第 1 表）。

フジタモデルによる飛散解析結果から、車両は保守的に 200m 以上退避させる方向で検討を進めていることから、原子炉建家に衝突することはない。なお、車両が衝突したとして評価した場合、飛散高さは約 5.9m であり、衝突範囲の外壁の厚さは車両の貫通に対する必要最小厚さを十分に上回っており、裏面剥離も発生しない（添付第 2 表）。

ランキン渦モデルで車両が衝突したとして評価した場合、外壁の厚さは車両の貫通に対する必要最小厚さを十分に上回っており、原子炉建家内の竜巻防護施設に影響のないことを確認した（添付第 3 表）。

EL44.7～50.7m（地上 2 階：約 8～14m）の区画において裏面剥離が発生する結果となったが、当該区画に竜巻防護施設はない。なお、換気空調設備が設置されているが防護対象施設ではない。

核物質防護情報が含まれているため非公開

核物質防護情報が含まれているため非公開

竜巻防護対策で考慮している防護措置について説明すること。

<回答>

竜巻飛来物の調査結果及び飛散速度等算定結果から、飛散して衝突した場合に、衝撃力が大きいと考えられる大サイズで柔な飛来物に分類されるものについて竜巻防護対策を実施することとし、車両については影響のない距離への退避、自動販売機は撤去又は移設、電気温水器と小型発電機はアンカー固定（既設）、プレハブ小屋、事務所及びテントについては、分解されて飛散するため鋼製材の評価に包絡するものとした。

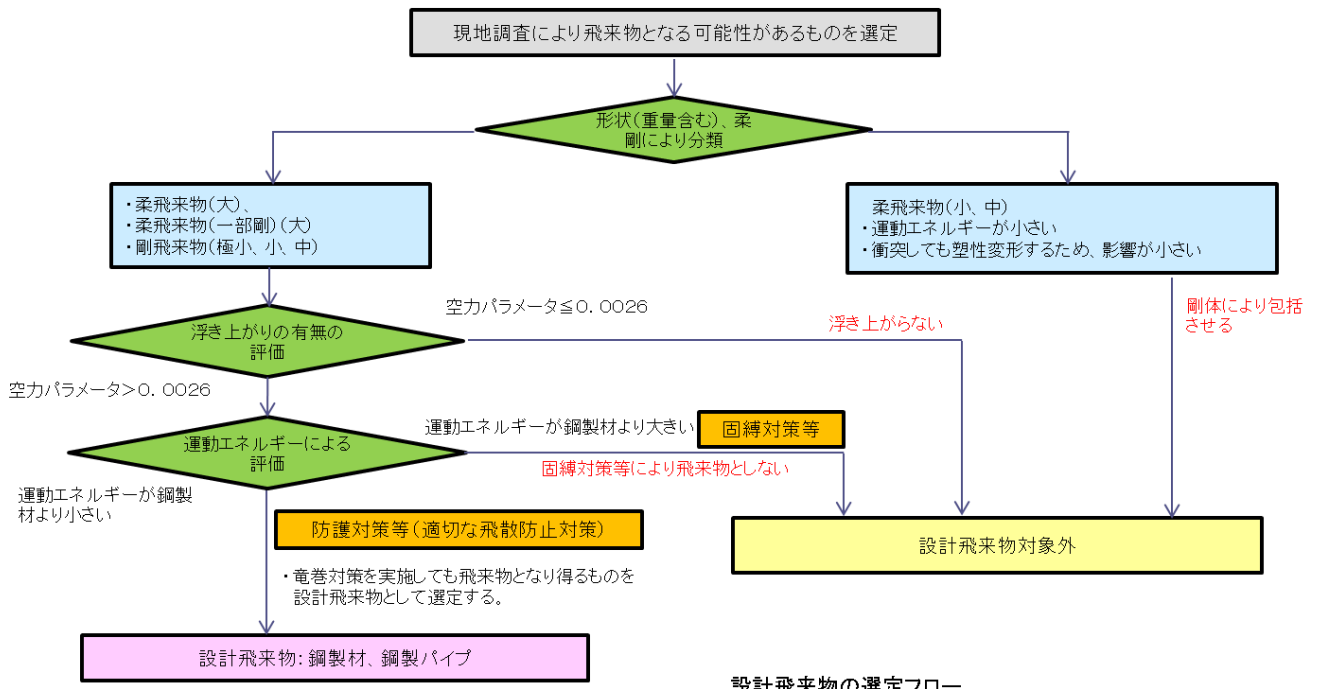
ランキン渦モデルで評価した場合、剛飛来物のうち敷鉄板が、鋼製材より運動エネルギーが大きいことから撤去する。その他の剛飛来物は、鋼製材より運動エネルギーが小さいため、鋼製材に包絡されると考えている。（第 5 図参照）

竜巻の性状及び飛来物の飛散方向には不確定性があることから、飛来物は配置場所から直線的に飛来してくることを前提条件としているが、HTTR の飛来物の殆どが原子炉建家等の建物に近接していることを考慮すると、原子炉建家に直接影響を与えるとは考えにくい。（第 148 回審査会合資料 3-1 P14-P15 参照）

衝突評価においては、設計飛来物の衝突する方向を、評価対象施設に対し垂直に衝突することとして、安全側の設計となるように評価を行う方針であり、詳細設計において結果を提示する。

なお、竜巻防護対策状況及び新規飛来物の有無等については定期的に飛来物調査により確認する。

以上より、竜巻防護対策は、飛来物の飛散解析結果と実際の配置状況を考慮して実施することが合理的であると考えている。



設計飛来物の選定フロー

第5図 設計飛来物の選定フロー（第87回審査会合資料2-1 P23参照）

竜巻防護設備に対して想定している竜巻飛来物（鋼材）の代表性や防護対象設備が建家外壁で防護できない場合の具体的な防護対策を説明すること。

＜回答1（想定している竜巻飛来物（鋼材）の代表性）＞

「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。）に設計飛来物の選定の基本的な考え方として以下の内容が記載されている。

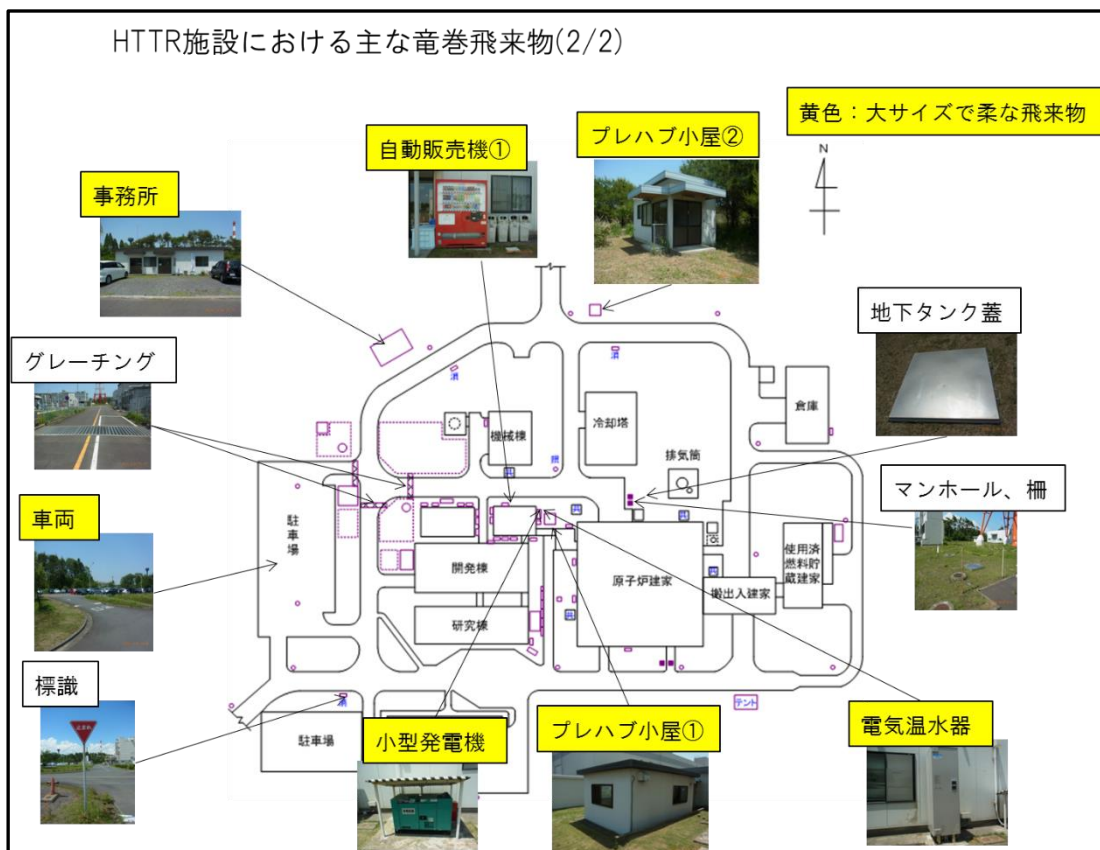
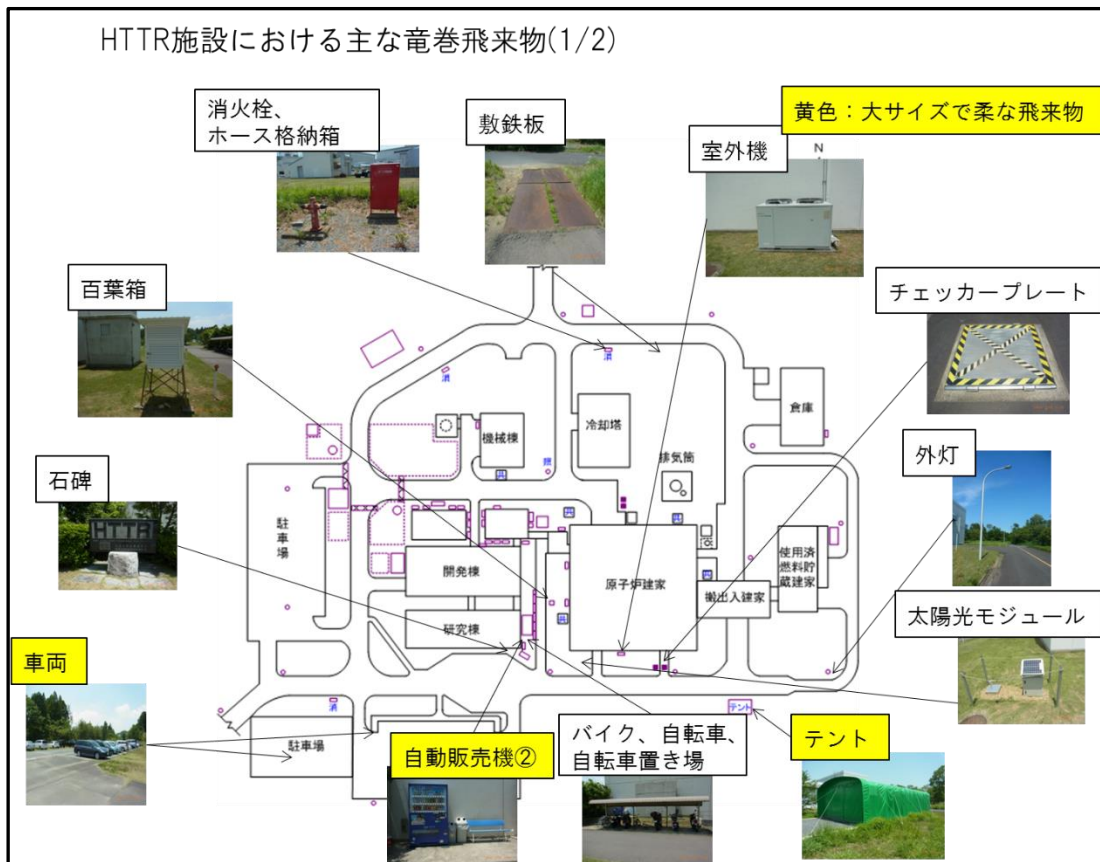
- (1) 設計対象施設に到達する可能性がある飛来物を検討する範囲は、原子力発電所の敷地内を原則とすること。
- (2) 選定する設計飛来物は以下の項目を満たすこと。
 - ①大きな運動エネルギーを持つ飛来物（自動車等）
 - ②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物（鉄骨部材等）
 - ④ 開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物（砂利等）

(1) については、HTTR 敷地内の飛来物に係る現地調査（プラントウォークダウン）を行い、評価対象施設に影響を与える可能性があるものを抽出している。なお、原子力規制庁による視察は平成 30 年 7 月に行われた（参考資料）。(2) については、(1) で抽出した飛来物のうち、剛性が高く、かつ、飛散時の運動エネルギーが大きい鋼製材及び鋼製パイプを設計飛来物として選定した。（選定方法は平成 27 年 12 月 18 日審査会合資料（121 ページ）参照）。

ここで、設計飛来物の形状は、竜巻ガイドにて設計飛来物の設定例として記載されている鋼製材及び鋼製パイプの形状とし、飛散時の運動エネルギーが設計飛来物を超える飛来物については離隔、撤去等の対策を行うこととしている。なお、設計飛来物の選定に当たり、(2) ①～③の飛散については、以下のように考慮している。

- ①については、離隔、撤去、固縛、固定による対策を行う。また、分解されて飛散するものは鋼製材に包絡される。
- ②については、飛散時の運動エネルギーの最も大きな飛来物が鋼製材であり、鋼製材及び鋼製パイプを設計飛来物として選定している。
- ③については、砂利等が通過することができるシャッター等の開口部は鋼製材が貫通するものとして評価しているため、鋼製材の評価に包絡される。

以上より、竜巻ガイドの記載を参考に鋼製材及び鋼製パイプを代表飛来物として選定している。



<回答2（防護対象設備が建家外壁で防護できない場合の具体的な防護対策）>

竜巻防護施設の外殻となる施設の外壁の厚さは、設計飛来物の貫通を生じないための必要な厚さを有しており、設計飛来物が貫通することはない。しかし、外壁の一部に裏面剥離が生じる箇所がある。（図1参照）そのような場合でも竜巻防護施設に影響のないことを以下のように確認している。

- （1）原子炉建家1Fの燃料取扱フロアでは、壁面から発生した裏面剥離コンクリートが使用済燃料貯蔵プール、貯蔵ラック及び竜巻防護施設を内包する原子炉格納容器に衝突する可能性があるが、以下により竜巻防護施設は防護される。
 - ①使用済燃料貯蔵プール及び貯蔵ラックは、使用済燃料貯蔵プールの貯蔵ラック遮へいプラグの蓋板により防護される。
 - ②原子炉格納容器は燃料交換ハッチ蓋により防護される。

- （2）使用済燃料貯蔵建家の1Fでは、壁面から発生した裏面剥離コンクリートが使用済燃料貯蔵セル及び貯蔵ラックに衝突する可能性があるが、使用済燃料貯蔵セルの貯蔵ラック遮へいプラグの蓋板により防護される。

このことから、建家の外壁で裏面剥離を防護できない場合の防護対策は必要無い。

なお、竜巻防護施設の外殻となる施設の開口部に対する飛来物の貫通については、原子炉建家については貫通先の区画に竜巻防護施設が無いことから影響は無い。また、使用済燃料貯蔵建家については、開口部を貫通した飛来物が使用済燃料貯蔵セル及び貯蔵ラックに衝突する可能性があるが、使用済燃料貯蔵セルの貯蔵ラック遮へいプラグの蓋板により防護されるため、影響は無い。

核物質防護情報が含まれているため非公開

図1 裏面剥離コンクリートが衝突する可能性のある竜巻防護施設

竜巻や火山による外部事象に対して、その発生を検知事前に原子炉を停止することとしているが、原子炉の停止手段、及び停止後の監視の手段について具体的に説明すること。

1. 火山及び竜巻に対する防護の基本的考え方について

HTTRでは、平成29年4月18日の審査会合において、外部からの衝撃による損傷の防止に関する基本的考え方として、試験研究炉であるHTTRは、実用炉と比較して潜在的リスク（エネルギー、インベントリ、崩壊熱）、事故発生時の潜在的な影響の度合いに極めて大きな違いがあり、HTTRの固有の安全特性と相まったグレーデッドアプローチを適用し、第6条の要求事項に適合するための考え方を示した。

発生頻度が極めて稀と考えられる火山及び竜巻に対しては、設備と運用による対策を組み合わせ、安全確保上重要な原子炉の「停止」、「冷却」、「閉じ込め」及び「使用済燃料冷却」機能を損なわない設計とする。このため、火山や竜巻に対して防護する安全機能として、HTTRの固有の安全性を考慮した、①原子炉の緊急停止機能、②放射性物質の閉じ込め機能（原子炉冷却材圧力バウンダリ及び周辺公衆に過度の被ばくを与える可能性のある系統）、③それらに必要な監視機能、及び④使用済燃料の貯蔵機能を抽出した上で、これらの安全機能を有する安全施設を防護対象施設として、影響評価を行い、安全機能を損なわないよう設計する。

火山及び竜巻に対しては、原子炉施設に影響が及ぶ前に原子炉の停止操作を講じるとともに、停止後の状態及び使用済燃料冷却の状態を監視する。監視するために必要な電源は、火山防護施設である直流電源設備の蓄電池から供給する設計とし、さらに蓄電池の枯渇後（60分以降）は、可搬型計器、可搬型発電機等を用いて、必要な監視を商用電源が復旧するまでの間継続して行う措置を講じる。

防護対象施設以外の安全施設は、火山や竜巻による損傷を受けたとしても原子炉は安全に停止・維持でき、また放射性物質の閉じ込め及び使用済燃料の貯蔵は確保できることから、火山や竜巻による影響を評価する対象とせず、損傷した場合には代替措置や修復する等の対応により必要な機能を確保する。可搬型発電機の保管場所を図2に示す。

次項に竜巻発生時における原子炉の事前停止及びその後の対応措置について述べる。

2. 竜巻に対する対応

竜巻に対する対応フローを図3に示す。

(1) 大洗研究所の対応

① 竜巻情報の確認

大洗研究所では、竜巻注意情報^{※1}を受信することにより情報を入手するとともに、茨城県内に竜巻注意情報が発表された場合は、気象庁のホームページにより監視を強化することとしている。

②竜巻対応準備指示及び竜巻対応指示の発令

大洗研究所では、竜巻発生確度ナウキャスト^{※2}の1時間後までの予測図に「竜巻発生確度^{※3}2」が出現して、その移動方向に大洗研究所が含まれる予測を確認した場合に、避難、車両移動等の対応準備が必要と判断した場合は、大洗研究所長は「竜巻対応準備指示」を発令し、大洗研究所内に周知することとしている。

さらに、大洗研究所長は、竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャスト^{※4}の1時間後までの予測図に「竜巻発生確度2」及び「雷活動度^{※5}3以上」が出現し、これらの移動方向に大洗研究所が含まれる予測を確認した場合は、「竜巻対応準備指示」から切り替え「竜巻対応指示」を発令することとしている。また、「竜巻対応指示」を発令した場合には、大洗研究所の現地対策本部を設置し、竜巻情報の進展状況及び各施設対応状況を確認することとしている。

(2) HTTR 原子炉施設の対応

①事前措置

竜巻の発生に備え、事前に以下の措置を実施する。

建家周辺の資機材類について、事前に固縛等の飛散防止対策を実施する。

また、気象情報から、発達した低気圧や大雨などにより竜巻などの激しい突風が予想される場合、「竜巻などの激しい突風に注意」という予報が発表される。その場合、車両等については、事前にHTTR敷地外の範囲(車両の飛散距離約170m以遠の範囲)に駐車する。さらに、竜巻の前兆として確認される、空の変化(急に暗くなる、雷鳴が聞こえる、ひょうが降ってくる等)に注意し、その兆しがあった場合、レーダー・ナウキャストにより監視強化を行う。

②竜巻対応準備指示発令及び竜巻対応指示発令時の対応

竜巻対応準備指示が発令された場合は、屋外作業の実施状況を確認するとともに、避難場所(原子炉建家内等)、車両の移動先等を周知する。

竜巻対応指示が発令された場合、原子炉運転中の時は、手動スクラムにより原子炉の停止操作を行う。屋外作業は禁止させるとともに、原子炉建家内等へ避難させる。また、原子炉運転中又は使用済燃料貯蔵中にある場合は、竜巻による車両の飛来によって原子炉建家等が損傷することを防止するため、HTTR敷地外の範囲(車両の飛散距離約170m以遠の範囲)に車両を移動する。なお、原子炉運転員の車両については、竜巻による飛来の影響を考慮する必要がないよう、予め原子炉建家等に影響を及ぼさない範囲に駐車する措置を講じる。車両の移動先の範囲を図4に示す。

③竜巻により商用電源等が喪失した場合の対応

竜巻により商用電源が喪失し、さらに非常用発電機による電力供給を行わない場合でも、原子炉を停止した後は、HTTR固有の安全特性により、炉心は自然に冷却されるとともに、原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性は維持され、原子炉は安全に停止・維

持が可能である。このため、竜巻による商用電源喪失時等においては、補助冷却設備等への動力源としての電源供給は不要であり、蓄電池からの供給により停止後に必要な監視を継続して行う。また、第42条（全交流動力電源喪失）に係る対応措置を行うことで、蓄電池の枯渇後（60分以降）についても、原子炉停止後に必要な監視を可搬型計器、可搬型発電機等により継続する。蓄電池の枯渇後に必要な監視項目は、以下に示す第42条に係る監視項目と同様であり、可搬型計器、可搬型発電機等による監視体系は蓄電池枯渇前までに構築する。

- 1) 炉心冷却機能及び原子炉冷却材圧力バウンダリの閉じ込め機能の監視
原子炉圧力容器上鑑温度及び補助冷却器出口ヘリウム圧力
- 2) 使用済燃料貯蔵プールの貯蔵機能の監視
使用済燃料貯蔵プール水位

- ※1：「竜巻注意情報」とは、積乱雲の下で発生する竜巻、ダウンバーストなどの激しい突風に対して注意を呼び掛ける情報で、雷注意報を補足する情報として、各地の気象台等が担当地域を対象に発表する情報。
- ※2：「竜巻発生確度ナウキャスト」とは、竜巻の発生確度を10km格子単位で解析し、その1時間後（更新は10分間隔）までの予測を気象庁が行うもの。
- ※3：「竜巻発生確度」とは、気象ドップレーダーなどから「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」を、気象庁が表1のように推定したもの。
- ※4：「雷ナウキャスト」とは、雷の激しさや雷の可能性を1km格子単位で解析し、その1時間後（更新は10分間隔）までの予測を気象庁が行うもの。
- ※5：「雷活動度」とは、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、表2に示す活動度1～4で気象庁が表すもの。

表1 竜巻発生確度ごとの内容

発生確度 2	竜巻などの激しい突風が発生する可能性があり注意が必要である。予測の適中率は7～14%程度*、捕捉率は50～70%程度*である。発生確度2となっている地域に竜巻注意情報が発表される。
発生確度 1	竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある。発生確度1以上の地域では、予測の適中率は1～7%程度*であり発生確度2に比べて低くなるが、捕捉率は80%程度*であり見逃しが少ない。

*：適中率及び捕捉率は平成30年12月時点の値であり、過去30か月の検証により見直される。

表2 雷活動度ごとの雷の状況

活動度	雷の状況	
4	激しい雷	落雷が多数発生している。
3	やや激しい雷	落雷がある。
2	雷あり	雷光が見えたり雷鳴が聞こえる。落雷の可能性が高くなっている。
1	雷可能性あり	現在、雷は発生していないが、今後落雷の可能性はある。

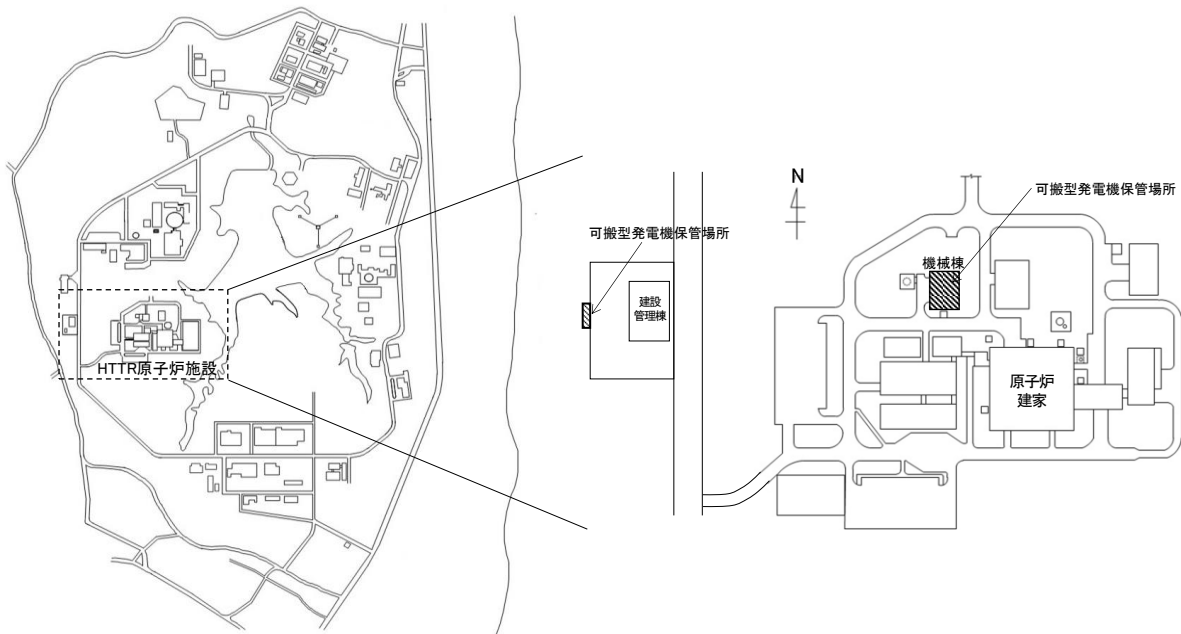


図2 可搬型発電機の保管場所

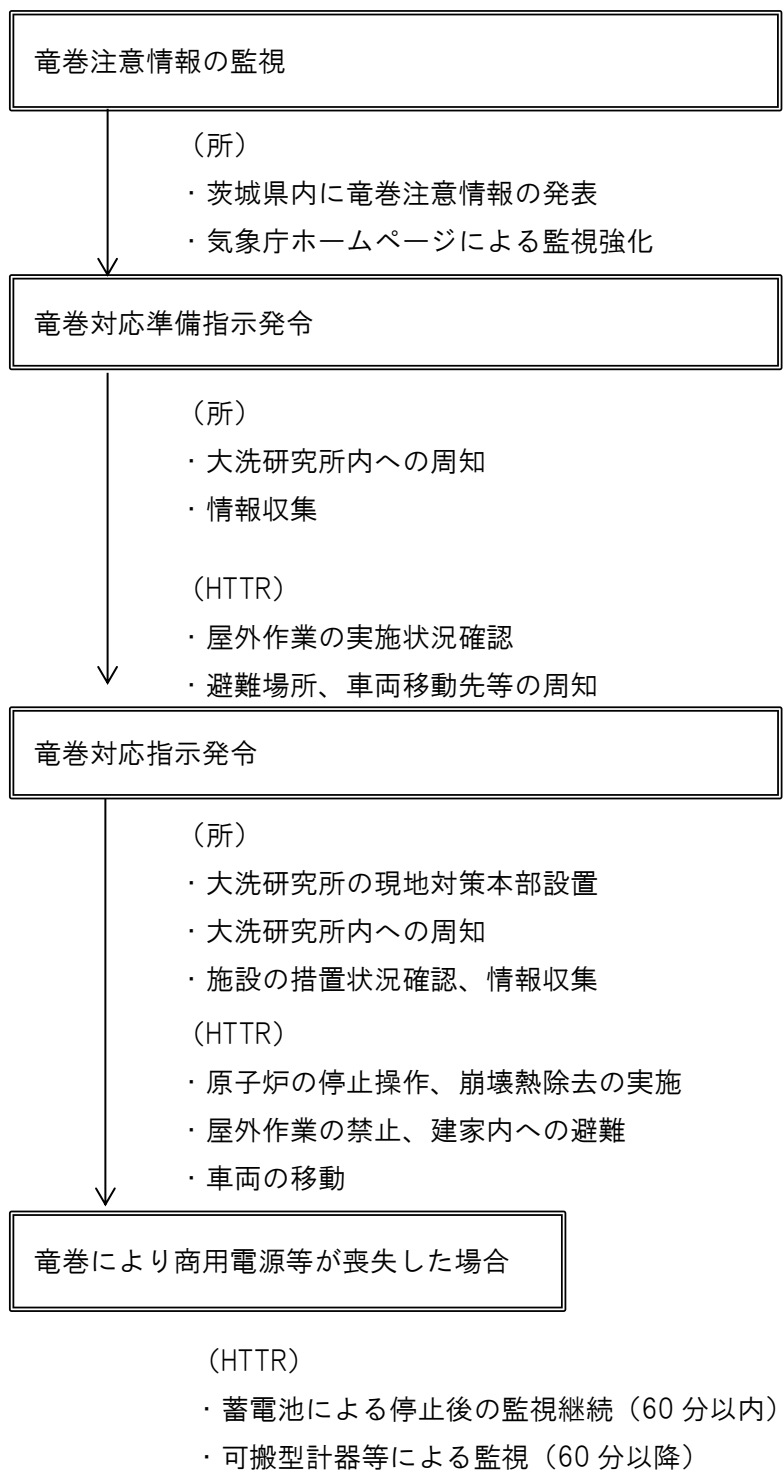


図 3 竜巻に対する対応フロー

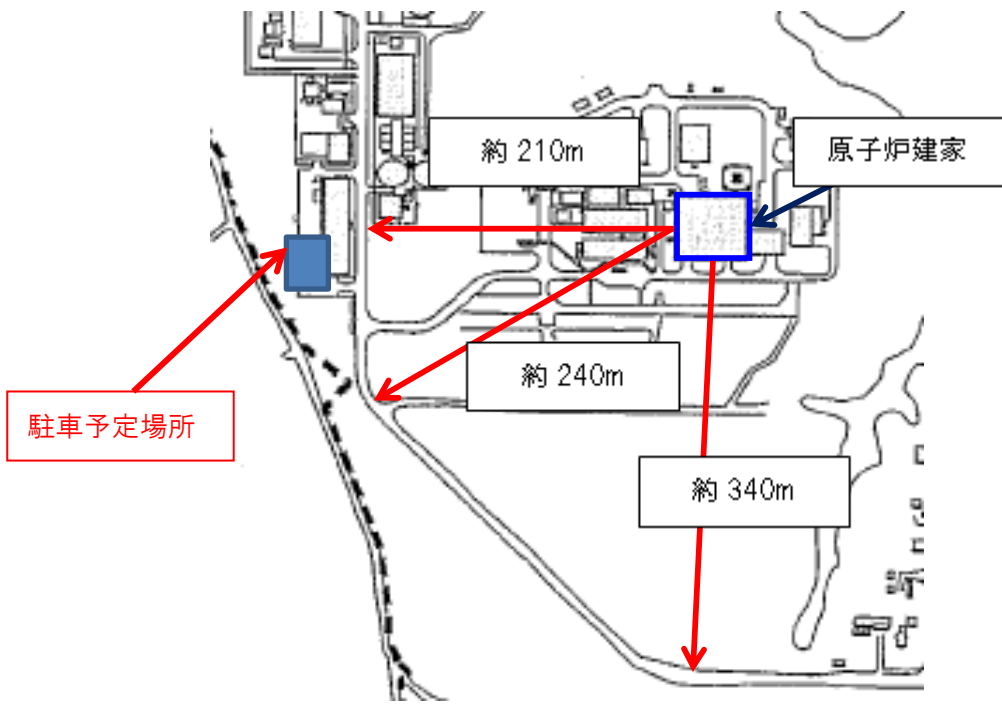


図 4 車両の移動先の範囲

2019年5月22日審査会合コメント

可搬型発電機を用いた監視について、必要な要員、分散している保管場所からの移動、接続箇所、ケーブル敷設ルートを考慮しても蓄電池の枯渇前に電源供給が可能であることを説明すること。また、中性子束の監視が必要であるかを説明すること。

2019年3月26日審査会合コメントのうち、第28条、30条、42条、47条、51条の質問回答資料にて説明する。

コメント事項

可搬電源接続の成立性について、まとめ資料の説明に加えること。(作業要員、タイムチャート、配置、アクセスルート、連続運転可能時間と給油時間、休日・夜間の対応、特定施設運転員の位置づけ)

【回答】

火山及び竜巻の影響によって全交流電源が喪失した場合の対応は、本体施設運転員 5 名及び特定施設運転員 3 名の合計 8 名並びに運転班以外の事故対応要員で対応する。なお、休日・夜間の事故対応要員は、緊急呼び出し装置により参集され、約 1 時間後には対応に加わることが可能である。

表 1 に本体施設運転員と特定施設運転員*のみで対応した場合のタイムテーブル、図 1 に可搬型発電機の運搬ルート概略図、図 2 にケーブルの敷設ルート概略図を示す。下表に示す通り、全交流電源が喪失してから 40 分以内に可搬型の計器等を用いたパラメータ監視の開始が可能である。なお、可搬型発電機は燃料タンク約 15L を有しており 10 時間以上の連続運転が可能であり、適宜給油（給油時間：5 分程度）を行い必要な電力を可搬型の計器等に供給し監視を継続する。

*特定施設運転員：電気設備、換気空調設備、補機冷却水設備等のユーティリティの運転員で、原子炉施設本体の運転は行わない。

表 1 本体施設運転員と特定施設運転員のみで対応した場合のタイムテーブル

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分
可搬型発電機の運搬 (物置→原子炉建家)		特定2名					
ケーブル敷設			特定2名				
ケーブル接続・監視開始				特定1名 本体1名			

※原子炉運転中は、本体施設運転員及び特定施設運転員合計 8 名が 24 時間体制で運転操作・監視を行う。

〔本体：本体施設運転員〕
〔特定：特定施設運転員〕

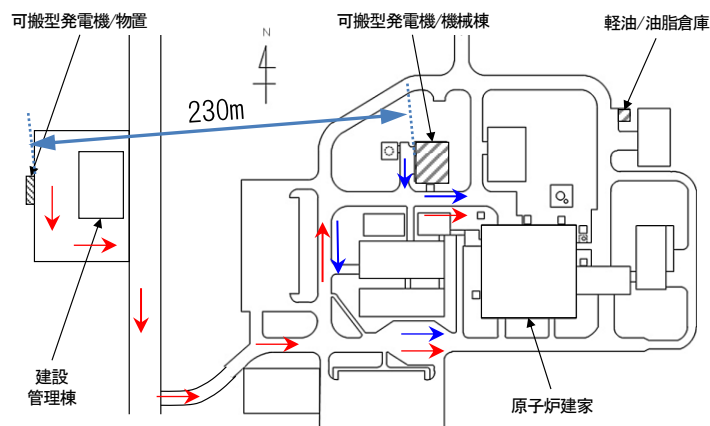


図 1 可搬型発電機の運搬ルート概略図

核物質防護情報が含まれているため非公開

図2 ケーブルの敷設ルート概略図

コメント事項

竜巻対策としている可搬電源の設置場所、接続先について、竜巻飛来物の影響（貫通、裏面剥離）を受けない設計であることを申請書本文に明記するとともに、具体的な説明をまとめ資料に加えること。（竜巻が去った後に可搬電源を設置する場合、竜巻襲来時に保管場所が2箇所とも損壊することはないか。）

可搬型発電機を用いた電源供給について、「3.3 可搬型発電機による電源供給の方法」において、火山事象発生時には、火山灰警戒が発令した時点で可搬設備を搬入するとしているが、竜巻発生時における対応については言及がない。竜巻通過後に搬入するという説明であったので、これを明記すること。

【回答】

可搬型発電機2式は保管場所を分散しており、それぞれの保管場所は設計竜巻の直径(60m)を考慮して離れた(約230m)場所としている。

設計竜巻の通過により、原子炉建家が設計竜巻の影響を受ける場合は、これら分散して保管している可搬型発電機2式が同時に損壊することはない。

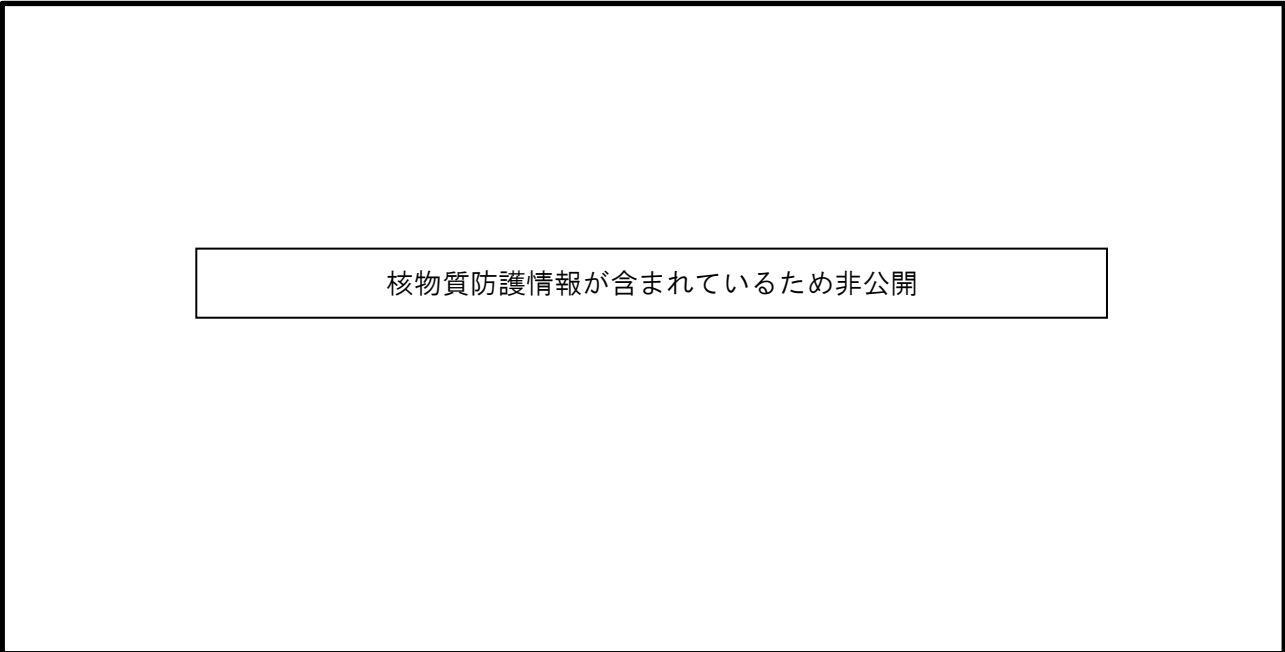
また、竜巻飛来物の影響を考慮し、可搬型発電機の設置場所を原子炉建家内の2箇所とするとともに、可搬型発電機の接続先は竜巻飛来物の影響が及ばない原子炉建家内の地下とする。なお、可搬型発電機の原子炉建家内への設置作業は、作業員の安全確保のため、竜巻の通過後等、竜巻による環境影響が緩和した後に行う。

コメント事項

可搬電源（ディーゼル）の排気はどのように処置しているのか、作業員への悪影響はないのか、まとめ資料で説明すること。

【回答】

可搬型発電機は原子炉建家内に搬入し、屋外との間の扉近傍で使用することとしている。排気ガスは、排気ダクトを用いて屋外に導き排出する。（下図参照）



核物質防護情報が含まれているため非公開

図 可搬型発電機の排気ガス排出のイメージ

コメント事項

可搬電源の燃料は油脂倉庫に保管することになっているが、自然現象からの防護設計をどのようにしているかまとめ資料で説明すること。

【回答】

可搬型発電機の燃料として用いる軽油は、油脂倉庫に7日間連続運転できる量(約250L)を保管する。また、可搬型発電機は燃料タンク約15Lを有しており10時間以上の連続運転が可能である。

万一、油脂倉庫が損壊して同倉庫内の軽油が使用できない場合は、保管時に充填されている燃料が消費される前に、大洗研究所内の他施設から融通する、或いは外部調達する等して必要な燃料を確保する。

コメント事項

可搬型電源を原子炉建家に保管せず、屋外に分散配置とした理由は何か。
(竜巻や地震からの防護の観点からは少なくとも1式は原子炉建家内に置けるはずだが)

【回答】

可搬型発電機は、軽油、潤滑油を内包しているため火災源となる。一方で、火災防護の観点から、なるべく原子炉建家内に火災源となる物を保管しない方針としている。このため、当該可搬型発電機を保管する場所は、原子炉建家内とせず屋外としている。なお、自然現象の影響を考慮して、屋外の2箇所に分散して保管する。