

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

設計基準対象施設について

平成29年1月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

- 4 条 地震による損傷の防止
- 5 条 津波による損傷の防止
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止
- 7 条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止
- 8 条 火災による損傷の防止
- 9 条 溢水による損傷の防止等
- 10 条 誤操作の防止
- 11 条 安全避難通路等
- 12 条 安全施設
- 14 条 全交流動力電源喪失対策設備
- 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 17 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ
- 23 条 計測制御系統施設(第 16 条に含む)
- 24 条 安全保護回路
- 26 条 原子炉制御室等
- 31 条 監視設備
- 33 条 保安電源設備
- 34 条 緊急時対策所
- 35 条 通信連絡設備

本日ご提出資料

第6条：外部からの衝撃による損傷の防止

<目 次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
2. 追加要求事項に対する適合方針
 - 2.1 その他自然現象等
 - 2.1.1 設計基準上考慮すべき事象の抽出及び当該事象に対する設計方針
 - 2.1.1.1 自然現象
 - 2.1.1.2 人為事象
 - 2.1.2 自然現象の組合せ
 - 2.1.3 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対する重要安全施設への考慮
 - 2.2 竜巻
 - 2.2.1 竜巻に対する防護に関して、設計上対処すべき施設を抽出するための方針
 - 2.2.2 発生を想定する竜巻の設定
 - 2.2.2.1 竜巻検討地域の設定
 - 2.2.2.2 基準竜巻の設定
 - 2.2.2.3 設計竜巻の設定
 - 2.2.3 設計荷重の設定
 - 2.2.3.1 設計竜巻荷重
 - (1) 風圧力の設定
 - (2) 気圧差による圧力
 - (3) 飛来物の衝撃荷重
 - (4) 設計竜巻荷重の組合せ
 - 2.2.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重
 - 2.2.4 評価対象施設の設計方針
 - 2.2.4.1 設計方針
 - 2.2.5 竜巻随伴事象に対する評価対象施設の設計方針
 - 2.2.6 参考文献
 - 2.3 火山
 - 2.3.1 火山活動に対する防護に関して、設計対象施設を抽出するための方針
 - 2.3.2 降下火砕物による影響の選定
 - 2.3.3 設計荷重の設定
 - 2.3.4 降下火砕物の直接的影響に対する設計方針
 - 2.3.5 降下火砕物の間接的影響に対する設計方針
 - 2.3.6 参考文献

2.4 外部火災

2.4.1 外部火災に対して、設計上対処すべき施設を抽出するための方針

2.4.2 考慮すべき外部火災

2.4.3 外部火災に対する設計方針

2.4.3.1 森林火災

(1) 発生を想定する発電所敷地外における森林火災の想定及び影響評価

(2) 森林火災に対する設計方針

2.4.3.2 近隣の産業施設の火災・爆発

(1) 近隣の産業施設からの火災及びガス爆発の想定及び影響評価

(2) 想定される近隣の産業施設の火災・爆発に対する設計方針

2.4.3.3 発電所敷地内における航空機墜落等による火災

(1) 発生を想定する発電所敷地内における航空機墜落等による火災の設定及び影響評価

(2) 航空機墜落等による火災に対する設計方針

2.4.3.4 ばい煙及び有毒ガス

3. 外部からの衝撃による損傷の防止

別添 1-1 外部事象の考慮について

別添 2-1 竜巻影響評価について

別添 2-2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

別添 3-1 火山影響評価について

別添 4-1 外部火災影響評価について

4. 運用, 手順能力説明資料

別添 1-2 運用, 手順能力説明資料 (外部事象)

別添 3-2 運用, 手順能力説明資料 (火山)

別添 4-2 運用, 手順能力説明資料 (外部火災)

5. 現場確認のプロセス

別添 4-3 森林火災評価に係る植生確認プロセスについて



: 今回ご説明

柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉
外部事象の考慮について

目次

1. 設計上考慮する外部事象の抽出
 - 1.1 外部事象の収集
 - 1.2 外部事象に対する1次評価
 - 1.2.1 評価基準
 - 1.2.2 1次評価結果
2. 基本方針
3. 地震, 津波以外の自然現象
 - 3.1 設計基準の設定
 - 3.2 個別評価
4. 人為事象 (偶発的)
 - 4.1 個別評価
5. 外部事象に対する安全施設および重大事故等対処設備への影響評価
6. 自然現象/人為事象の重畳について
 - 6.1 検討対象
 - 6.1.1 単一の事象における評価基準の重畳検討への適合性
 - 6.1.2 重畳検討対象の抽出結果
 - 6.2 事象の特性の整理
 - 6.2.1 相関性のある自然現象の特定
 - 6.2.2 影響モードのタイプ分類
 - 6.3 重畳影響分類
 - 6.3.1 分類基本方針
 - 6.3.2 重畳影響分類結果
 - 6.4 個別評価

添付資料

1. 設計上考慮する外部事象の収集・整理
2. 柏崎刈羽原子力発電所における航空機落下確率
3. 防護すべき安全施設および重大事故等対象施設への考慮
4. 設計基準設定において参考とする年超過確率評価について
5. 風（台風）影響評価について
6. 低温影響評価について
7. 降水影響評価について
8. 積雪影響評価について
9. 落雷影響評価について
10. 地滑り影響評価について
11. 生物学的事象影響評価について
12. 有毒ガス影響評価について
13. 船舶の衝突影響評価について
14. 電磁的障害影響評価について
15. 積雪・火山灰堆積状態での地震発生時の影響評価について
16. 避雷鉄塔による遮蔽効果に期待しない場合の落雷影響評価について
17. 重畳の考え方について

1. 設計上考慮する外部事象の抽出

柏崎刈羽原子力発電所の安全を確保する上で設計上考慮すべき外部事象の抽出にあたっては、国内で一般に発生しうる事象に加え、欧米の基準等で示されている事象を用い網羅的に収集し（自然現象 55 事象，人為事象 28 事象）類似性，随伴性から整理を行い，地震，津波を除く 62 事象（自然現象 42 事象，人為事象 20 事象）を抽出した。

その上で，各事象に対し 1 次評価を実施し，その結果および海外文献を参考に策定した評価基準に基づき，より詳細に検討すべき外部事象について 2 次評価を実施した。外部事象に対する影響評価のフロー図を図 1 に示す。

1.1 外部事象の収集

発電用原子炉施設に対して外部から作用する衝撃による損傷を防止するため，自然現象や人為事象に関して，事象を収集する。事象の収集にあたっては，国内外の規制機関や学識経験者による検討結果，PRA にて挙げられた全ての事象を対象とすることで網羅性を確保した。

次に挙げる資料から，国内における規制（資料 a, b）で取り上げている事象や，国外の規制として，米国原子力規制委員会が定めた PRA についてのガイド（資料 c）や IAEA が定めたガイド（資料 d）に取り上げている事象を収集した。

- a. 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則の解釈」(制定 平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306193 号 原子力規制委員会決定)
- b. 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」 (制定 平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306194 号 原子力規制委員会決定)
- c. NUREG/CR-2300 “PRA Procedures Guide”, NRC, January 1983
- d. Specific Safety Guide (SSG-3) “Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants”, IAEA, April 2010

さらに，日本の自然現象における実例（資料 e）や，米国の原子力発電設備の維持基準に引用されている米国機械学会の規格（資料 f），また，関連して，FLEX や大規模損壊事象を取り上げている米国 NEI のガイド（資料 g, h）で取り上げられている事象を収集することによって，網羅性を確保した。

- e. 「日本の自然災害」国会資料編纂会 1998 年
- f. ASME/ANS RA-S-2008 “Standard for Level 1/Large Early Release Frequency probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications”
- g. DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES (FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE (NEI-12-06 August 2012)
- h. B. 5. b Phase 2 & 3 Submittal Guideline (NEI-06-12 December 2006)-2011.5 NRC 公表

以上の a～h の資料より、外部事象 83 事象（自然現象 55 事象，人為事象 28 事象）が収集された。

これらの事象について、類似事象，随件事象について整理し，設計上考慮する外部事象として外部事象 62 事象（自然現象 42 事象，人為事象 20 事象）を抽出した。（表 1，表 2）これらの事象の抽出過程については，添付資料 1 「設計上考慮する外部事象の収集・整理」のとおり。

なお，自然現象 42 事象に挙げていない地震，津波及びその随件事象はそれぞれ「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則」（以下，設置許可基準規則という。）第四条（地震による損傷の防止），第五条（津波による損傷の防止）にて扱うこととし，本資料の対象外とする。

1.2 外部事象に対する 1 次評価

1.2.1 評価基準

外部事象に係る海外での評価手法※を参考に，1 次評価にあたり影響を評価する基準を以下のように設定した。評価にあたっては，サイトに外部事象が有意な影響を与えるかという観点の評価（基準 A，基準 B）に加え，サイトに到達した外部事象が設備にどの程度影響を与えるかという観点の評価（基準 C）を実施する。または，外部事象の影響規模が他の外部事象に包絡される（基準 D）ことを確認している。

基準 A：プラントに影響を与えるほど接近した場所で発生しない。

基準 B：ハザードの進展・襲来が遅く，事前にそのリスクを予知・検知し，ハザードを排除できる。

基準 C：プラント設計上，考慮された事象と比べて，設備等への影響度が同等もしくはそれ以下，または，プラントの安全性が損なわれることがない。

基準 D：影響が他の事象に包絡される。

※評価基準の策定にあたって参照した文献は以下のとおり。

これらの文献は，IAEA 基準や PRA 基準を参考とするために選定した。

－Specific Safety Guide (SSG-3) “Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants”，IAEA, April 2010

－ASME/ANS RA-S-2008 “Standard for Level 1 / Large Early Release Frequency probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications”

1.2.2 1次評価結果

各事象に対する1次評価を実施し、その結果に基づき上記の基準を適用した結果を表3及び表4に示す。

また、1次評価において、影響の程度を確認できないため以下の外部事象は、2次評価としてより詳細な影響評価を行う。

【自然現象】

- ・風（台風）
- ・竜巻
- ・低温（凍結）
- ・降水
- ・積雪
- ・落雷
- ・地滑り
- ・火山
- ・生物学的事象

【人為事象（偶発的）】

- ・火災，爆発（森林火災，近隣工場等の火災・爆発，航空機落下火災等）
- ・有毒ガス
- ・船舶の衝突
- ・電磁的障害
- ・内部溢水*

※内部溢水については、選定結果により、影響の有無，程度の評価を行うべき外部事象であるが、他の条文（第四条（内部溢水））で扱うこととし、本資料の対象外とする。

なお、以下の意図的な人為事象は、故意によるものであるため設計上考慮する外部事象として取り上げないが、「第三者の不法な接近」および「妨害破壊行為（内部脅威含む）」、「サイバーテロ」は、第七条（発電用原子炉施設への不法な侵入等の防止）への対応として扱い、「航空機衝突（意図的）」は「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下，原子炉等規制法という。）」第四十三条三の六 第一項 第三号（重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力）への適合性説明の中で扱うこととし、本資料の対象外とする。

【人為事象（意図的）】

- ・第三者の不法な接近
- ・航空機衝突（意図的）
- ・妨害破壊行為（内部脅威含む）
- ・サイバーテロ

表 1 自然現象

No.	自然現象
1	降水
2	積雪
3	雪崩
4	ひょう, あられ
5	氷嵐, 雨氷, みぞれ
6	氷晶
7	霜, 霜柱
8	結氷板, 流氷, 氷壁
9	風 (台風)
10	竜巻
11	砂嵐
12	霧, 靄
13	高温
14	低温 (凍結)
15	高温水 (海水温高)
16	低温水 (海水温低)
17	極限的な圧力 (高/低)
18	落雷
19	高潮
20	波浪
21	風津波
22	洪水
23	池・河川の水位低下

No.	自然現象
24	河川の迂回
25	干ばつ
26	火山
27	地滑り
28	海水中の地滑り
29	地面隆起 (相対的な水位低下)
30	土地の浸食, カルスト
31	土の伸縮
32	海岸浸食
33	地下水 (多量/枯渇)
34	地下水による浸食
35	森林火災
36	生物学的事象
37	静振 (※1)
38	塩害, 塩雲 (※2)
39	隕石, 衛星の落下
40	太陽フレア, 磁気嵐
41	土石流
42	泥湧出

※1 湖沼水面の定常的振動

※2 主に塩分濃度の高い湖で発生する, 湖面上に浮遊する塩分を多く含んだ雲

表 2 人為事象

No.	人為事象
1	航空機落下
2	ダムの崩壊
3	火災・爆発
4	有毒ガス
5	船舶の衝突
6	電磁的障害
7	パイプライン事故
8	第三者の不法な接近
9	航空機衝突（意図的）
10	妨害破壊行為（内部脅威含む）
11	サイバーテロ
12	産業施設の事故
13	輸送事故
14	軍事活動によるミサイルの飛来
15	サイト内外での掘削
16	内部溢水
17	タービンミサイル
18	重量物輸送
19	化学物質の放出による水質悪化
20	油流出

表 3 自然現象の1次評価結果 (1/5)

No.	自然現象	評価基準	評価結果	評価内容
1	降水	—	2次評価要	柏崎原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
2	積雪	—	2次評価要	柏崎原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
3	雪崩	A	影響なし	超高圧及起動用開閉所以外の建屋に関しては、周辺斜面と十分な離隔距離があるため、影響が及ぶことはない。超高圧及び起動用開閉所の背面には斜面があるが、比較的高い木が茂っているため雪崩は発生しにくく、かつ発生した場合においても、離隔があるため到達しない。
4	ひょう、あられ	D	影響なし	ひょう、あられは柔飛来物であり、衝突影響により安全施設の機能が損なわれる恐れはない。衝突影響については、No.10「竜巻」にて評価実施。
5	氷嵐、雨氷、みぞれ	D	影響なし	雨氷やみぞれに対する堆積（または着氷）荷重の影響については軽微であり、仮に堆積してもNo.2「積雪」やNo.26「火山」に包絡される。給気ルーバの閉塞（空調）の影響については積雪に包絡されると判断。
6	氷晶	D	影響なし	氷晶による堆積荷重の影響については軽微であり、仮に堆積しても No.2「積雪」やNo.26「火山」に包絡される。また、給気ルーバの閉塞（空調）の影響についても No.2「積雪」に包絡されると判断。
7	霜、霜柱	C	影響なし	設備に損傷を与える影響モードはなく、安全施設の機能が損なわれることはないと判断。

表 3 自然現象の1次評価結果 (2/5)

No.	自然現象	評価基準	評価結果	評価内容
8	結氷板, 流氷, 氷壁	A	影響なし	柏崎刈羽原子力発電所周辺での海氷の発生, 流氷の到達した事例はなく, 安全施設への影響はない。 (仮に, 取水設備への影響が考えた場合であっても, カーテン・ウォールにより深層取水の継続が可能と考えられることから, プラントの安全性が損なわれることはない。)
9	風 (台風)	—	2次評価要	柏崎原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
10	竜巻	—	2次評価要	柏崎原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
11	砂嵐	A	影響なし	柏崎刈羽原子力発電所及びその周辺には砂漠が存在せず, 砂嵐が発生した事例はない。したがって, 安全施設への影響はない。 (仮に, 砂嵐の影響を考えた場合であっても, 給気ルーバ及びフィルタにより空調設備への影響は防止可能であることから, 安全施設の機能が損なわれることはないと判断。)
12	霧, 靄	C	影響なし	設備に損傷を与える影響モードはなく, 安全施設の機能が損なわれることはない。
13	高温	B	影響なし	柏崎市の過去最高気温 (37.6℃) や年超過確率 10^{-4} の気温 (38.8℃) を踏まえると, 空調設計条件を超過する可能性はあるものの, 気温は1日の中で高低差があるため超過は一時的であること, 建屋内空調は海水をヒートシンクとして冷却していることから室内の気温上昇の影響は著しくなく安全機能が損なわれることはない。また, 各部屋の温度が長時間にわたり設計室温を上回る恐れがある場合には, 必要に応じてプラントを停止する。 なお, 温暖化による長期的な温度上昇は緩慢であり, 風量調整, 冷却設備の増強等, 室内温度の上昇を抑制する処置を検討・実施する時間余裕がある。
14	低温 (凍結)	—	2次評価要	柏崎刈羽原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
15	高温水 (海水温高)	B	影響なし	設計条件を上回る海水温度高に対し定格出力維持が困難な場合も想定されるが, 温度を監視しており, 出力低下またはプラント停止措置にて十分対応可能であることから, 安全施設の機能が損なわれることはない。
16	低温水 (海水温低)	C	影響なし	取水設備はカーテン・ウォールにより, 年中温度変化が小さい深層取水を行っていることから, 著しい低温水とはならない。また, 取水温度の低下は冷却性能の劣化につながるものではなく, 安全施設の機能が損なわれることはない。

表 3 自然現象の 1 次評価結果 (3/5)

No.	自然現象	評価基準	評価結果	評価内容
17	極限的な圧力 (気圧高/気圧低)	D	影響なし	低気圧、高気圧による気圧の変化については予測可能であり、必要に応じての事前の備えが可能である。一方、同様の影響がある竜巻については、検知から対応までの時間的余裕が少ないことに加え、風荷重や飛来物衝突といったその他の影響も同時に考慮する必要があることから、竜巻の方がプラントへ及ぼす影響が大きいため、気圧差による影響については、No. 10「竜巻」に包絡される。
18	落雷	—	2 次評価要	柏崎刈羽原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
19	高潮	D	影響なし	高潮は、気圧低下による海面の上昇と、向岸風による海水の吹き寄せによる潮位が高くなる現象であるが、更に満潮が重なって潮位が高くなる場合であっても、設計基準津波による影響の方が大きく、包絡される。
20	波浪	D	影響なし	波浪は、風浪（風によってその場所に発生する波）とうねり（他の場所で発生した風浪の伝わり、風が静まったあとに残される波）の混在した現象であるが、設計基準津波による影響の方が大きく、包絡される。
21	風津波	D	影響なし	台風等の強風と波浪により発生する事象であるが、設計基準津波による影響の方が大きく、包絡される。
22	洪水	A	影響なし	柏崎刈羽原子力発電所周辺には氾濫・決壊により、影響を及ぼすような河川・湖等はなく、設計基準事象としての考慮は不要。（図 2 参照） なお、柏崎市洪水ハザードマップの浸水想定区域外であることを確認。（図 3 参照）
23	池・河川の 水位低下	A	影響なし	柏崎刈羽原子力発電所は海水を冷却源としていることから河川等からの取水不可による安全性への影響は無いと判断。また、付近に影響を及ぼすような河川はない。（図 2 参照）
24	河川の迂回	A	影響なし	柏崎刈羽原子力発電所は海水を冷却源としていることから河川等からの取水不可による安全性への影響は無いと判断。また、付近に影響を及ぼすような河川はない。（図 2 参照）
25	干ばつ	A	影響なし	干ばつによる影響として、河川水や水道水の使用不可が想定されるが、柏崎刈羽原子力発電所は海水を冷却源としていることから、安全施設の機能が損なわれることはない。また、淡水は、淡水貯蔵タンクにて保管していることから、保有水が急速に減少することはなく、影響はない。
26	火山	—	2 次評価要	柏崎刈羽原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。

表 3 自然現象の 1 次評価結果 (4/5)

No.	自然現象	評価基準	評価結果	評価内容
27	地滑り	—	2 次評価要	柏崎刈羽原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
28	海水中の地滑り	—	他条文にて評価	港湾内については、海底に地滑りの発生しうる起伏が無いため発生可能性がない。沿岸部の地滑りに伴い発生の可能性のある津波については、第 5 条（津波による損傷の防止）において津波事象として考慮。（本資料の対象外）
29	地面隆起（相対的な水位低下）	D	影響なし	地面隆起は地震に伴う随伴事象であり、第三条（地盤）にて評価する。また、地面隆起に伴い海水面が相対的に下降するが、潮位変化による取水への影響はない。
30	土地の浸食、カルスト	B	影響なし	発電所敷地は河川に面していないため浸食されることはなく、カルスト地形でもない。また、土壌が降水や融雪、風の作用によって地表から流出、飛散することにより荒廃することはあるものの、事象進展の遅さから進展防止可能である。また、安全施設近傍には、コンクリート製の排水路を設置しておりの浸食の影響により安全機能が損なわれることはない。
31	土の伸縮	C	影響なし	発電所敷地での地下水の過剰な汲み上げはなく、影響のある土地の収縮は発生しない。仮に発電所敷地にて地盤の伸縮が発生した場合であっても軽微で、安全上重要な建屋や屋外設備は、岩着や杭基礎であることから影響が及ぶことはない。
32	海岸浸食	B	影響なし	基本的に取水に係る土木構築物はコンクリート製であり浸食はほとんど無く、仮に海底砂の流出等による海底勾配の変化が生じるような場合も、非常に緩やかに進行するものと考えられ保守管理による不具合防止が可能であることから、安全施設の機能が損なわれることはない。
33	地下水（多量/枯渇）	D	影響なし	土壌に地下水が浸透することにより、地滑りや建屋への浸水が考えられるが、地滑りについては、No. 27「地滑り」にて考慮し、浸水については、No. 34「地下水による浸食」にて考慮。なお、地下水を水源とした設備はないことから、枯渇による影響はない。
34	地下水による浸食	C	影響なし	安全上重要な建屋や屋外設備は、岩着や杭基礎であり地下水による土壌浸食の影響が及ぶことは考えにくい。浸水の影響については、安全施設周辺にはサブドレン設備が設置されており地下水位を低く保っていることや、仮に地下水流入を仮定しても検知設備及び排水設備、重要機器室の水密化対策等により安全施設の機能への影響防止可能であることから影響はない。

表 3 自然現象の 1 次評価結果 (5/5)

No.	自然現象	評価基準	評価結果	評価内容
35	森林火災	—	2 次評価 要	柏崎刈羽原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。 ただし、出火原因となるのは、たき火やタバコ等の人為によるものが大半であると想定し、人為事象 No. 3 「火災・爆発」において評価する。
36	生物学的事象	—	2 次評価 要	柏崎刈羽原子力発電所の地域特性を踏まえて詳細評価。
37	静振	D	影響なし	静振は、津波や波浪といった事象に誘因されるものであり、それ単体での影響はなく、設計基準津波の影響評価に包絡。
38	塩害、塩雲	C	影響なし	腐食による影響については、事象進展が遅く保守管理による不具合防止が可能であることに加え、防食塗装による発生防止措置も実施されていることから、安全施設の機能が損なわれることはない。
39	隕石、衛星の落下	A	影響なし	安全施設の機能に影響が及ぶ規模の隕石等が衝突に至る可能性は、極低頻度な事象であり、影響はない。(※1) (※2)
40	太陽フレア、 磁気嵐	C	影響なし	太陽フレア、磁気嵐により誘導電流が発生する可能性があるが、影響が及んだとしても変圧器等の一部に限られると考えられることや、万が一、発電所外を含めた送変電設備に影響が及ぶような場合においても、プラント停止など適切な措置を講じることとしているため、安全施設の機能が損なわれることはない。
41	土石流	A	影響なし	土石流に関しては、敷地内に溪流がなく、土石流危険区域に指定されていないことから土石流が敷地内へ到達することはない。(図 4)
42	泥湧出	—	他条文 にて評価	地盤の脆弱性に係る影響であり、第三条（地盤）への対応として評価。(本資料対象外)

※1 隕石の考慮について

(1) 国内の隕石落下記録による落下確率計算

隕石については、国内外で多数の落下事例が確認されており、日本において数グラムのものから数十 kg に至るものについて記録が存在する。

しかし、それらの記録については、あくまで地上に落下したものについて確認されたものであって、海へ落下したものは確認困難であること、地上に落下したものであっても確認されていないものも多数存在すると考えられる。

これらを踏まえ、落下頻度の計算した結果を以下に示す。

(計算条件)

- ・対象隕石 国内隕石の落下記録^(注1)において、比較的、記録の多い1800年以降であって、かつ、建屋・設備への影響を否定できない1kg以上の隕石は、2013年3月までの期間に14回であるが、ここでは相対的に信頼性が高く、落下頻度が高くなる1900年以降を対象隕石とする。(1900年以降の隕石落下は8回。)
- ・落下頻度 隕石の落下については、上述のとおり、未確認のものも多数存在すると思われるため、落下頻度の算出にあたっては、上記対象隕石が非森林地域、かつ落下が確認されやすい地域に落下したものとする。

(計算結果)

国内の非森林地域への落下頻度は、約 7.08×10^{-2} 回/年(1900年3月～2013年3月の記録ベース。1800年以降の記録で算出した場合、約 6.57×10^{-2} 回/年)となり、柏崎刈羽敷地などへの落下頻度を面積比から算出した結果は次表のとおり。

対象	落下頻度 (回/年)
柏崎刈羽原子力発電所敷地内	3.1×10^{-6}
防護区域 (荒浜+大湊)	5.2×10^{-7}
防護区域 (大湊)	1.6×10^{-7}
1～7号 R/B+6/7号 C/B	3.5×10^{-8}
6/7号 R/B+6/7号 C/B	9.7×10^{-9}

(計算概要)

対象隕石の国内への落下頻度は、1900年3月から2013年3月までに8回の落下であることから、

$$8 / (2013 - 1900) = 7.08 \times 10^{-2} \text{ (回/年)}$$

となる。ここで、非森林地域であり、落下が確認されやすい地域を国土面積の25.1%^(注2)とすると、

- ・日本国土面積のうち非森林地域： $377,962 \times 0.251 = 94,868$ [km²]
- ・柏崎刈羽原子力発電所敷地面積： 4.20 [km²]

であることから、柏崎刈羽原子力発電所敷地への隕石の落下頻度は、以下のとおりとなる。

$$4.20/94,868 \times 7.08 \times 10^{-2} = 3.1 \times 10^{-6} \text{ (回/年)}$$

その他の落下頻度については、上記と同様に求めた。

(注1)： 国立科学博物館 HP 日本の隕石リストを参照

(注2)： 国土交通省 土地白書 平成26年版 我が国の国土利用の現況を参照

以上より、隕石が敷地内の安全施設へ落下し、その安全性に影響を及ぼすケースは非常に稀であり、発電用原子炉施設の周囲に落ちたときの衝撃については、頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、影響はないと考えられる。また、津波を起こすような隕石は、大規模なものであり、かつ日本海への落下を考慮すると、その落下頻度は極低頻度となる。

なお、国内に落下した1800年以降の隕石の直径は数m以下であるが、一般的に、隕石等は大気圏通過に伴いその大半が燃え尽き、また一部は破碎することを考慮すると、落下隕石が宇宙空間に存在していた時には、その大きさは、より大きなものであったと推定される。

※2 衛星の落下の考慮について

人工衛星が落下した場合については、衛星の大部分が大気圏で燃え尽き、一部破片が落下する可能性があるものの発電用原子炉施設に影響を及ぼすことはないものと考えられる。

(2) トリノスケールによる落下確率計算

地球近傍の天体が、地球に衝突する確率及び衝突した際の被害状況を表す尺度として、トリノスケールがあるが、NASAによると2016年において、今後100年間に衝突する可能性があるすべての天体についてレベル0とされている。このレベル0は、衝突確率が0か限りなく0に近い、または、衝突したとしても大気中で燃え尽き被害がほとんど発生しないことを示す。

(1)では、国内の落下記録を用い落下確率を計算したが、参考に、NASAのリストにおいて、2016年現在最も衝突確率の高い2010RF₁₂について、今後100年間の柏崎刈羽原子力発電所への落下確率を計算すると以下のとおりである。

地球の表面積：510,072,000 km²

柏崎刈羽原子力発電所の敷地面積：4.2 km²

敷地内に衝突する確率は、概算で以下のとおりとなる。

$$6.5 \times 10^{-2} \times (4.2/510,072,000) = 5.4 \times 10^{-10}$$

(1)の結果である 3.1×10^{-6} (回/年) と、 5.4×10^{-10} では、 10^4 程度の差異が生じているが、これは対象とする隕石が、(1)では1kg以上のものを抽出しているが、(2)では落下した際に被害を及ぼす規模のものから抽出しており、(2)では小規模のものは取り除かれているためであると考えられる。敷地内に隕石が落下する確率としては、(2)に比べ(1)が大きな確率ではあるが、この値も低頻度である。

表 4 人為事象の 1 次評価結果 (1/3)

No.	人為事象	評価基準	評価結果	評価内容
1	航空機落下	A	影響なし	落下確率は 10^{-7} 回/炉・年を下回ることから影響はないと判断。(※)
2	ダムの崩壊	A	影響なし	<p>発電所の近くには、ダムの崩壊により発電所に影響を及ぼすような河川はない。従って、ダムの崩壊の影響はない。(図 2 参照)</p> <p>なお、発電所敷地から南方約 3~4km に鯖石川があり、その上流に栃ヶ原ダム、鯖石川ダムがある。また、鯖石川の支流である別山川の上流に後谷ダムがある。</p> <p>当該ダムが崩壊した場合、ダムに蓄えられた水は鯖石川を増水させ、あるいは流域に拡がり勢いを失いながら日本海へ流下する。したがって、発電所近辺の浸水状況は、鯖石川水系が増水した場合の浸水想定(図 3)に類すると考えられ、発電所敷地と河川又はダムとの間に距離があること、河川の流下方向が敷地へ向いていないこと、河川と敷地の間に地形的高まり(60m~70m)があることから、発電所敷地へ影響することは無い。</p> <p>発電所敷地内の淡水貯水池については、堤体が地震及びその随件事象による影響に対して、機能維持できる設計としている。また、保守的に保有水の全量が 6, 7 号炉の敷地に流入したとしても、浸水深は 10cm 程度であり、溢水防護対象設備に影響を与えないと評価している。</p> <p>なお、淡水貯水池の堤体については、五十六条(重大事故等の収束に必要な水の供給設備)への対応として評価。(本資料の対象外)</p> <p>溢水については、第九条(溢水による損傷の防止等)への対応として評価。(本資料の対象外)</p>
3	火災・爆発	—	2 次評価要	外部火災として、森林火災、近隣工場等の火災・爆発、航空機落下火災を評価。
4	有毒ガス	—	2 次評価要	<p>発電所の近くには、有毒ガスの漏えいにより発電所に影響を及ぼすような石油化学コンビナート等はない。また、タンクローリーやケミカルタンカー等の可動施設についても発電用原子炉施設からの離隔距離が確保されることから影響はない。</p> <p>このため、発電所敷地内施設からの有毒ガスの漏えいを想定し、中央制御室の居住性について評価を実施する。</p>

※：本発電用原子炉施設への航空機の落下確率は、これまでの事故実績をもとに、民間航空機、自衛隊機及び米軍機を対象として評価した。その結果は、約 3.4×10^{-8} 回/炉・年であり、 10^{-7} 回/炉・年を下回る。したがって、航空機落下を考慮する必要はない。なお、添付資料 2 のとおり。

表 4 人為事象の1次評価結果 (2/3)

No.	人為事象	評価基準	評価結果	評価内容
5	船舶の衝突	—	2次評価要	発電所近傍の航路までは、30km程度の離隔があることから影響はない。 小型船舶については、護岸等により影響を受けないことを評価する。
6	電磁的障害	—	2次評価要	無線通信手段（PHS）等による擾乱に対して、影響を受けないことを評価する。
7	パイプライン事故	A	影響なし	発電所周辺のガスパイプラインは、基本的に地下に埋設されていることから、地上部施設について調査を実施したところ、発電所から最短のガスパイプライン（バルブ施設）までの距離は約5kmであるが、ガスの漏洩を想定しても、バルブ施設は防爆対策の取られた屋内に設置されていること、また、当該パイプラインを遮断し、ガスを高所から放出・拡散させる等、ガス事業法等の法令を準拠した設備となっていることから、引火の可能性は低く発電所への影響はない。
8	第三者の不法な接近	—	他条文にて評価	第七条（発電用原子炉施設への不法な侵入等の防止）への対応として評価。（本資料対象外）
9	航空機衝突 （意図的）	—	他条文にて評価	原子炉等規制法 第四十三条三の六 第一項 第三号（重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力）への適合性説明の中で扱う。（本資料の対象外）
10	妨害破壊行為 （内部脅威含む）	—	他条文にて評価	第七条（発電用原子炉施設への不法な侵入等の防止）への対応として評価。（本資料対象外）
11	サイバーテロ	—	他条文にて評価	第七条（発電用原子炉施設への不法な侵入等の防止）への対応として評価。（本資料対象外）

表 4 人為事象の1次評価結果 (3/3)

No.	人為事象	評価基準	評価結果	評価内容
12	産業施設の事故	D	影響なし	人為事象 No. 3 火災・爆発, No. 4 有毒ガスにて評価。
13	輸送事故	D	影響なし	人為事象 No. 3 火災・爆発, No. 4 有毒ガスにて評価。
14	軍事活動によるミサイルの飛来	—	他条文にて評価	原子炉等規制法の範疇を超えた有事の事象であるが、仮に発生した場合は、大規模損壊事象として対応。 原子炉等規制法 第四十三条三の六 第一項 第三号（重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力）への適合性説明の中で扱うこととし、本資料の対象外とする。
15	サイト内外での掘削	C	影響なし	サイト内：事前調査で埋設ケーブル・配管の位置を確認し、損傷は回避できるが、万一損傷させた場合でも、安全系は位置的分散が図られているため、複数の安全機能を同時に喪失することは無く、プラントの安全性が損なわれることはないと判断。 サイト外：送電鉄塔付近での掘削による斜面倒壊が考えられるが、非常用所内電源があるため、プラントの安全性が損なわれることはないと判断。
16	内部溢水	—	他条文にて評価	第九条（溢水による損傷の防止等）への対応として評価。（本資料の対象外）
17	タービンミサイル	A	影響なし	第十八条（蒸気タービン）の要求事項のため、本資料の対象外。（従前の「指針5 飛来物等に対する設計上の考慮」にて評価しているとおおり、安全上重要な機器が破損する確率が 10^{-7} /年以下）
18	重量物輸送	C	影響なし	屋内では、燃料集合体の落下について評価し、敷地境界外での実効線量当量が十分低いことを確認済み。第十六条（燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設）の要求事項ため、本資料の対象外。（従前の「指針49 燃料の貯蔵設備及び取扱設備」にて評価しているとおおり、6, 7号炉とも約 1.1×10^{-2} mSv） 屋外では、重量物輸送車両やクレーン等の重機転倒により外部電源の喪失が想定されるが、屋外機器の損傷は限定的であり、安全施設の機能が損なわれることはないと判断。
19	化学物質の放出による水質悪化	B	影響なし	発電所敷地内にある化学物質（軽油等）は、堰で囲み、建屋内で保管するなど流出防止が図られているため、事象発生の可能性は低い。漏えいにより冷却水の水質が悪化した場合でも、冷却効率低下による出力降下や配管や熱交換器の腐食が考えられるが、事象進展が遅く保守管理による不具合防止が可能であるため、プラントの安全性が損なわれることはないと判断。
20	油流出	D	影響なし	人為事象 No. 3 火災・爆発, 人為事象 No. 5 船舶の衝突にて評価。

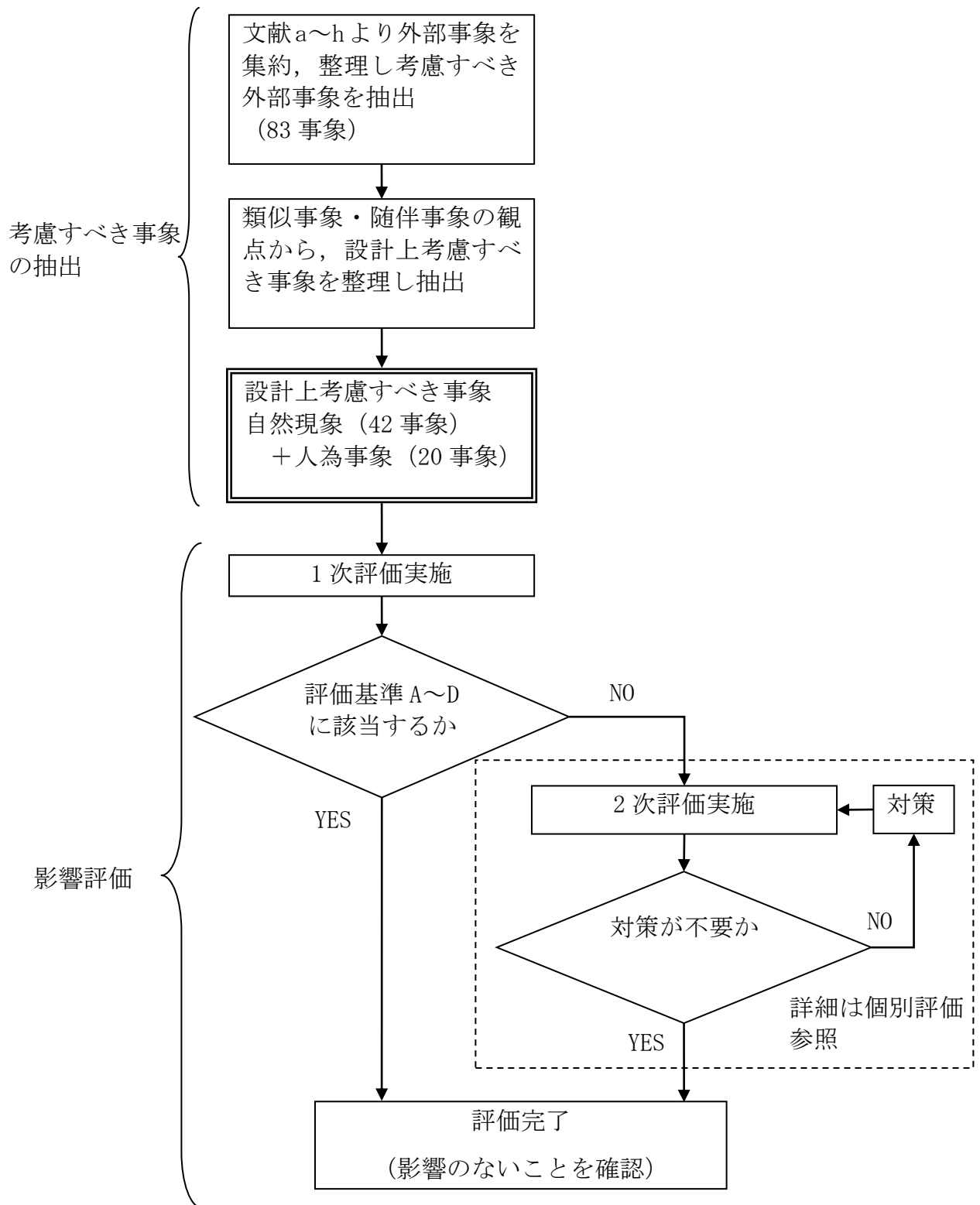


図 1 外部事象影響評価のフロー図



後谷ダム
 平成 18 年完成
 貯水量：1,150 千 m³
 用途：農業用水



栃ヶ原ダム
 平成 18 年完成
 貯水量：2,470 千 m³
 用途：農業用水

鯖石川ダム
 昭和 49 年完成
 貯水量：6,000 千 m³
 用途：洪水調節
 農業用水

図 2 柏崎刈羽原子力発電所と周辺の河川，ダムの状況

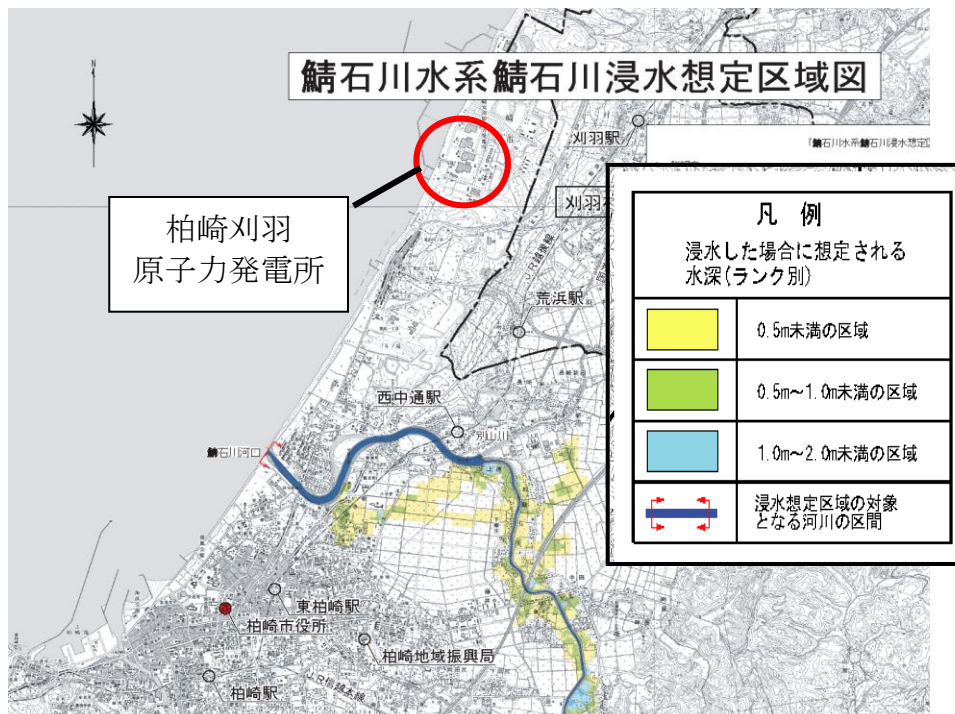
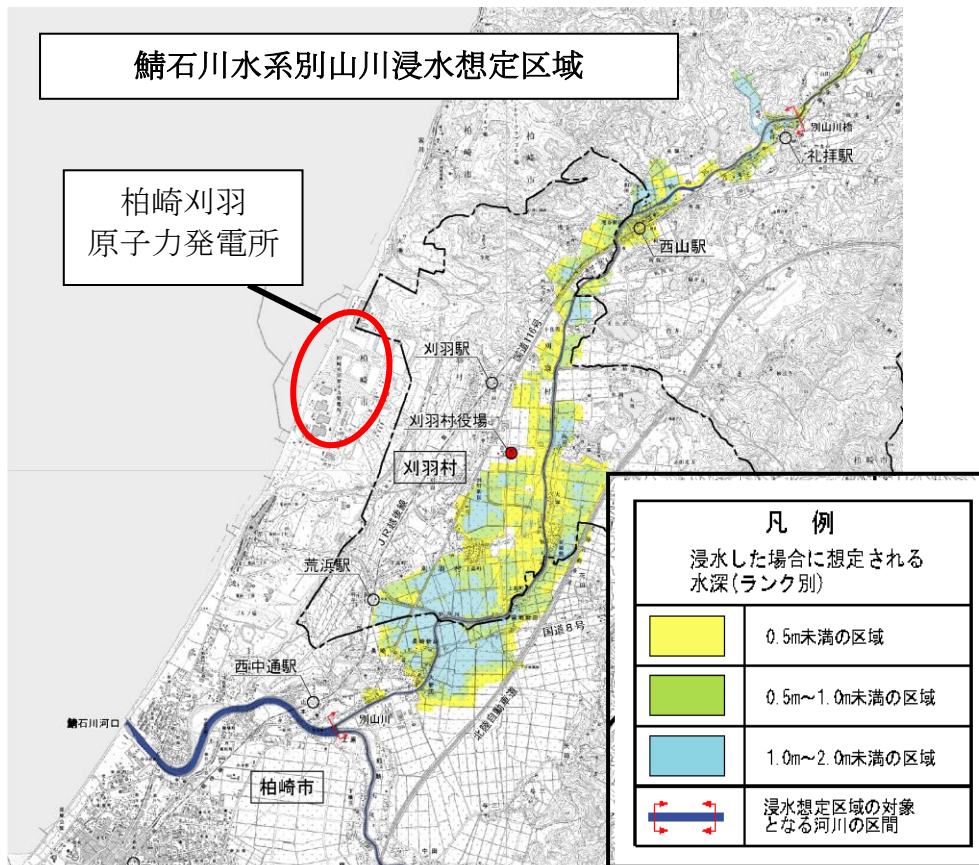


図 3 柏崎市の浸水想定区域



出典：「国土数値情報（土砂災害危険箇所（平成 22 年度），土砂災害警戒区域（平成 25 年度）国土交通省）に加筆

図 4 柏崎刈羽原子力発電所周辺の土砂災害危険箇所・警戒区域

2. 基本方針

安全施設は、1.にて選定した各外部事象又はその重畳によって、安全機能を損なわない設計とする。

ここで、第六条における安全施設とは、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」にて規定されているクラス 1, 2, 3 に属する構築物、系統および機器(以下、「安全重要度クラス 1, 2, 3 に属する構築物、系統及び機器」という。)を指していることから、選定した各外部事象に対して防護する安全施設は、安全重要度クラス 1, 2, 3 に属する構築物、系統及び機器とする。

外部事象による安全施設への影響評価(2次評価)を行うにあたっては、考慮すべき最も苛酷と考えられる条件を設計基準とする。

また、影響評価については、外部事象防護対象施設として、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器(原子炉停止、炉心冷却、使用済燃料プール冷却に必要な異常の発生防止の機能、若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備)又はそれを内包する建屋を評価し、安全機能が維持できることを確認する。また、安全機能が維持されない場合には対策を実施する。

上記以外の安全施設については、各外部事象に対して機能維持する、又は、各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能な場合、安全機能が維持可能であることから影響評価の対象外とする。

外部事象による安全施設への評価フローは図 5 のとおり。

各外部事象の重畳については、自然現象および人為事象を網羅的に組み合わせて評価する。

なお、安全施設への考慮における、根拠となる条文等については、「添付資料 3 防護すべき安全施設および重大事故等対処設備への考慮」のとおり。

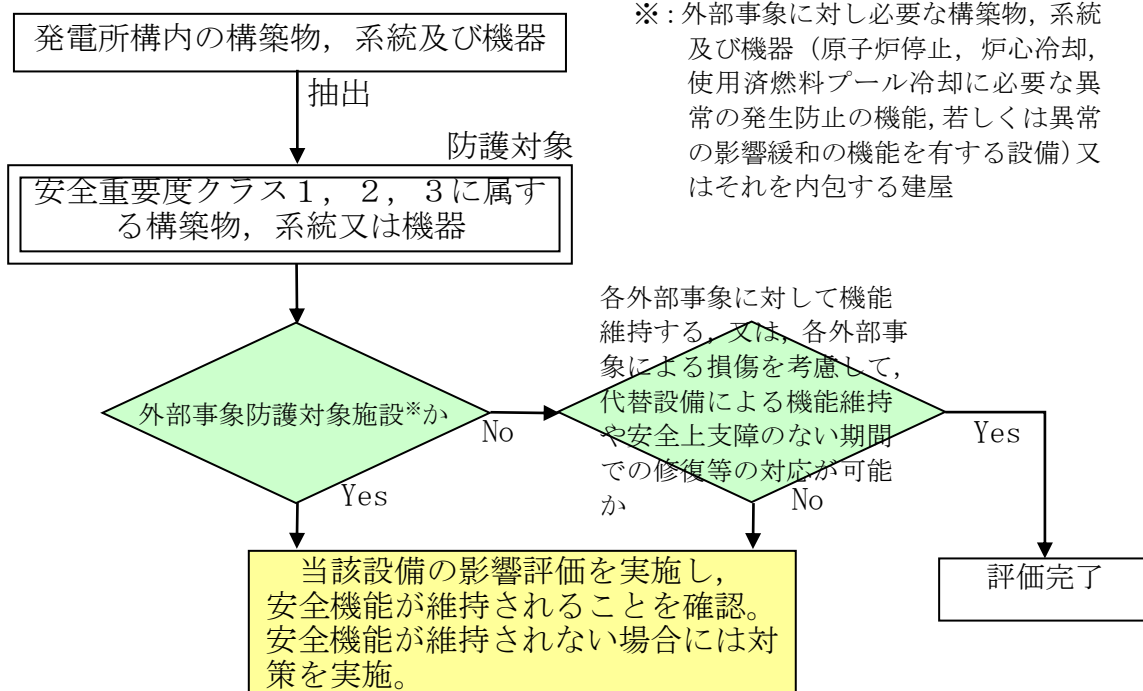


図 5 外部事象による安全施設への評価フロー

3. 地震，津波以外の自然現象

安全施設は，以下のとおり自然現象によって，安全施設の安全性を損なわない設計とする。

2次評価を実施する自然現象としては，風（台風含む），竜巻，低温（凍結），降水，積雪，落雷，地滑り，火山の影響，生物学的事象が挙げられる。

3.1 設計基準の設定

設計基準について，以下に挙げる①及び②を参照するとともに，参考として③についても評価・確認の上，最も保守的となる値を採用する。ただし，以下のいずれの方法でも設計基準の設定が行えないものについては，当該事象が発生した場合の安全施設への影響シナリオを検討の上，個別に設計基準の設定を行う。（例：火山については，上記考え方に基づく設計基準の特定は困難なため，個別に考慮すべき火山事象の特定を実施した上で設計基準を設定する。）

① 規格基準類

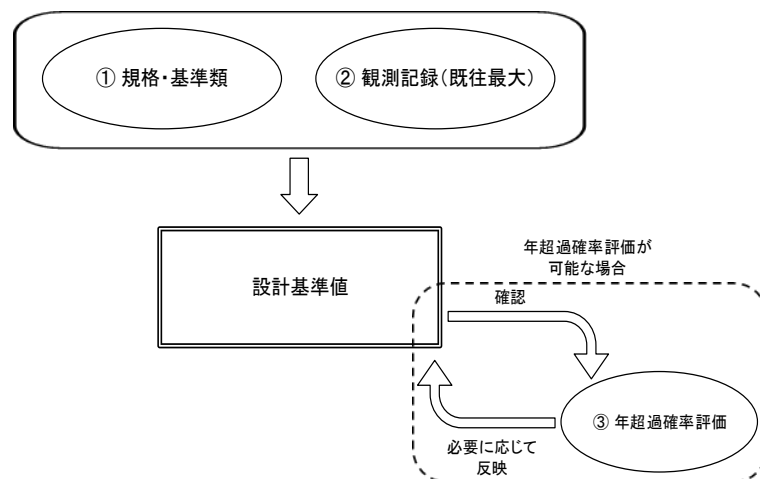
選定した自然現象に関する規格・基準類が存在する場合、それを参照する。

② 観測記録

柏崎刈羽原子力発電所及びその周辺における観測記録を調査の上、極値を参照する。

③ 年超過確率評価

柏崎刈羽原子力発電所及びその周辺における観測記録を基に年超過確率評価を実施し、上記①、②により設定した設計基準値について年超過確率を確認する。自然現象の特性に応じた想定すべき年超過確率の規模を、①、②により設定した設計基準値が下回る場合には、年超過確率評価を基にした設計基準値の見直しを図る。



なお、年超過確率評価に基づく設定の考え方については、「添付資料 4 設計基準設定において参考とする年超過確率評価について」のとおり。

3.2 個別評価

(1) 風（台風）

建築基準法施行令によると、柏崎市及び刈羽村において建築物を設計する際に要求される基準風速は30m/s（地上高10m，10分間平均）である。

観測記録によると、最大風速は柏崎市16m/s，新潟市40.1m/s，上越市23.1m/sである。

観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-4} /年値によると、最大風速は新潟市39.0m/s，上越市21.5m/sである。

基準風速は保守的に最も風速が大きい新潟市の観測記録史上1位である40.1m/s（地上高10m，10分間平均）とする。

なお、最大瞬間風速等の風速変動といった局所的かつ一時的な影響であれば、竜巻の最大瞬間風速の影響に包絡されるが、本号では風（台風）の影響範囲、継続性を鑑み、風（台風）に対して基準風速を設定する。

基準風速の設定にあたっては、最大風速を採用することにより、その風速の1.5～2倍程度の最大瞬間風速^{*}を考慮することになること、現行の建築基準法では最大瞬間風速等の風速変動による影響を考慮した係数を最大風速に乘じ風荷重を算出することが定められていることから、基準風速としては最大風速を設定する。

その上で、外部事象防護対象施設は、基準風速（40.1m/s，地上高10m，10分間平均）の風荷重に対し機械的強度を有することにより安全機能を損なわない設計とする。

上記以外の安全施設については、風（台風）に対して機能維持する、若しくは、風（台風）による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせ設計とする。

また、風（台風）の発生に伴う飛来物の影響は、竜巻影響評価にて想定している設計飛来物の影響に包絡されており、安全施設の安全機能が損なわれるおそれはない。

なお、評価結果の詳細は「添付資料5 風（台風）影響評価について」のとおり。

※：気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

(2) 竜巻

竜巻に対する規格基準は、国内では策定されていない。

観測記録によると、新潟県の最大竜巻規模は F1（風速 33～49m/s）、日本海側の最大竜巻規模は F2（風速 50～69m/s）である。

観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-5} /年値によると、竜巻規模は F2（風速 58.3m/s）である。

上記のうち最も保守的な値は、F2 の風速範囲の上限値 69m/s であるが、日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多いことから、年超過確率算出のためのデータの不確実性を踏まえ、設計竜巻の最大風速は、年超過確率 10^{-5} /年値より一桁下げた 10^{-6} /年値の 76m/s（F3）とする。

また、設計竜巻の最大風速は、地形効果による竜巻増幅を考慮する必要はないが、将来的な気候変動の不確実性を踏まえ、F3 の風速範囲の上限値 92m/s とする。

竜巻特性値（移動速度、最大接線風速、最大接線風速半径、最大気圧低下量、最大気圧低下率）については、竜巻風速場としてフジタモデルを選定した場合における設計竜巻の最大風速 92m/s での竜巻特性値を適切に設定する。

安全施設のうち外部事象防護対象施設は、以下を実施し、設計竜巻の最大風速 92m/s の竜巻が発生した場合においても、竜巻及びその随件事象によって安全機能を損なわない設計とする。

- ・ 柏崎刈羽原子力発電所における飛来物に係る調査
- ・ 飛来物防止対策
- ・ 考慮すべき設計荷重（風圧力による荷重、気圧差による荷重、飛来物による衝撃及びその他組み合わせ荷重）に対する外部事象防護対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

また、上記以外の安全施設については、竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、若しくは、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日原規技発第 13061911 号 原子力規制委員会決定）」に基づく審査資料「柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 竜巻影響評価について」のとおり。

(3) 低温（凍結）

低温に対する法令及び規格基準の要求はない。

観測記録によると、柏崎市の最低気温の観測記録史上 1 位の低温は -11.3°C である。

観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-4} /年値によると、柏崎市の最低気温は -15.2°C となる。

低温における基準温度は、観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-4} /年値の -15.2°C とする。低温の継続時間については、過去の最低気温を記録した当日の気温推移を鑑み、24 時間とする。

また、基準温度より高い温度 (-2.6°C) が長期間 (173.4 時間) 継続した場合について考慮する。

その上で、外部事象防護対象施設は、屋内設備について換気空調設備により環境温度を維持し、屋外設備については保温等の凍結防止対策を必要に応じて行うことにより、安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、低温に対して機能維持をする、若しくは、低温による凍結を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 6 低温影響評価について」のとおり。

(4) 降水

降水に対する排水施設の規格・基準として、森林法に基づく林地開発許可に関する審査基準等を示した新潟県林地開発許可審査要領においては、観測所「長岡」における雨量強度は継続時間 60 分の場合 51.1mm/h である。

観測記録によると、柏崎市の降水量の最大は 52mm/h である。

観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-4} / 年値によると、柏崎市の最大降水量は 1 時間降水量 101.3mm/h である。

基準降水量は保守的に最も降水量が大きい、観測記録の統計処理による 101.3mm/h とする。

安全施設は、発電用原子炉施設内において基準降水量 (101.3mm/h) の降水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。

降水による浸水については、安全施設のうち外部事象防護対象施設の設置場所は、基準降水量 (101.3mm/h) の降水による浸水に対し、構内排水路による排水等により、安全機能を損なわない設計とする。

その上で、外部事象防護対象施設は、基準降水量 (101.3mm/h) の降水による荷重に対し、排水口による排水等により影響を受けない設計とし、安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、降水に対して機能維持する、若しくは、降水による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 7 降水影響評価について」のとおり。

(5) 積雪

設計基準積雪量は、規格・基準類及び観測記録を参照するとともに、参考として、観測記録を統計処理した値を確認の上、積雪時の柏崎刈羽原子力発電所における除雪を考慮し設定する。

建築基準法及び同施行令第 86 条第 3 項に基づく新潟県建築基準法施行細則によると、建築物を設計する際に要求される基準積雪深は、柏崎市においては

130cm であり、刈羽村においては 170cm である。ただし、除雪に対して十分な維持管理が行われ、また、危険を覚知した時には速やかに雪下ろしが可能な形状の建築物等又はその部分については、同上第 6 項の規定により垂直積雪量を 1 メートルまで減らして計算することができる。

発電所構内の除雪体制が確立されていることから、考慮すべき観測記録は、1 日の降雪量となり、柏崎市において、日降雪量の最大値は 72cm である。

同様に、観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-4} / 年値によると、1 日あたりの積雪量は 135.9cm である。

上記を踏まえ、設計基準積雪量は、統計処理による 1 日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-4} / 年値 135.9cm を基に設定するが、それ以前に積もった積雪分（最深積雪深の平均値 31.1cm）を加えた 167cm とする。

その上で、外部事象防護対象施設は、基準積雪量（167cm）の積雪荷重に対し機械的強度を有すること、また、換気空調系の給・排気口は、基準積雪量より高所に設置することにより安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、積雪に対して機能維持する、若しくは、積雪による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせ設計とする。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 8 積雪影響評価について」のとおり。

(6) 落雷

電気技術指針 JEAG4608 においては、500kV 発電所における送電線ならびに電力設備に対して基準電流を 150kA としている。また日本工業規格 JIS A 4201:2003「建築物等の雷保護」、消防庁通知などによると、原子力発電所の危険物施設に対して基準電流 150kA と規定されている。

落雷位置標定システムによる、新潟県全域から本州内陸部の観測によると、最大落雷電流値は、460kA（夏季）、449kA（冬季）である。これらの観測記録は新潟県周辺の広範な地域で観測された雷撃電流値を示しており遮蔽の効

果を考慮しておらず、遮蔽の効果を考慮した場合、夏季と冬季のうち大きい方の夏季の電流値で 114kA となる。

観測記録の統計処理による年超過確率 10^{-4} / 年値によると、最大落雷電流値は 156kA である。

落雷の基準電流値は、観測記録の統計処理に敷地内における避雷鉄塔等の遮蔽効果を考慮した 6 号炉及び 7 号炉への 10^{-4} 件 / 年雷撃電流値約 156kA に、余裕を加えた 200kA とする。

その上で、外部事象防護対象施設の雷害防止対策として、原子炉建屋等への避雷針の設置、接地網の布設による接地抵抗の低減等を行うとともに、安全保護系への雷サージ侵入の抑制を図る回路設計を行うことにより安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、落雷に対して機能維持する、若しくは、落雷による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 9 落雷影響評価について」のとおり。

(7) 地滑り

安全施設は、発電用原子炉施設内において地滑り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。

その上で、外部事象防護対象施設は、斜面からの離隔距離を確保し地滑りのおそれがない位置に設置することにより安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、斜面からの離隔距離を確保し地滑りのおそれがない位置に設置すること、若しくは、地滑りによる損傷を考慮し安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 10 地滑り影響評価について」のとおり。

(8) 火山

発電所に対して考慮すべき火山事象は、敷地周辺の第四紀に活動した火山の活動時期や噴出物の種類と分布、敷地との位置関係から、降下火砕物（火山灰）である。

降下火砕物の堆積量に対する規格基準は、国内では策定されていない。

観測記録については、敷地で確認されているテフラは存在するが、噴出源となる火山が、将来噴火する可能性がないこと、又は、テフラの分布状況から堆積過程において水系等の影響を受けて堆積したものと推定されることから考慮対象外とした。

設計基準の堆積量は、国内外の文献調査及び降下火砕物シミュレーション結果から、35cmとする。詳細の堆積厚は、「原子力発電所の火山影響評価ガイド（平成25年6月19日原規技発第13061910号 原子力規制委員会決定）」に基づく審査資料にて説明する。

安全施設のうち外部事象防護対象施設は、設定した降下火砕物の設計基準堆積量等に対し、以下の影響について、安全機能を損なわない設計とする。

- ・直接的影響（降下火砕物の堆積荷重、化学的影響（腐食）、降下火砕物による閉塞等）
- ・間接的影響（長期間の外部電源の喪失等）

また、上記以外の安全施設については、降下火砕物に対して機能維持する、若しくは、降下火砕物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「原子力発電所の火山影響評価ガイド（平成25年6月19日原規技発第13061910号 原子力規制委員会決定）」に基づく審査資料にて説明する。

(9) 生物学的事象

安全施設は、発電用原子炉施設内において生物学的事象として海洋生物であるクラゲ等の発生、小動物等の侵入が発生した場合においても、その安全機能を損なわない設計とする。

その上で、外部事象防護対象施設は、クラゲ等の発生に対して、塵芥による原子炉補機冷却海水設備等への影響を防止するため、除塵装置及び海水ストレーナを設置し、必要に応じて塵芥を除去することにより、安全機能を損なわない設計とする。

小動物の侵入に対しては、屋内設備は建屋止水処置等により、屋外設備は端子箱貫通部の閉止処置を行うことにより、安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、生物学的事象に対して機能維持する、若しくは、生物学的事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 11 生物学的事象影響評価について」のとおり。

4. 人為事象（偶発的）

安全施設は、以下のとおり想定される偶発的な人為事象によって、安全施設の安全性を損なわない設計とする。

想定される偶発的な人為事象としては、火災・爆発、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害が挙げられる。

4.1 個別評価

(1) 火災・爆発（森林火災、近隣工場等の火災、航空機落下火災）

（爆発）

大きな爆発が発生する恐れがある施設としては、石油コンビナート等が想定される。石油コンビナート等とは、石油コンビナート等災害防止法で規制される特別防災区域内の特定事業所及びコンビナート等保安規則で規制される特定製造事業所が想定されるが、いずれの施設についても発電所から 10km 以遠であり、発電用原子炉施設に影響がないことを確認した。

（森林火災）

防火帯から約 0.4km、約 0.6km および約 3km 離れた敷地外の道路沿いで出火し、敷地内の森林まで延焼することを想定して原子炉建屋の外壁温度を評価したところ、許容温度（200℃）を下回ることを確認した。

火線強度から求めた防火帯幅は 20m であり、6 号炉及び 7 号炉とも林縁まで十分な距離があることを確認した。

また、発電所構内の林縁まで火災が到達するまでに約 3 時間という結果に対して、発電所構内に常駐している自衛消防隊が消火活動を開始するまでに十分な時間余裕があることを確認した。

火災により発生した、ばい煙等の発電用原子炉施設への影響を考慮し、万一建屋内に流入するおそれがある場合には、換気空調系の外気取入ダンパを閉止し、影響を防止できることを確認した。

（近隣工場等の火災・爆発）

(爆発) で示したとおり、発電所近隣の工場で爆発により影響があると考えられるものは無いことから、敷地周辺の道路を運行中の燃料輸送車両の火災・爆発、発電所港湾内へ侵入してきた漂流船舶の火災・爆発、敷地内危険物タンクの火災による影響を評価した。

燃料輸送車両及び漂流船舶ともに、火災で原子炉建屋外壁面が許容温度(200℃)以下となる危険距離、爆発で人体に影響がないとされる爆風圧(10kPa)以下となる危険限界距離のいずれに対しても、十分な離隔距離があることを確認した。

また、敷地内危険物タンクについては、軽油タンクの火災を想定し、原子炉建屋外壁面が許容温度(200℃)を下回ることを確認した。

(航空機落下に伴う火災)

航空機が発電用原子炉施設周辺で落下確率が 10^{-7} 回/炉・年以上になる地点へ落下することを想定し、発電用原子炉施設に対する火災の影響を評価した結果、6号炉及び7号炉の外壁面温度が許容温度(200℃)を下回ることを確認した。

なお、詳細評価については、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成25年6月19日原規技発第13061912号 原子力規制委員会決定)」に基づく審査資料「柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉 外部火災影響評価について」のとおり。

(2) 有毒ガス

有毒ガスの漏えいについては固定施設(石油コンビナート等)と可動施設(陸上輸送、海上輸送)からの流出が考えられる。発電所周辺には周辺監視区域が設定されているため、発電用原子炉施設と近隣の施設や周辺道路との間には離隔距離が確保されていることから、有毒ガスの漏えいを想定した場合でも、中央制御室の居住性が損なわれることはない。また、敷地港湾の前面の海域を移動中の可動施設から有毒ガスの漏えいを想定した

場合も同様に、離隔距離が確保されているため、中央制御室の居住性が損なわれることはない。

発電所敷地内に貯蔵している化学物質については、貯蔵設備からの漏えいを想定した場合でも、換気空調設備等により中央制御室の居住性が損なわれることはない。

なお、評価結果の詳細については、「添付資料 12 有毒ガス影響評価について」のとおり。

(3) 船舶の衝突

最も距離の近い航路でも発電所より 30km の離隔距離があり、航路を通行する船舶の衝突により、安全施設が安全機能を損なうことはない。

小型船舶が発電所近傍で漂流した場合でも、敷地前面の防波堤等に衝突して止まることから取水性に影響は無い。また、カーテン・ウォール前面に小型船舶が到達した場合であっても、深層から取水することにより、取水機能が損なわれるような閉塞は生じない設計とする。

また、船舶の座礁により重油流出事故が発生した場合は、オイルフェンスを設置する措置を講じる。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 13 船舶の衝突影響評価について」のとおり。

(4) 電磁的障害

安全保護系は、電磁的障害による擾乱に対して、制御盤へ入線する電源受電部にラインフィルタや絶縁回路を設置、外部からの信号入出力部にラインフィルタや絶縁回路を設置、通信ラインにおける光ケーブルの適用等により、影響を受けない設計としている。

したがって、電磁的障害により安全施設の安全機能を損なうことはない。

なお、評価結果の詳細は「添付資料 14 電磁的障害影響評価について」のとおり。

5. 外部事象に対する安全施設および重大事故等対処設備への影響評価

3. および 4. にて評価した、外部事象による安全施設への影響を表 5 に示す。

表5 外部事象による安全施設の影響評価(1/4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	自然現象による影響																人為事象による影響								
				風(台風)		竜巻		低温(凍結)		降水		積雪		落雷		地滑り		火山		生物学的事象		火災・爆発		有毒ガス		船舶の衝突		電磁的障害
	機能	構築物, 系統又は機能 ^{※1}		評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	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	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	過剰反応度の印加防止機能	制御棒カップリング・制御棒駆動機構	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	炉心形状の維持機能	炉心支持構造物, 燃料集合体	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
MS-1	原子炉の緊急停止機能	原子炉停止系の制御棒による系(制御棒, 制御棒駆動系)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	未臨界維持機能	原子炉停止系(制御棒駆動系, ほう酸水注入系)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統(残留熱除去系, 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心注水系, 逃がし安全弁, 自動減圧系), 原子炉格納容器(サブプレッションプール)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
		復水補給水系(復水貯蔵槽)	Rw/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	炉心冷却機能	非常用炉心冷却系(残留熱除去系, 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心注水系, 自動減圧系), 原子炉格納容器(サブプレッションプール)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
		復水補給水系(復水貯蔵槽)	Rw/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
	放射線物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管, 残留熱除去系	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
		原子炉建屋	屋外(建屋)	○	荷	○	荷	(ブローアウトパネル ^{※2} が開放した場合=停, 補)	○	影	○	水	○	荷	○	防	○	滑	○	荷	○	防	○	熱, 爆	○	影	○	影
		非常用ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
		排気筒(非常用ガス処理系配管の支持機能)	屋外	○	荷	○	荷	荷, 飛(仮設足場に飛散防止対策を講じない場合=荷, 補)	○	影	○	影	○	侵	○	防	○	滑	○	侵	○	影	○	熱, 爆	○	影	○	影
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系	C/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	
安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系	R/B, C/B, T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	非常用ディーゼル発電機(屋内設備)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	取, 灰	○	内	○	影	○	内	○	影		
	非常用ディーゼル発電機(屋外設備: 消音器)	屋外	○	影	○	荷	荷, 飛(仮設足場に飛散防止対策を講じない場合=荷, 補)	○	影	○	影	○	影 ^{※3} , 侵	○	影	○	滑	○	侵	○	影	○	煙	○	影	○	影	
	軽油タンク, 非常用ディーゼル発電機燃料移送系	屋外	○	防	○	防	○	防	○	水	○	防	○	防	○	滑	○	防	○	防	○	熱	○	影	○	影		
	中央制御室及びその遮へい・中央制御室換気空調系	C/B	○	内	○	防	○	内	○	内	○	影 ^{※3} , 取	○	内	○	内	○	居, 取	○	内	○	内, 煙	○	居	○	内	○	影
	原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	R/B, T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	灰	○	生	○	内	○	影	○	防
直流電源系・計測制御電源系	R/B, C/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1: 間接関連系は, 当該系の機能遂行に直接必要ない構築物, 系統及び機器であるため, 記載を省略した。
※2: ブローアウトパネルは常時閉
※3: 給気ルーバの高さは積雪深より高い

除: 除雪, 除灰により対応
補: 補修の実施により対応
停: プラント停止(必要に応じ)
荷: 荷重評価の結果, 影響なし(例: 竜巻の風荷重, 飛来物の衝撃荷重等)
水: 浸水・荷重評価の結果, 影響なし
居: 居住性評価の結果, 影響なし
滑: 地滑りによる影響なし(斜面からの離隔)

運: 暖気運転により対応
取: フィルタ取替, ガラリの清掃等により対応
止: 運転停止中
爆: 爆風圧評価の結果, 影響なし
灰: 火山灰による影響なし
飛: (設計飛来物が設置高さまで到達しない, 又は開口部等への防護対策により) 飛来物による衝撃荷重が作用しないため影響なし
影: 対象となる構築物, 系統又は機能に影響を及ぼす影響モードがない

代: 代替設備(設備名)
防: 事象に見合った防護対策を実施(例: 飛来物からの防護, 雷害対策等)
侵: 内部に侵入しづらい設計
熱: 輻射熱評価の結果, 影響なし
煙: ばい煙による影響なし
内: 建屋内(地下布設の場合も含む)により影響なし
生: カーテンウォールや除塵装置等によりクラグ等の影響なし

表5 外部事象による安全施設の影響評価(2/4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	自然現象による影響														人為事象による影響											
				風(台風)		竜巻		低温(凍結)		降水		積雪		落雷		地滑り		火山		生物学的事象		火災・爆発		有毒ガス		船舶の衝突		電磁的障害	
	機能	構築物, 系統又は機能 ^{※1}		評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能(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)	原子炉冷却材浄化系(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)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって, 放射性物質を貯蔵する機能	原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	燃料を安全に取り扱う機能	使用済燃料プール(使用済燃料貯蔵ラックを含む), 新燃料貯蔵庫(臨界を防止する機能)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	放射性気体廃棄物処理系(活性炭式希ガスホールドアップ装置)	T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	燃料を安全に取り扱う機能	燃料交換機, 原子炉建屋クレーン	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	逃がし安全弁(吹き止まり機能に関連する部分)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	非常用所内電源系空調	R/B・C/B・T/B	○	内	○	防	○	影	○	内	○	影 ^{※3} , 取	○	内	○	内	○	取	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
	燃料プール水の補給機能	残留熱除去系	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
	放射性物質放出の防止機能	燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
		原子炉建屋原子炉棟	屋外(建屋)	○	荷	○	荷	○	影	○	水	○	荷	○	防	○	滑	○	荷	○	防	○	熱, 爆	○	影	○	影	○	影
		放射性気体廃棄物処理系(オフガス系) 隔離弁	T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影		
		排気筒(非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分)	屋外	○	荷	○	荷	○	影	○	影	○	影, 侵	○	防	○	滑	○	灰, 侵	○	影	○	熱, 爆	○	影	○	影	○	影
	非常用ガス処理系, 空調機(間接関連系:MS-2)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影			
事故時のプラント状態の把握機能	事故時監視計器の一部(格納容器エリアモニタ)	C/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影			
制御室外からの安全停止機能	制御室外原子炉停止装置(安全停止に関連するもの)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影			

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1: 間接関連系は, 当該系の機能遂行に直接必要ない構築物, 系統及び機器であるため, 記載を省略した。
※2: ブローアウトパネルは常時閉
※3: 給気ルーバの高さは積雪深より高い

除: 除雪, 除灰により対応
補: 補修の実施により対応
停: プラント停止(必要に応じ)
荷: 荷重評価の結果, 影響なし(例: 竜巻の風荷重, 飛来物の衝撃荷重等)
水: 浸水・荷重評価の結果, 影響なし
居: 居住性評価の結果, 影響なし
滑: 地滑りによる影響なし(斜面からの離隔)

運: 暖気運転により対応
取: フィルタ取替, ガラリの清掃等により対応
止: 運転停止中
爆: 爆風圧評価の結果, 影響なし
灰: 火山灰による影響なし
飛: (設計飛来物が設置高さまで到達しない, 又は開口部等への防護対策により) 飛来物による衝撃荷重が作用しないため影響なし
影: 対象となる構築物, 系統又は機能に影響を及ぼす影響モードがない

代: 代替設備(設備名)
防: 事象に見合った防護対策を実施(例: 飛来物からの防護, 雷害対策等)
侵: 内部に侵入しづらい設計
熱: 輻射熱評価の結果, 影響なし
煙: ばい煙による影響なし
内: 建屋内(地下布設の場合も含む)により影響なし
生: カーテンウォールや除塵装置等によりクラゲ等の影響なし

表5 外部事象による安全施設の影響評価 (3/4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	自然現象による影響												人為事象による影響													
				風(台風)		竜巻		低温(凍結)		降水		積雪		落雷		地滑り		火山		生物学的事象		火災・爆発		有毒ガス		船舶の衝突		電磁的障害	
	機能	構築物, 系統又は機能※1		評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2 以外のもの)	原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管, 弁	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
	原子炉冷却材の循環機能	原子炉再循環系	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
	放射線物質の貯蔵機能	サプレッションプール水サージタンク	屋外	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止	○	止
		復水貯蔵槽, 液体廃棄物処理系, 固体廃棄物処理系	Rw/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	補
		固体廃棄物貯蔵庫, ドラム缶	固体廃棄物貯蔵庫	○	荷	○	補※4	○	影, 内	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	内	○	影	○	影	○	影
		固体廃棄物処理建屋, 固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	○	荷	○	補※4	○	影, 内	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	補※4	○	影, 内	○	影	○	影	○	影
		新燃料貯蔵庫, 新燃料貯蔵ラック	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
	電源供給機能 (非常用を除く)	タービン, 発電機及び励磁装置, 復水系, 給水系, 循環水系	T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
		送電線	屋外	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	影	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	影	○	影	○	影
		変圧器, 開閉所	屋外	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	代 (非常用ディーゼル発電機)	○	影	○	影	○	影
	プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く)	原子炉制御系 (RWM含む), 原子炉核計装, 原子炉プロセス計装	C/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	補
	プラント運転補助機能	補助ボイラ設備	補助ボイラ建屋	○	内	○	補	○	内	○	補	○	補	○	内	○	補	○	補	○	補	○	内	○	影	○	内	○	補
		計装用圧縮空気系	T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放射防止機能	燃料被覆管	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
	原子炉冷却材の浄化機能	原子炉冷却材浄化系	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影
復水浄化系		T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影	

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1: 間接関連系は, 当該系の機能遂行に直接必要ない構築物, 系統及び機器であるため, 記載を省略した。
※4: 放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施

除: 除雪, 除灰により対応	運: 暖気運転により対応	代: 代替設備 (設備名)
補: 補修の実施により対応	取: フィルタ取替, ガラリの清掃等により対応	防: 事象に見合った防護対策を実施 (例: 飛来物からの防護, 雷害対策等)
停: プラント停止 (必要に応じ)	止: 運転停止中	侵: 内部に侵入しづらい設計
荷: 荷重評価の結果, 影響なし (例: 竜巻の風荷重, 飛来物の衝撃荷重等)	爆: 爆風圧評価の結果, 影響なし	熱: 輻射熱評価の結果, 影響なし
水: 浸水・荷重評価の結果, 影響なし	灰: 火山灰による影響なし	煙: ばい煙による影響なし
居: 居住性評価の結果, 影響なし	飛: (設計飛来物が設置高さまで到達しない, 又は開口部等への防護対策により) 飛来物による衝撃荷重が作用しないため影響なし	内: 建屋内 (地下布設の場合も含む) により影響なし
滑: 地滑りによる影響なし (斜面からの離隔)	影: 対象となる構築物, 系統又は機能に影響を及ぼす影響モードがない	生: カーテンウォールや除塵装置等によりクラゲ等の影響なし

表5 外部事象に対する安全施設の影響評価 (4/4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	自然現象による影響																人為事象による影響											
				風(台風)		竜巻		低温(凍結)		降水		積雪		落雷		地滑り		火山		生物学的事象		火災・爆発		有毒ガス		船舶の衝突		電磁的障害			
	機能	構築物, 系統又は機能※1		評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果	評価	確認結果		
MS-3 緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	原子炉圧力上昇の緩和機能	逃がし安全弁(逃がし弁機能)	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影				
		タービンバイパス弁	T/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影				
	出力上昇の抑制機能	原子炉冷却材再循環系(再循環ポンプトリップ機能), 制御棒引抜監視装置	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	補				
	原子炉冷却材の補給機能	制御棒駆動水圧系, 原子炉隔離時冷却系	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影				
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	原子炉冷却材再循環ポンプMGセット	Rw/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影				
	通信連絡設備	所外通信	無線系	原子力発電所緊急時対策所	免震重要棟	○	内	○	代(5号炉緊急時対策所)	○	内	○	内	○	荷	○	防	○	滑	○	荷	○	防	○	内	○	居	○	内	○	影
				R/B(5号炉)	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	荷	○	防	○	滑	○	荷	○	防	○	内	○	居	○	内	○
		無線系	マイクロ波無線鉄塔	○	風荷重: 荷飛来物: 代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	代(衛星系)	○	代(衛星系)	○	代(衛星系)	○	代(衛星系, 有線系)	○	滑	○	代(衛星系)	○	防	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	影	○	影	○	代(衛星系, 有線系)		
			有線系	送電鉄塔	○	風荷重: 荷飛来物: 代(衛星系, 無線系)	○	代(衛星系, 無線系)	○	代(衛星系)	○	代(衛星系)	○	代(衛星系)	○	代(衛星系, 無線系)	○	滑	○	代(衛星系)	○	防	○	代(衛星系, 無線系)	○	影	○	影	○	代(衛星系, 無線系)	
		有線系 無線系 衛星系	免震重要棟(屋内設備)	○	内	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	内	○	影	○	内	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)		
			免震重要棟(屋外設備)	○	風荷重: 荷飛来物: 代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所))	○	影	○	除	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	滑	○	除	○	防	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	影	○	影	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)		
			R/B(5号炉)(屋内設備)	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)
			R/B(5号炉)(屋外設備)	○	風荷重: 荷飛来物: 代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所))	○	影	○	除	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	滑	○	除	○	防	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)	○	影	○	影	○	代(衛星系(5号炉緊急時対策所), 無線系(5号炉緊急時対策所), 有線系)		
		有線系	各建屋(地下設備含む)	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	補	○	代(衛星系, 無線系)
			屋外設備	○	補	○	補	○	補	○	影	○	補	○	補	○	滑	○	補	○	補	○	補	○	影	○	影	○	補	○	補
	放射能監視設備(モニタリングポスト)	屋外	○	荷	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	代(可搬型モニタリング設備)	○	影	○	影	○	代(可搬型モニタリング設備)			
	放射線監視設備(放射能観測車)	可搬型SA設備保管場所	○	代(放射線観測車の代替測定装置)	○	代(放射線観測車の代替測定装置)	○	運	○	影	○	除	○	代(放射線観測車の代替測定装置)	○	代(放射線観測車の代替測定装置)	○	除	○	代(放射線観測車の代替測定装置)	○	熱(防火帯内)	○	影	○	影	○	代(放射線観測車の代替測定装置)			
	事故時監視計器の一部	R/B	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	補			
		気象観測装置	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	代(可搬型気象観測装置)	○	影	○	影	○	代(可搬型気象観測装置)			
	消火系	給水建屋	○	内	○	代(防火水槽等)	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	代(防火水槽等)			
ろ過水タンク(屋外配管含む)		○	代(防火水槽等)	○	代(防火水槽等)	○	代(防火水槽等)	○	代(防火水槽等)	○	代(防火水槽等)	○	影	○	代(防火水槽等)	○	代(防火水槽等)	○	影	○	代(防火水槽等)	○	影	○	影	○	影				
泡消火設備		○	代(消防車)	○	代(消防車)	○	防	○	代(消防車)	○	代(消防車)	○	代(消防車)	○	代(消防車)	○	代(消防車)	○	影	○	代(消防車)	○	影	○	影	○	影				
安全避難通路, 非常照明	各建屋内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	内	○	影	○	内	○	影				

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1: 間接関連系は, 当該系の機能遂行に直接必要ない構築物, 系統及び機器であるため, 記載を省略した。

除: 除雪, 除灰により対応
補: 補修の実施により対応
停: プラント停止(必要に応じ)
荷: 荷重評価の結果, 影響なし(例: 竜巻の風荷重, 飛来物の衝撃荷重等)
水: 浸水・荷重評価の結果, 影響なし
居: 居住性評価の結果, 影響なし
滑: 地滑りによる影響なし(斜面からの離隔)

運: 暖気運転により対応
取: フィルタ取替, ガラリの清掃等により対応
止: 運転停止中
爆: 爆風圧評価の結果, 影響なし
灰: 火山灰による影響なし
飛: (設計飛来物が設置高さまで到達しない, 又は開口部等への防護対策により) 飛来物による衝撃荷重が作用しないため影響なし
影: 対象となる構築物, 系統又は機能に影響を及ぼす影響モードがない

代: 代替設備(設備名)
防: 事象に見合った防護対策を実施(例: 飛来物からの防護, 雷害対策等)
侵: 内部に侵入しづらい設計
熱: 輻射熱評価の結果, 影響なし
煙: ばい煙による影響なし
内: 建屋内(地下布設の場合も含む)により影響なし
生: カーテンウォールや除塵装置等によりクラゲ等の影響なし

6. 自然現象/人為事象の重畳について

実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第6条解釈第3項及び第5項において、設計上の考慮を要する自然現象の重畳について要求がある。更に、第6条解釈第7項において、人為事象についての要求があることから、自然現象、人為事象の重畳について検討する。

重畳の検討についての概略を以下に示す。

【検討手順概略】

- ① 1. 「設計上考慮する外部事象の抽出」で収集した自然現象（地震及び津波を含む）及び人為事象を基本的な組み合わせ対象として設定
- ② 発電所の敷地周辺で発生しない事象を除外
- ③ 自然現象及び人為事象毎に影響モード（荷重、閉塞、熱影響等）を整理し、事象の特性（相関性、発生頻度等）を踏まえて全ての組み合わせを網羅的に検討し、影響が増長する組み合わせを特定。組み合わせを考慮した場合に発電用原子炉施設に与える影響パターンを以下の観点で分類。
 - a. 組み合わせた場合も影響が増長しないもの（逆に影響が小さくなるものを含む）
 - b. 同時に発生する可能性が極めて低いもの
 - c. 増長する影響について、単一の事象の検討で包絡されている、もしくは単一の事象の設計余裕に包絡されているもの
 - d. c以外で影響が増長するもの影響が増長するケース（上記c及びd）については、それらを4つのタイプに分類し、新たな影響モードが生じるモードについても考慮。
- ④ 組み合わせの検討結果としての影響度合いを明示。（上記c及びdと分類されたものについて）「重畳の結果を個別に評価するもの」、「他の重畳事象で代表させるもの」、「単一の事象（関連して発生する可能性がある自然現象も含む。）の設計余裕に包絡されているもの（上記c）」に整理し詳細検討
- ⑤ アクセス性・視認性についても参考として記載

図6に自然現象/人為事象の組み合わせ事象の評価フローを示す。フロー内の各タスクの詳細については6.1節以降で説明する。

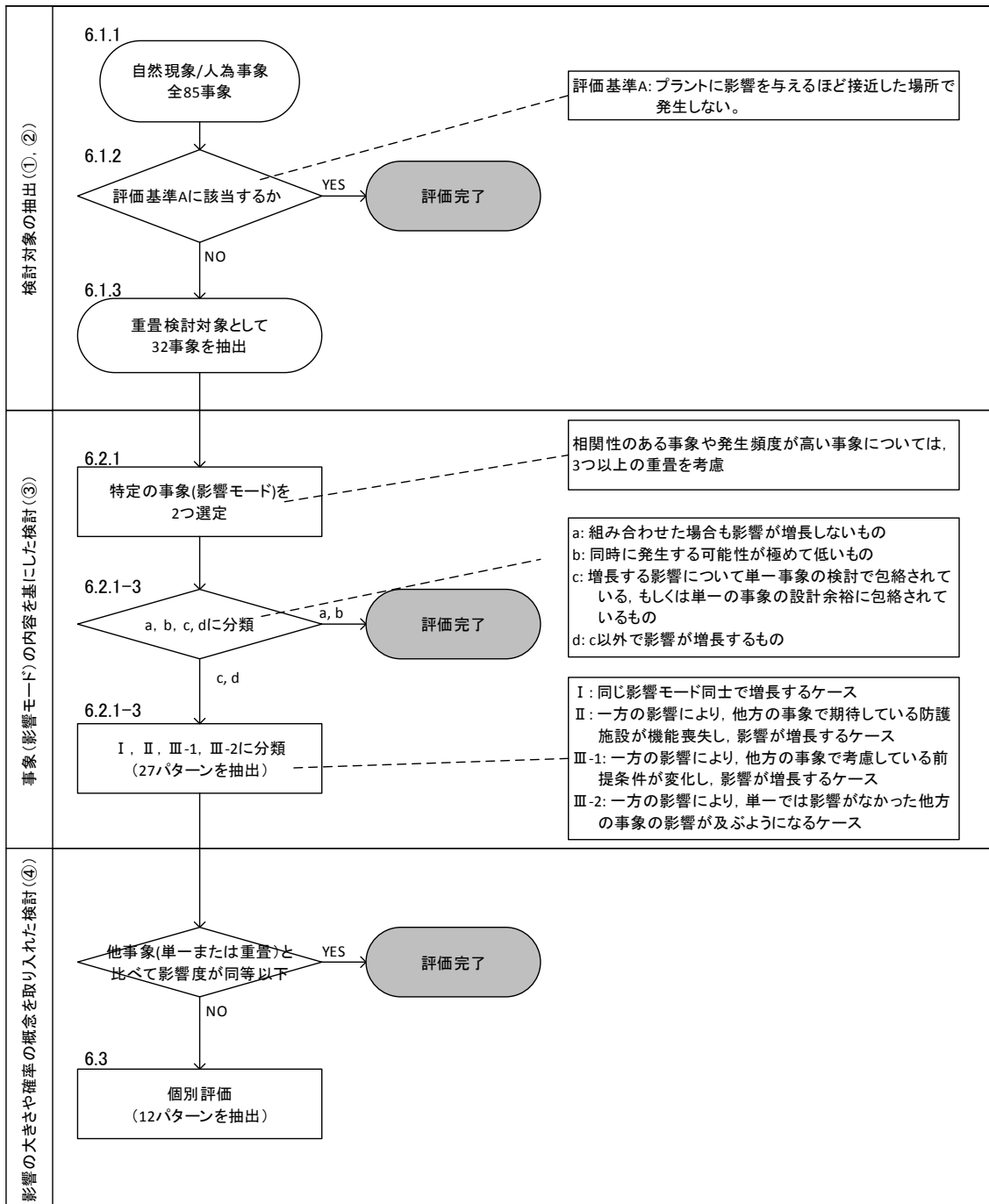


図 6 自然現象/人為事象の組み合わせの評価

6.1 検討対象

6.1.1 検討対象事象

検討対象とする外部事象は、1.1と同様に、文献より集約、整理した83事象（自然現象55事象、人為事象28事象）から類似事象・随件事象の観点で設計上考慮すべき事象を整理した62事象（自然現象42事象及び人為事象20事象）に対して、地震、津波を加えた64事象とする。

6.1.2 単一の事象における評価基準の重畳検討への適合性

単一の自然現象/人為事象として一次評価（1.2.1参照）で評価基準A～Dと判定された事象についても、重畳を考えた場合にはプラントの安全性に影響を及ぼす可能性があるため、検討対象の評価基準を見直す。単一の自然現象/人為事象で設定した評価基準及び重畳の検討への適用性について表6に示す。また、人為事象のうち、意図的事象については重畳の検討の対象外とする。

表6 評価基準の重畳検討への適用性

評価基準	重畳への適用性検討
<u>基準A</u> プラントに影響を与えるほど接近した場所で発生しない。	○：発生しない事象については重畳検討においても考慮する必要がない。
<u>基準B</u> ハザードの進展・襲来が遅く、事前にそのリスクを予知・検知し、ハザードを排除できる。	×：他の現象の影響により進展・襲来が早くなる可能性がないか、また予知・検知・排除が困難な状況とならないか検討する。
<u>基準C</u> プラント設計上、考慮された事象と比べて、設備等への影響度が同等もしくはそれ以下、または、プラントの安全性が損なわれない。	×：影響度が他事象以下であっても、重畳を考慮する場合には他事象にその影響度が上乘せられるため、検討する必要がある。
<u>基準D</u> 影響が他の事象に包絡される。	△：基本的には包絡される他事象において検討するが、他事象との相関性や新たな影響モードの発生については適切に考慮する。

6.2 重畳影響分類

6.2.1 重畳影響分類方針

自然現象の組み合わせについては、画一的な整理（検討除外基準の設定等）が難しいことから、6.1.3で抽出された事象の全ての組み合わせに対して網羅的に検討を実施する。

6.2.1-1 事象数

影響が厳しい事象が重畳することは稀であることから、基本的には2つの事象が重畳した場合の影響を検討する。ただし、発生頻度が高い事象については、考慮する組み合わせに関係なく、ベースとして負荷がかかっている状況を想定する（図7参照）。例えば、地震と火山灰の組み合わせを考慮する場合も、ベース負荷として積雪や降水の影響についても考慮する。

また、相関性のある事象については同時に発生しているものとして考慮する（相関性のある事象については添付資料17参照）。

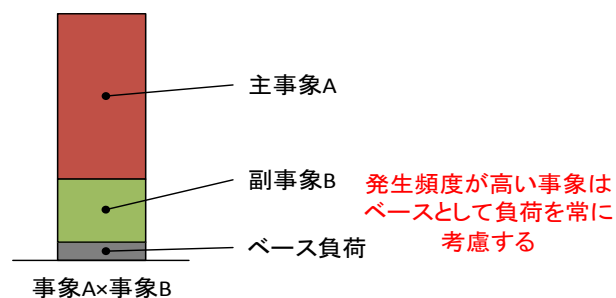


図7 ベース負荷の考え方

6.2.1-2 規模

組み合わせる事象の規模については、基本的には単純性・保守性のために、主事象として設計基準で想定している規模、副事象として年超過発生確率 10^{-2} （プラント寿命期間を考慮して設定）の規模の事象を想定する。ただし、随伴事象など相関性が高い事象の組み合わせについては、設計基準規模の事象同士が重畳することを考慮する。

6.2.1-3 影響パターン

組み合わせを考慮した場合に発電用原子炉施設に与える影響パターンを以下の3つの観点で分類した。

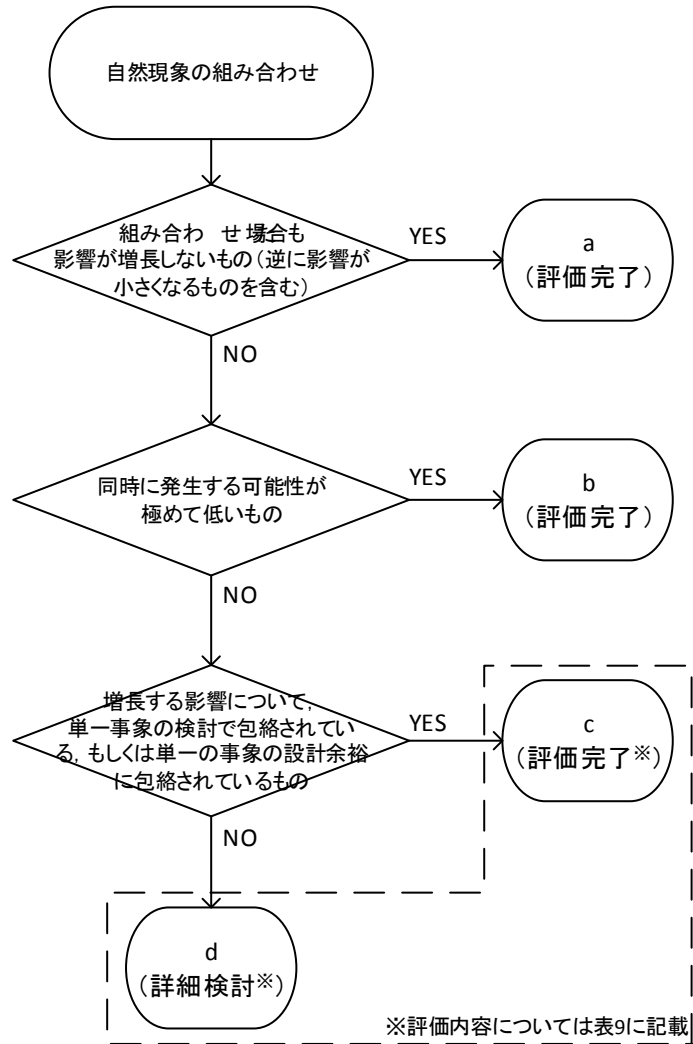
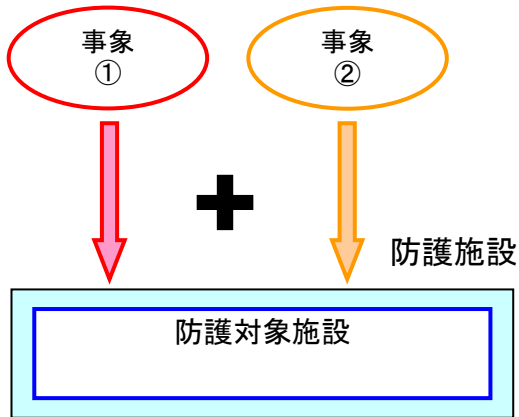


図 8 影響パターン選定フロー

上記 a, b に該当する自然現象の組み合わせについては、安全施設の安全機能が損なわれない。

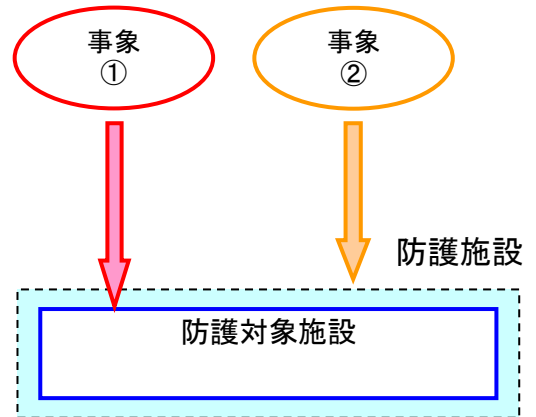
上記 c, d に該当する自然現象の組み合わせについては、事象が単独で発生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組み合わせとなるが、その増長する影響パターンについては図 9 のとおり 4 つに分類した。

I. 各事象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース



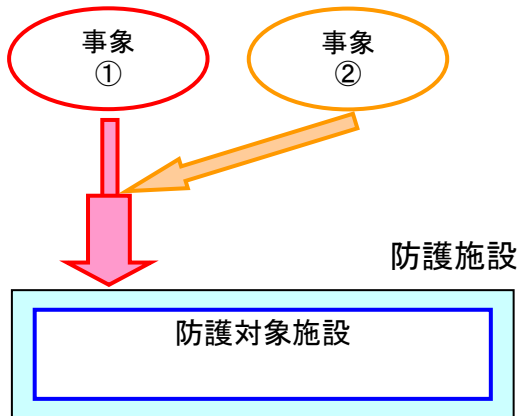
例：積雪+火山灰=堆積荷重増

II. 事象②によって防護施設が機能喪失することにより、事象①の影響が増長するケース



例：地震+津波
=地震により止水機能が喪失して浸水量増

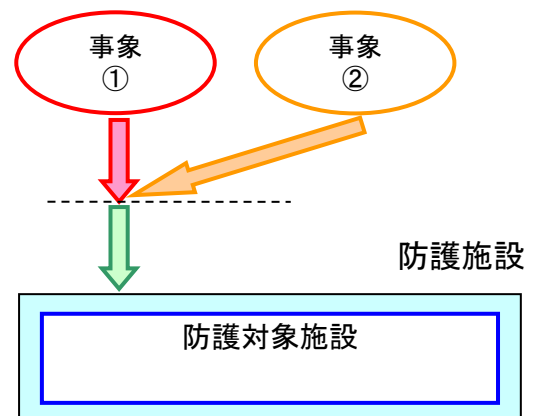
III-1. 他の事象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース



例：火山灰+降水
=密度増による堆積荷重増

例：森林火災+強風
=風速増による火線強度増

III-2. 他の事象の作用により影響が及ぶようになるケース



例：火山灰+降水
=斜面に堆積した火山灰が大量の降水で滑り、衝撃荷重発生

図 9 重畳による増長パターン分類

6.2.2 重畳影響分類結果

事象の重畳影響について6.2.1に基づき、a, b, c, dに分類(c, dについては更にI, II, III-1, III-2に分類)した結果について表8に示す。

表 8 自然現象／人為事象の重畳 マトリックス (2/3)

事象②		No.	事象	No.	8		9		10		11		12		13		14		15					16	17	18	19																	
					低温系		低温系		低温系		低温系		低温系		低温系		低温系		火山					地滑り	海中の地滑り	土地の浸食、カルスト	土の伸縮																	
					積雪		霜、霜柱		低温		低温水(海水温度低)		高温		高温水(海水温度高)		霧、霧							①荷重(衝突)	②閉塞(取水)	③閉塞(空調)	④腐食	⑤相関短絡	⑥水質汚染	⑦大気汚染	⑧荷重(衝突)	⑨閉塞(取水)	⑩地盤不安定	⑪地盤不安定										
事象①		損傷・機能喪失モード		①荷重(堆積)		②相関短絡		③閉塞(空調)		①-		①外気温度低(凍結)		①-		①外気温度高(冷却機能低下:空調)		①海水温度高(冷却機能低下:海水系)		①-		①荷重(堆積)		②閉塞(取水)		③閉塞(空調)		④腐食		⑤相関短絡		⑥水質汚染		⑦大気汚染		⑧荷重(衝突)		⑨閉塞(取水)		⑩地盤不安定		⑪地盤不安定		
1	地震	No.	事象	損傷・機能喪失モード	①荷重(地震荷重)		d(III-1)		a		a		d(II)		a		a		a		a		d(III-1)		a		a		a		a		a		a		b		a		a		a	
					②地盤沈下(変位)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
2	津波	No.	事象	損傷・機能喪失モード	③地面隆起(相対的な水位低下)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					④泥湧出		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
3	降水	No.	事象	損傷・機能喪失モード	①浸水		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					②閉塞(衝突)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
4	風(台風)	No.	事象	損傷・機能喪失モード	③建築物・設備		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					④砂力		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
5	電巻	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑤冷却機能低下:海水系		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					⑥閉塞(取水)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
6	落雷	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑦閉塞(空調)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					⑧腐食		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
7	地下水による浸食	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑨相関短絡		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					⑩地盤不安定		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
8	積雪	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑪外気温度低(凍結)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					⑫海水温度高(冷却機能低下:空調)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
9	霜、霜柱	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑬海水温度高(冷却機能低下:海水系)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
					⑭-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
10	低温	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑮-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					⑯外気温度高(冷却機能低下:空調)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
11	低温水(海水温度低)	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑰-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					⑱海水温度高(冷却機能低下:海水系)		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
12	高温	No.	事象	損傷・機能喪失モード	⑳-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉑-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
13	高温水(海水温度高)	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉒-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉓-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
14	霧、霧	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉔-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉕-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
15	火山	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉖-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉗-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
16	地滑り	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉘-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉙-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
17	海中の地滑り	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉚-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉛-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
18	土地の浸食、カルスト	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉜-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉝-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
19	土の伸縮	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㉞-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㉟-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
20	海岸浸食	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㊱-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㊲-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
21	森林火災	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㊳-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㊴-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
22	生物学的事象	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㊵-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㊶-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
23	塩害、塩害	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㊷-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a			
					㊸-		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a		a	
24	太陽フレア、磁気嵐	No.	事象	損傷・機能喪失モード	㊹-		a		a																																			

表 8 自然現象／人為事象の重畳 マトリックス (3/3)

事象②		事象①		No.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32								
				事象	事象	海岸浸食	森林火災		生物的事象		塩害、塩雲	太陽フレア、磁気嵐	火災・爆発		有毒ガス	船舶の衝突	電磁的障害	サイト内外での掘削		内部溢水	重量物輸送	化学物質の放出による水質悪化			
No.		事象		損傷・機能喪失モード		①冷却機能低下:海水系	①熱影響	②外気取入機器及び人への影響	①閉塞(取水)	①個別機器の損傷	①腐食	①誘導電流	①熱影響	②外気取入機器及び人への影響	①人への影響	①閉塞(取水)	①電磁的影響	①ケーブル・配管損傷	②斜面倒壊	①被水・没水	①燃料集合体落下、重機転倒	①冷却効率低下	②腐食		
						①冷却機能低下:海水系	①熱影響	②外気取入機器及び人への影響	①閉塞(取水)	①個別機器の損傷	①腐食	①誘導電流	①熱影響	②外気取入機器及び人への影響	①人への影響	①閉塞(取水)	①電磁的影響	①ケーブル・配管損傷	②斜面倒壊	①被水・没水	①燃料集合体落下、重機転倒	①冷却効率低下	②腐食		
1	地震系	地震	①荷重(地震荷重)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	c(III-1)	a	a	a		
			②地盤沈下(変位)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
③地面隆起(相対的な水位低下)			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
④泥湧出			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
2	津波	津波	①浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
			②荷重(衝突)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
③懸架物・波力			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
④浮力			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
3	風水害系	降水	①浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
			②荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
風(台風)		①荷重(風圧)	a	d(III-1)	d(III-1)	a	a	a	a	d(III-1)	d(III-1)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
		②閉塞(取水)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
5	竜巻	竜巻	①荷重(風圧)	a	b	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
			②荷重(気圧差)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
③荷重(衝突)			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
④閉塞(取水)			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
6	落雷	①雷サージ&誘導電流	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
7	地下水による浸食	①地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
8	積雪	積雪	①浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
			②荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
③相間短絡			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
④閉塞(空調)			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
9	霜、霜柱	①-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
10	低温	①外気温度低(凍結)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
11	低温水(海水温度低)	①-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
12	高温	①外気温度高(冷却機能低下:空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
13	高温水(海水温度高)	①海水温度高(冷却機能低下:海水系)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a		
14	霧、露	①-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
15	火山	火山	①荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
			②閉塞(取水)	a	a	a	a	d(1)	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
			③閉塞(空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
			④腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
			⑤相間短絡	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
			⑥水質汚染	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
			⑦大気汚染	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
16	地滑り	①荷重(衝突)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
17	海水中の地滑り	①閉塞(取水)	a	a	a	a	d(1)	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a			
18	土地の浸食、カルスト	①地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
19	土の伸縮	①地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
20	海岸浸食	①冷却機能低下:海水系	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
21	森林火災	①熱影響	a																						
22	生物的事象	生物的事象	②外気取入機器及び人への影響	a																					
			①閉塞(取水)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	d(1)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
23	塩害、塩雲	塩害、塩雲	①個別機器の損傷	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
			①腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
24	太陽フレア、磁気嵐	①誘導電流	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
25	火災・爆発	火災・爆発	①熱影響	a																					
			②外気取入機器及び人への影響	a																					
26	有毒ガス	①人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
27	船舶の衝突	①閉塞(取水)	a	a	a	a	d(1)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
28	電磁的障害	①電磁的影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
29	サイト内外での掘削	サイト内外での掘削	①ケーブル・配管損傷	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
			②斜面倒壊	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
30	内部溢水	①被水・没水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
31	重量物輸送	①燃料集合体落下、重機転倒	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
32	化学物質の放出による水質悪化	化学物質の放出による水質悪化	①冷却効率低下	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
			②腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	

6.3 個別評価

プラントへの影響が想定される重畳（6.2.2でc,dに分類されたもの）について、個別に検討を実施する。ここで、「重畳の結果を個別に評価するもの」、「他の重畳事象で代表させるもの」、「単一の事象の検討で包絡されている、もしくは単一の事象の設計余裕に包絡されているもの（6.2.2のc）」に整理し検討する。（例：積雪＋降水の堆積荷重は、積雪＋火山の堆積荷重以下であることからそちらで代表させる。）

検討結果を表9に示す。荷重評価については、荷重の大きさ等の観点で代表性のある、地震、積雪、火山の組み合わせに対して影響評価を実施し、問題無いことを確認した。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (1/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
1	地震(地震荷重)×積雪(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地震または積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で地震が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →評価対象施設に対する影響評価を実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 15)
2	地震(地震荷重)×火山(堆積) ※ベース負荷として積雪(堆積)及び降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地震または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に火山灰が堆積している状態で地震が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →評価対象施設に対する影響評価を実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 15)
3	風(風荷重)×積雪(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、風または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で風が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 1, 2 で代表 (添付資料 15)
4	風(風荷重)×火山(堆積) ※ベース負荷として積雪(堆積)及び降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、風または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に火山灰が堆積している状態で風が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 1, 2 で代表 (添付資料 15)
5	積雪(堆積)×火山(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(I)	安全施設は、積雪または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に火山灰と積雪が同時期に堆積した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →火山において評価
6	積雪(堆積)×降水(堆積)	d(I)	安全施設は、積雪または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で雨水が染み込むことにより荷重増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 5 (水分を含む) で代表

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (2/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
7	火山 (堆積) × 降水 (堆積)	d (I)	安全施設は、火山または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に火山灰が堆積している状態で雨水が染み込むことにより荷重増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 5 (水分を含む) で代表
8	竜巻 (飛来物) × 地震 (地震荷重)	d (II)	安全施設は、竜巻または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震により竜巻対策である固縛器具が破損した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →固縛器具が破損した場合は、安全上支障の無い期間で復旧するものとする。
9	低温 (凍結) × 地震 (地震荷重)	d (II)	安全施設は、低温または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震により常用系空調が破損した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →常用系空調が破損する規模の地震が発生した場合には、プラントは自動停止している可能性が極めて高く、また自動停止しない場合も低温影響については進展が緩やかであることからスクリーニングアウト。
10	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 地震 (地震荷重)	d (II)	安全施設は、落雷または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →避雷鉄塔が破損する規模の地震が発生した場合には、プラントは自動停止している可能性が極めて高いことからスクリーニングアウト。また、避雷鉄塔に期待しない場合の落雷による影響評価についても実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 16)
11	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 風 (風圧)	d (II)	安全施設は、落雷または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、風の影響等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 10 で代表

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (3/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
12	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 竜巻 (飛来物等)	d(Ⅱ)	安全施設は、落雷または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、竜巻の飛来物等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 10 で代表
13	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 津波 (波力等)	d(Ⅱ)	安全施設は、落雷または津波が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、津波の波力等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No. 10 で代表
14	地下水 (浸水) × 地震 (地震荷重)	c(Ⅱ)	安全施設は、地下水または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震荷重により排水設備が損壊した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
15	地下水 (浸水) × 降水 (浸水)	c(Ⅲ-1)	安全施設は、地下水または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、雨水により地下水量が増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
16	積雪 (相間短絡) × 降水 (堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、 積雪または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降水により雪が湿った場合、相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから積雪・降水の影響は受けないため、対応可能。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (4/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
17	積雪 (相間短絡) × 火山 (相間短絡)	d(I)	安全施設は、積雪または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、火山灰と積雪が同時期に堆積した等で相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから積雪・火山灰の影響は受けないため、対応可能。
18	火山 (相間短絡) × 降水 (堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、火山または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降水により火山灰が湿った場合、相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから火山灰・降水の影響は受けないため、対応可能。
19	積雪 (空調) × 火山 (空調)	d(I)	安全施設は、積雪または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、積雪と火山灰が同時期に堆積した場合、空調への影響が増長し、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →堆積高さで厳しいのは、主事象が積雪 (設計基準 167cm) , 副事象が火山 (VEI4 3cm) の組み合わせ (合計 170cm) となるが、その場合も空調給排気口 (一番低い箇所の地上高 2.8m) まで達しない。
20	地滑り (衝突) × 積雪 (堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地滑りまたは積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、雪が堆積した状態で地滑りが発生した場合、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑りの規模が増加することが考えられるが、周辺斜面と建屋については、十分な裕度を持った離隔距離が保たれている。
21	地滑り (衝突) × 降水 (堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地滑りまたは降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地滑りが発生した際に雨水で地面が湿っている場合、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑り×積雪と同様

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (5/6)

(**太字**は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
22	火山 (堆積) × 降水 (堆積)	d(Ⅲ-2)	安全施設は、火山または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。火山灰が雨水により湿ることで地滑りのような状況が発生する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑り評価で代表する。
23	低温 (凍結) × 風 (風圧)	c(Ⅲ-1)	安全施設は、低温または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、低温状態で風が発生した場合に熱伝達の変化が想定され、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →低温 (単独) の評価条件において風速は 15m/s (淡水貯水池は 3.1m/s) を仮定し、24 時間の影響評価を実施している。対して年超過確率 10^{-2} の規模は、最大風速 (10 分間平均) で新潟市 27.9m/s, 上越市 19.5m/s となるが、以下の理由で低温 (単独) の評価条件で十分包絡されるものとする。 ・台風を除いて、低温 (単独) の評価条件を超えるような風が長期間継続することは考えにくい。 ・台風については、発生時期が 6~10 月に集中することから低温が重畳する可能性は小さい。 ・低温 (単独) の風速以外の評価条件において土からの放熱に期待しない等の保守性を有している。 ・淡水貯水池については、低温 (単独) の評価条件と年超過確率 10^{-2} の規模との差が大きいものの、凍った場合も代替設備により対応可能。
24	火災・爆発 (熱影響等) × 風 (風圧)	c(Ⅲ-1)	安全施設は、火災・爆発または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、火災発生時に風が発生した場合に風速・風向による火災熱影響の評価条件の変化が想定され、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →森林火災などではガイドに基づき 16m/s の風速により評価を実施している。年超過確率 10^{-2} の規模は、最大風速 (10 分間平均) で新潟市 27.9m/s, 上越市 19.5m/s となるが、単一の評価条件における保守性 (風向設定, 温度設定, 湿度設定等) や影響継続時間 (長くても数時間程度の火災影響時に最大風速が発生する可能性は小さい) を考慮すると、影響が及ぶ可能性は極めて小さいと考えられる。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (6/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
25	風 (風圧) × 竜巻 (風圧等)	c(I)	安全施設は、風または竜巻が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、台風等により気圧分布が形成されている状況で竜巻が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →設計竜巻設定の際に使用している観測データは、風の影響についても含んだデータとなっていることから竜巻評価に包絡されている、もしくは設計竜巻設定の際の余裕に包絡されているものと考えられる。
26	溢水 (被水・没水) × 地震 (地震荷重)	c(III-1)	安全施設は、溢水または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、溢水対策等が地震により損傷した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
27	取水口閉塞関係 例：風×生物学的事象 (くらげ等)	d(I)	安全施設は、 生物学的事象等が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している 。仮に、台風等で飛散物が発生した際に同時期に くらげが発生した場合等に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる 。 → 事象単独の場合と比較して、作業量が増加する恐れがあるが、除塵装置や既に整備された手順等と同様の対応により対処可能である 。

6.3.1 アクセス性・視認性について

自然現象及び人為事象が安全施設に及ぼす影響としては、荷重だけでなく、アクセス性及び視認性に対する影響も考えられることから、これらの観点についても影響を評価する。

アクセス性及び視認性の観点からの影響評価結果を以下に示す。

アクセス性への影響確認結果

設計基準においては、屋内設備と屋内での対応により事象収束が可能であることから、自然現象による屋外のアクセス性への影響については基本的には考慮する必要が無い。ただし、設計基準においても積雪の設計基準を設定する際に建屋屋上等の除雪に期待しており、除雪の際には屋外アクセスルートを使用することから、積雪については考慮する必要がある。アクセス性に支障が出るような規模の積雪については気象予報により事前の予測が可能であることから、積雪状況等を見計らいながら除雪するという対応となる。

これらの影響及び対応については、重大事故時と差異が無いことから、以下に第四十三条での検討結果（積雪以外を含む）をまとめたものを示す。

アクセス性への影響として、保管場所の耐性、作業環境、アクセスルート（屋外/屋内）が考えられることから成立性について確認し、表 10 のような影響が存在することが確認された。事象の重畳を考慮した場合も、作業量や作業時間の増加が考えられるが、作業不能となることは考えにくく、また気象予報等により作業が困難なレベルの強風等が想定される場合はプラントを停止する等の対応も考えられる。

表 10 アクセス性についての影響及び対応

対象	事象	影響	対応
保管場所の耐性	地滑り	高台に保管している重大事故等対処設備が機能喪失	2箇所の高台に分散配置，設計基準事故対処設備により対応
	積雪，火山	重大事故等対処設備上に雪または火山灰の堆積	除雪または除灰（湿潤状態を想定した除灰体制）
	風（台風），竜巻	飛散物の発生	飛散物除去
作業環境	地震	段差等の発生	整地作業の実施
	積雪，火山	雪または火山灰の堆積	除雪または除灰
	風（台風）	屋外での作業が困難なレベルの強風	気象予報により，左記のようなレベルの強風が想定される場合はプラント停止
	落雷	落雷	警報発生時を避け対応
	低温	低温	暖機運転等
アクセスルート	地震，津波，風（台風），竜巻，地滑り，森林火災	段差や瓦礫の発生により，一部のアクセスルートが通行不能	別ルートによりアクセス可能。 また瓦礫等については，ホイールローダー等の重機により整地作業も実施可能。
	風（台風）	屋外での作業が困難なレベルの強風	気象予報により，左記のようなレベルの強風が想定される場合はプラント停止。
	降水	敷地内の浸水	構内排水路で海域へ排水するために影響なし。 万一，排水能力を超える場合も，排水用フラップゲートを介して海域へ排水されることから，緊急車両はアクセス可能。 また，気象予報を踏まえ，可搬型設備の通行に支障がある状況が予想される場合は，予め土のう設置による降水の導水対策などにより車両等の通行ルートを確保する。
	低温	低温	気象予報により事前の予測が十分可能なことからアクセスルートへの融雪剤散布が実施可能。
	積雪，火山	雪または火山灰の堆積	除雪または除灰

視認性評価結果

視認性の観点からは、降水等により中央制御室外の状況や津波を監視するカメラの視認性の低下、及び屋外作業の視認性の低下を及ぼす可能性がある。

中央制御室外の状況や津波を監視するカメラについては、降水等による視認性の低下や、竜巻等による機能喪失の可能性がある。カメラは位置的分散が図られているものの、重畳を考慮した場合にはすべてのカメラに期待できない状況も考えられる。その場合にも、中央制御室に設置する気象情報を出力する端末、潮位計等の代替設備により必要な機能を確保することができる。

また、降水や霧・靄などによって屋外作業等の視認性が低下する恐れがあるが、その場合も作業時間増加や作業効率が悪化するものの作業不能となることは考えにくい。

設計上考慮する外部事象の収集・整理

1. 外部事象の収集

発電用原子炉施設に対して外部から作用する衝撃による損傷を防止するため、自然現象や人為事象に関して、事象を収集する。事象の収集に当たっては、国内外の規制機関や学識経験者による検討結果、PRA にて挙げられたすべての事象を対象とすることで網羅性を確保した。

次に挙げる資料から、国内における規制（資料 a, b）で取り上げている事象や、国外の規制として、米国原子力規制委員会が定めた PRA についてのガイド（資料 c）や IAEA が定めたガイド（資料 d）に取り上げている事象を収集した。

- a. 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（制定 平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306193 号 原子力規制委員会決定）
- b. 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（制定 平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306194 号 原子力規制委員会決定）
- c. NUREG/CR-2300 “PRA Procedures Guide”, NRC, January 1983
- d. Specific Safety Guide (SSG-3) “Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants”, IAEA, April 2010

さらに、日本の自然現象における実例（資料 e）や、米国の原子力発電設備の維持基準に引用されている米国機械学会の規格（資料 f）、また、関連して、FLEX や大規模損壊事象を取り上げている米国 NEI のガイド（資料 g, h）で取り上げられている事象を収集することによって、網羅性を確保した。

- e. 「日本の自然災害」国会資料編纂会 1998 年
- f. ASME/ANS RA-S-2008 “Standard for Level 1/Large Early Release Frequency probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications”
- g. DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES (FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE (NEI-12-06 August 2012)
- h. B. 5. b Phase 2&3 Submittal Guideline (NEI-06-12 December 2006) - 2011. 5 NRC 公表

上記資料 a～h から収集した外部事象 83 事象（自然現象 55 事象，人為事象 28 事象）を、自然現象について表 1，人為事象について表 2 に示す。

これらの事象について、類似事象、随件事象について整理し、設計上考慮する外部事象として外部事象 62 事象（自然現象 42 事象，人為事象 20 事象）を抽出した。（表 1，表 2）

なお，地震，津波及びその随件事象（表 1 の(1-7)地震活動，及び，(1-11)津波）はそれぞれ「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則」（以下，設置許可基準規則という。）第四条（地震による損傷の防止），第五条（津波による損傷の防止）にて扱うこととし，本資料の対象外とする。

表1 文献より収集した自然現象 (1/2)

No	外部事象	外部事象を抽出した文献等**							
		a	b	c	d	e	f	g	h
1-1	凍結	○	○	○	○	○	○	○	
1-2	隕石			○	○		○	○	
1-3	降水(豪雨(降雨))	○	○	○	○	○	○	○	
1-4	河川の迂回	○		○	○		○	○	
1-5	砂嵐(塩を含んだ嵐)			○	○		○	○	
1-6	静振			○			○	○	
1-7	地震活動	○	○	○	○	○	○	○	
1-8	積雪(暴風雪)	○	○	○	○	○	○	○	
1-9	土壌の収縮又は膨張			○			○	○	
1-10	高潮			○	○	○	○	○	
1-11	津波	○	○	○	○	○	○	○	
1-12	火山(火山活動・降灰)	○	○	○	○	○	○	○	
1-13	波浪・高波			○	○	○	○	○	
1-14	雪崩			○	○	○	○	○	
1-15	生物学的事象	○	○		○		○	○	
1-16	海岸侵食	○		○			○	○	
1-17	干ばつ			○	○	○	○	○	
1-18	洪水(外部洪水)	○	○	○	○	○	○	○	
1-19	風(台風)(暴風(台風))	○	○	○	○	○	○	○	
1-20	竜巻	○	○	○	○	○	○	○	
1-21	濃霧			○			○	○	
1-22	森林火災	○	○	○	○	○	○	○	
1-23	霜, 白霜			○	○	○	○	○	
1-24	草原火災							○	
1-25	ひょう, あられ			○	○	○	○	○	
1-26	極高温			○	○	○	○	○	
1-27	満潮			○	○		○	○	
1-28	ハリケーン			○	○		○	○	
1-29	氷結, 結氷板			○	○		○	○	
1-30	氷晶				○			○	
1-31	氷壁				○				
1-32	土砂崩れ(山崩れ, がけ崩れ)					○			
1-33	落雷	○	○	○	○	○	○	○	
1-34	湖又は河川の水位低下			○	○		○	○	
1-35	湖又は河川の水位上昇			○	○	○			
1-36	陥没, 地盤沈下, 地割れ	○			○	○		○	
1-37	極限的な圧力(気圧高/低)				○				
1-38	霧				○				
1-39	塩害, 塩雲	○			○				
1-40	地面の隆起	○			○	○			
1-41	動物				○				
1-42	地滑り	○		○	○	○	○	○	
1-43	カルスト				○				
1-44	地下水(浸食, 多量/枯渇)	○			○				
1-45	海水面低				○				
1-46	海水面高				○	○			
1-47	水中の地滑り	○			○				
1-48	水中の有機物				○				
1-49	太陽フレア, 磁気嵐							○	
1-50	高温水(海水温高)			○	○	○		○	

※ 「○」は外部事象を収集した文献を示す。

表1 文献より収集した自然現象 (2/2)

No	外部事象	外部事象を抽出した文献等※							
		a	b	c	d	e	f	g	h
1-51	低温水 (海水温低)				○				
1-52	泥湧出					○			
1-53	土石流					○			
1-54	水蒸気					○			
1-55	毒性ガス			○		○	○	○	

※ 「○」は外部事象を収集した文献を示す。

表2 文献より収集した人為事象

No	外部事象	外部事象を抽出した文献等※							
		a	b	c	d	e	f	g	h
2-1	衛星の落下			○	○		○	○	
2-2	パイプラインの事故 (ガスなど)、パイプライン事故によるサイト内爆発等	○		○	○		○	○	
2-3	交通事故 (化学物質流出含む)			○	○		○	○	
2-4	有毒ガス	○	○	○			○	○	
2-5	タービンミサイル	○	○	○	○		○	○	
2-6	飛来物 (航空機衝突)	○	○	○	○		○	○	○
2-7	工業施設又は船舶の爆発			○	○		○	○	
2-8	船舶の衝突 (船舶事故)	○	○		○			○	
2-9	自動車又は船舶の爆発				○			○	
2-10	船舶から放出される固体または液体不純物				○				
2-11	水中の化学物質				○				
2-12	爆発 (プラント外での爆発)	○	○		○				
2-13	プラント外での化学物質流出				○				
2-14	サイト貯蔵の化学物質の流出			○	○		○	○	
2-15	軍事施設からのミサイル				○				
2-16	掘削工事				○				
2-17	他のユニットからの火災				○				
2-18	他のユニットからのミサイル				○				
2-19	他のユニットからの内部溢水				○				
2-20	電磁的障害	○	○		○				
2-21	ダムの崩壊	○	○		○				
2-22	内部溢水	○	○	○	○		○		
2-23	火災 (近隣工場等の火災)	○	○	○	○				
2-24	第三者の不法な接近	○	○						
2-25	航空機衝突 (意図的)	○	○		○				
2-26	妨害破壊行為 (内部脅威含む)	○	○						
2-27	サイバーテロ	○	○						
2-28	重量物落下	○	○		○				

※ 「○」は外部事象を収集した文献を示す。

(外部事象を収集した文献)

- 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」 (制定 平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306193 号 原子力規制委員会決定)
- 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」 (制定 平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306194 号 原子力規制委員会決定)
- NUREG/CR-2300 “PRA Procedures Guide”, NRC, January 1983
- Specific Safety Guide (SSG-3) “Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants”, IAEA, April 2010
- 「日本の自然災害」国会資料編纂会 1998 年
- ASME/ANS RA-S-2008 “Standard for Level 1/Large Early Release Frequency probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications”
- DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES (FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE (NEI-12-06 August 2012)
- B. 5. b Phase2&3 Submittal Guideline (NEI-06-12 December 2006)-2011.5 NRC 公表

表3 自然現象の整理

No.	自然現象	備考
1	降水	(1-3)
2	積雪	(1-8)
3	雪崩	(1-14)
4	ひょう, あられ	(1-25)
5	氷嵐, 雨氷, みぞれ	(1-25)
6	氷晶	(1-30)
7	霜, 霜柱	(1-23)
8	結氷板, 流氷, 氷壁	氷結, 結氷板 (1-29), 氷壁 (1-31)
9	風 (台風)	風 (台風) (暴風(台風)) (1-19), ハリケーン (1-28)
10	竜巻	(1-20)
11	砂嵐	(1-5)
12	霧, 霞	濃霧, 霧 (1-21), 靄 (1-38)
13	高温	(1-26)
14	低温	凍結 (1-1)
15	高温水 (海水温高)	(1-50)
16	低温水 (海水温低)	(1-51)
17	極限的な圧力 (高/低)	(1-37)
18	落雷	(1-33)
19	高潮	高潮 (1-10), 満潮 (1-27)
20	波浪	(1-13)
21	風津波	波浪・高波 (1-13)
22	洪水	(1-18)
23	池・河川の水位低下	(1-34)
24	河川の迂回	(1-4)
25	干ばつ	(1-17)

No.	自然現象	備考
26	火山	火山活動 (1-12), 水蒸気 (1-54), 毒性ガス (1-55)
27	地滑り	地滑り (1-32), 土砂崩れ (山崩れ, がけ崩れ) (1-42)
28	海水中の地滑り	水中の地滑り (1-47)
29	地面隆起 (相対的な水位低下)	地面隆起 (1-40)
30	土地の浸食, カルスト	陥没, 地盤沈下, 地割れ (1-36), カルスト (1-43)
31	土の伸縮	土壌の収縮又は膨張 (1-9)
32	海岸浸食	海岸侵食 (1-16)
33	地下水 (多量/枯渇)	(1-44)
34	地下水による浸食	(1-44)
35	森林火災	森林火災 (1-22), 草原火災 (1-24)
36	生物学的事象	生物学的事象 (1-15), 動物 (1-41), 水中の有機物 (1-48)
37	静振	静振 (1-6), 湖又は河川の水位低下 (1-34), 湖又は河川の水位上昇 (1-35), 海水面低 (1-45), 海水面高 (1-46)
38	塩害, 塩雲	(1-39)
39	隕石, 衛星の落下	隕石 (1-2), 衛星の落下 (2-1)
40	太陽フレア, 磁気嵐	(1-49)
41	土石流	(1-53)
42	泥湧出	(1-52)

※ () 内の番号は表1 自然現象, 表2 人為事象における番号

表4 人為事象の整理

No.	人為事象	備考※
1	航空機落下	(2-6)
2	ダムの崩壊	(2-21)
3	火災・爆発	交通事故(化学物質流出含む)(2-3), 爆発(プラント外での爆発)(2-12), 他のユニットからの火災(2-17), 火災(近隣工場等の火災)(2-23)
4	有毒ガス	(2-4)
5	船舶の衝突	(2-8)
6	電磁的障害	(2-20)
7	パイプライン事故	(2-2)
8	第三者の不法な接近	(2-24)
9	航空機衝突(意図的)	(2-25)
10	妨害破壊行為(内部脅威含む)	(2-26)
11	サイバーテロ	(2-27)
12	産業施設の事故	工業施設又は船舶の爆発(2-7)
13	輸送事故	自動車又は船舶の爆発(2-9)
14	軍事活動によるミサイルの飛来	(2-15)
15	サイト内外での掘削	(2-16)
16	内部溢水	他のユニットからの内部溢水(2-19), 内部溢水(2-22)
17	タービンミサイル	タービンミサイル(2-5), 他のユニットからのミサイル(2-18)
18	重量物輸送	(2-28)
19	化学物質の放出による水質悪化	船舶から放出される固体または液体不純物(2-10), 水中の化学物質(2-11), プラント外での化学物質流出(2-13), サイト貯蔵の化学物質の流出(2-14)
20	油流出	船舶から放出される固体または液体不純物(2-10)

※ () 内の番号は表2 人為事象における番号

柏崎刈羽原子力発電所における航空機落下確率

発電所周辺の飛行場、航空路及び訓練空域等を考慮した上で、「航空機落下確率評価基準」に従い、以下の項目について柏崎刈羽原子力発電所における航空機落下確率を評価する。

1. 評価対象事故

発電所及び 号炉	(1) 計器飛行方式民間航空機 の落下事故		(2) 有視界飛行 方式民間航 空機の落下 事故	(3) 自衛隊機又は米軍機の落下 事故	
	1) 飛行場での 離着陸時に おける落下 事故	2) 航空路を巡 航中の落下 事故		1) 訓練空域内で訓 練中及び訓練 空域外を飛行 中の落下事故	2) 基地－訓練空 域間往復時の 落下事故
柏崎刈羽原 子力発電所 6, 7号炉	× ^{注1}	○	○	○ ^{注2} 訓練空域外を飛行 中の落下事故	× ^{注3}

○：対象，×：対象外

注1：発電所は、新潟空港からの最大離着陸地点以遠に位置するため評価対象外とした。（別紙1）

（発電所－新潟空港の距離：約75km，新潟空港－最大離着陸地点の距離：約19km）

注2：発電所周辺上空には自衛隊機又は米軍機の訓練空域はない。（別紙2）

注3：発電所は基地－訓練空域間の往復の想定範囲内に入らないため評価対象外とした。

2. 落下確率評価結果

(1) 計器飛行方式民間航空機の落下事故

a. 航空路を巡航中の落下事故

発電所上空の航空路等としては、航空路 (V31), 広域航法経路 (Y31, Y305), 転移経路 (NAEBA TRANSITION) がある。「航空機落下確率評価基準」に従い、以下の式により航空路等を巡航中の航空機の落下確率を求める。

$$P_c = \frac{f_c \cdot N_c \cdot A}{W}$$

P_c : 対象施設への巡航中の航空機落下確率 (回/年)

N_c : 評価対象とする航空路等の年間飛行回数 (飛行回/年)

A : 発電用原子炉施設の標的面積 (km²)

W : 航空路幅 (km)

$f_c = G_c / H_c$: 単位飛行距離当たりの巡航中の落下事故率 (回/(飛行回・km))

G_c : 巡航中事故件数 (=0.5 回)

H_c : 延べ飛行距離 (=9,439,243,077 飛行回・km)

発電所名称 及び号炉 パラメータ	柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉			
対象航空路 ^{注1}	航空路 (V31)	転移経路 (NAEBA TRANSITION)	RNAV5 (Y31)	RNAV5 (Y305)
N_c ^{注2}	14600	4015	3650	182.5
A ^{注3}	0.01	0.01	0.01	0.01
W ^{注4}	14	14	18.52	18.52
F_c ^{注5}	5.30×10^{-11}	5.30×10^{-11}	5.30×10^{-11}	5.30×10^{-11}
P_c	5.53×10^{-10}	1.52×10^{-10}	1.04×10^{-10}	5.22×10^{-12}
P_c (合計)	8.14×10^{-10}			

注1：柏崎刈羽原子力発電所周辺の航空図（AIP エンルートチャート）により確認。
（別紙2）

注2：国土交通省航空局への問い合わせた結果の、上半期・下半期のピーク日の数値の大きい方を365倍した値。ただし、飛行回数が0回の航空路は保守的に0.5とした。（別紙3）

注3：原子炉建屋，コントロール建屋等の水平面積の合計値は0.01km²以下であるので標的面積は0.01km²とする。（別紙4）

注4：「航空路の指定に関する告示」及び「飛行方式設定基準」による。

注5：事故件数は，平成3年～平成22年の間で0件であるが，保守的に0.5とした。
延べ飛行距離は，平成4年～平成23年の「航空輸送統計年報，第1表 総括表，1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内の値を合計した値。（別紙5）

上記より，航空路等を巡航中の航空機の落下確率（Pc）は，約 8.14×10^{-10} （回／年）となる。

(2) 有視界飛行方式民間航空機の落下事故

「航空機落下確率評価基準」に従い，全国平均の落下確率を用いて，以下の式により柏崎刈羽原子力発電所における落下確率を求める。

$$P_v = \frac{f_v}{S_v} (A \cdot \alpha)$$

P_v：対象施設への航空機落下確率（回／年）

f_v：単位年当たりの落下事故率（回／年）

S_v：全国土面積（＝37.2万 km²）

A：発電用原子炉施設の標的面積（＝0.01km²）

α：対象航空機の種類による係数

P_vの導出にあたって，大型固定翼機，小型固定翼機，大型回転翼機及び小型回転翼機を考慮し，f_v及びαとして下表の値を用いている。

発電所名称 及び号炉 パラメータ値	柏崎刈羽原子力発電所 6, 7号炉
f_V ^{注1}	大型固定翼機 0.5/20=0.025 ^{注2} 小型固定翼機 35/20=1.75 大型回転翼機 2/20=0.1 小型回転翼機 30/20=1.5
S_V ^{注1}	372,000
A	0.01
α ^{注1}	大型固定翼機, 大型回転翼機 : 1 小型固定翼機, 小型回転翼機 : 0.1
P_V	1.21×10^{-8}

注1 : 「平成23年度 航空機落下事故に関するデータの整備」(平成24年9月 独立行政法人 原子力安全基盤機構)

注2 : 大型固定翼機の事故件数は0件であるが、保守的に0.5とした。

上記より、有視界飛行方式民間航空機の落下確率(P_V)は、約 1.21×10^{-8} (回/年) となる。

(3) 自衛隊機又は米軍機の落下事故

「航空機落下確率評価基準」に従い、以下のとおり落下確率を求める。

a. 訓練空域外を飛行中の落下事故

柏崎刈羽原子力発電所周辺上空には、自衛隊及び米軍の訓練空域は存在しない。したがって、「航空機落下確率評価基準」に従い、以下のとおり訓練空域外を飛行中の自衛隊機及び米軍機の落下確率を求める。

$$P_{so} = \left(\frac{f_{so}}{S_o} \right) \cdot A$$

P_{so} : 訓練空域外での対象施設への航空機落下確率 (回/年)

f_{so} : 単位年当たりの訓練空域外落下事故率 (=8回/20年(自衛隊機))
(=5回/20年(米軍機))

S_o : 全国土面積から全国の陸上の訓練空域の面積を除いた面積

(=29.5 万 km² (自衛隊機))

(=37.2 万 km² (米軍機))

A : 発電用原子炉施設の標的面積 (=0.01km²)

発電所名称 及び号炉 パラメータ値	柏崎刈羽原子力発電所 6, 7号炉
f_{SO} 注1	自衛隊機 8/20=0.4 米軍機 5/20=0.25
S_0 注1	自衛隊機 37.2万-7.7万=29.5万 米軍機 37.2万-0.05万≒37.2万
A	0.01
P_{SO}	1.36×10^{-8} (自衛隊機) + 6.72×10^{-9} (米軍機) = 2.03×10^{-8}

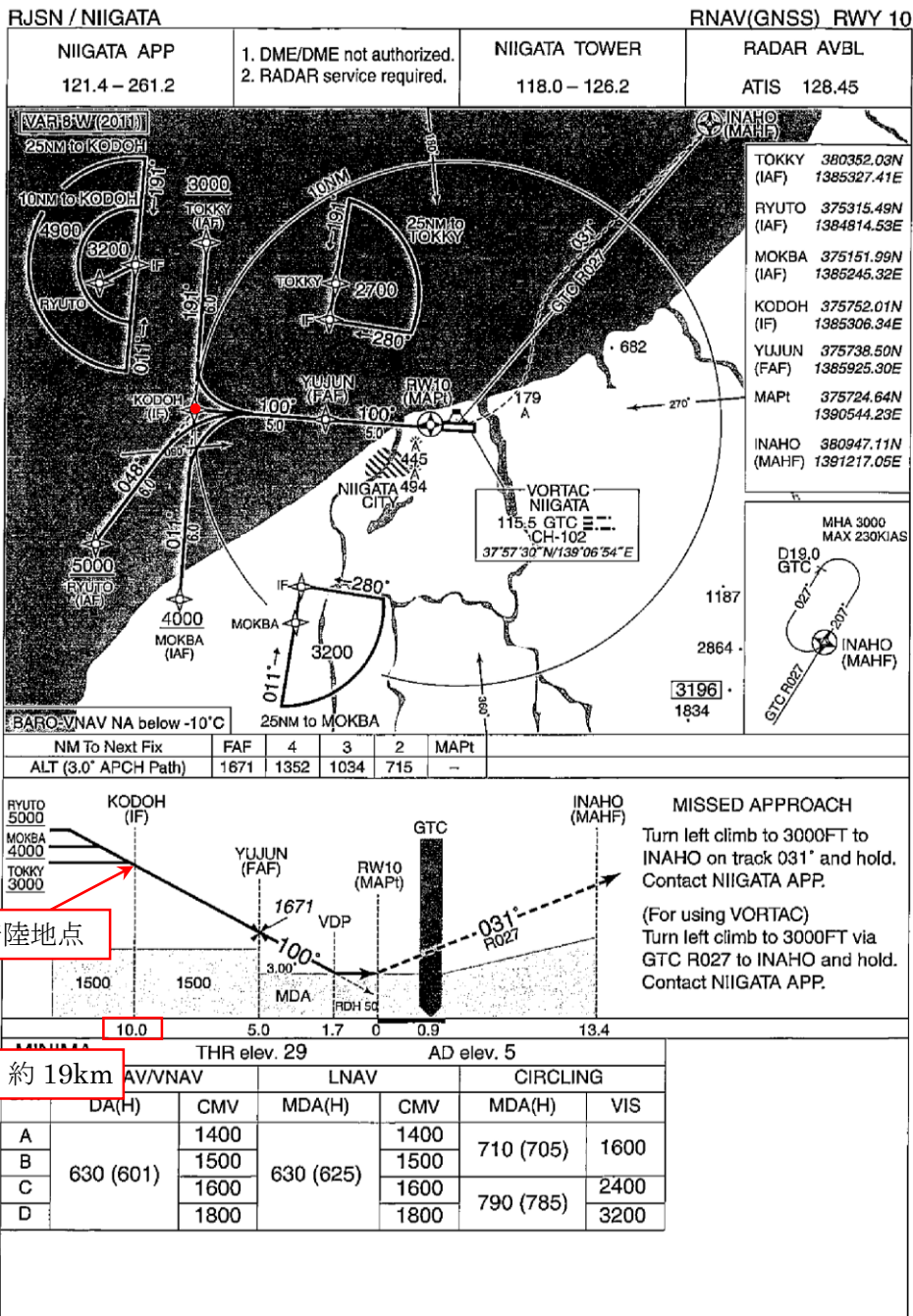
注1 : 「平成 23 年度 航空機落下事故に関するデータの整備」(平成 24 年 9 月 独立行政法人 原子力安全基盤機構)

上記より、訓練空域外を飛行中の自衛隊機及び米軍機の落下確率 (P_{SO}) は、約 2.03×10^{-8} (回/年) となる。

以上により、柏崎刈羽原子力発電所における航空機落下確率は、下表のとおり、計器飛行方式民間航空機の落下確率、有視界飛行方式民間航空機の落下確率、訓練空域外を飛行中の自衛隊機及び米軍機の落下確率の和として算定され、保守的に有効数字 3 桁目を切り上げ、約 3.4×10^{-8} (回/炉・年) となる。

評価対象落下事故	落下確率 (回/炉・年)
計器飛行方式民間航空機の落下事故	約 8.14×10^{-10}
有視界飛行方式民間航空機の落下事故	約 1.21×10^{-8}
訓練空域外を飛行中の落下事故	約 2.03×10^{-8}
合計	約 3.4×10^{-8}

INSTRUMENT APPROACH CHART



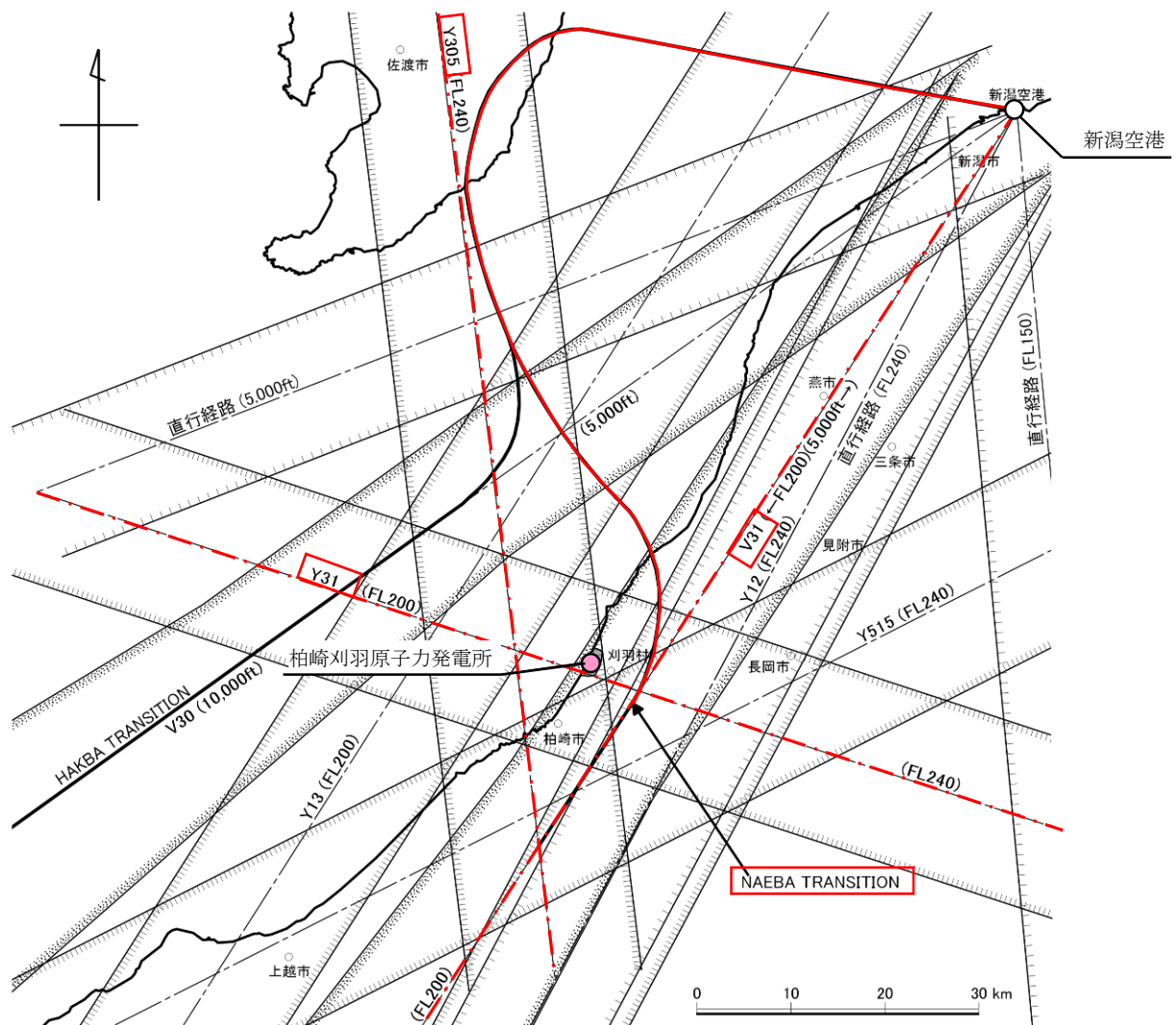
最大離着陸地点

10NM = 約 19km

(出典：AIP-JAPAN，国土交通省航空局，平成 25 年 3 月)

新潟空港の最大離着陸地点

6 条-別添 1(外事)-1-添付 2-6



- 凡例 -

	航空路
	RNAV経路
	直行経路
	航空路等の中心線
	転移経路
	民間飛行場
	()内 最低飛行高度

(出典：AIP-JAPAN，国土交通省航空局，平成 25 年 3 月)

柏崎刈羽原子力発電所周辺の航空図

評価対象となる航空路の飛行回数

1. 柏崎刈羽原子力発電所

(飛行回数)

東京管制部 ピークデイ ^{注1}	航空路 V31 (NIIGATA VORTEC-NAEBA)	広域航法経路 Y305	広域航法経路 Y31	NAEBA TRANSITION (新潟空港)
H24 年上半期 (H24. 6. 8) 交通量	40	0	10	11
H24 年下半期 (H24. 9. 19) 交通量	37	0	9	10
評価に用いる数値	40×365 日 = 14600 便/年間	0.5×365 日 = 182.5 便/年間 ^{注2}	10×365 日 = 3650 便/年間	11×365 日 = 4015 便/年間

注 1 : 国土交通省航空局に問い合わせ入手したデータ。ここでピークデイとは、東京航空交通管制部が半年間で最も多かった日のことであり、当該経路における交通量が半年間で最も多かった日とは必ずしも一致しない。

注 2 : 実際の便数は 0 であるが、保守的に 0.5 とする。

航空機落下確率評価に係わる標的面積

単位：km²

発電所	号炉	原子炉建屋 ^{注1}	コントロール建屋 (中央制御室) ^{注2}	合計 ^{注3}	標的面積
柏崎刈羽	6	0.003538	0.002378	0.005916	0.01
原子力発電所	7	0.003538	0.002378	0.005916	0.01

工事計画認可申請書記載の建屋寸法から面積を算出した。

注1：ディーゼル発電機室は原子炉建屋に含む。

注2：中央制御室は6, 7号炉合計。

注3：海水ポンプエリアは地下に設置のため除外。

延べ飛行距離について

延べ飛行距離は、平成 4 年～平成 23 年の「航空輸送統計年報，第 1 表 総括表，1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内便のみの合計値とした。

なお、国際便については、日本国内での運行距離ではないため考慮していない。また、日本に乗り入れている外国機は運行距離の実績の公開記録がないため考慮していない。

ただし、国際便及び外国機が日本国内で墜落した場合は事故件数としてカウントし、事故率が保守的となるようにしている。

	日本国機の運行距離 (飛行回・k m)
平成 4 年	307, 445, 013
平成 5 年	326, 899, 203
平成 6 年	343, 785, 576
平成 7 年	380, 948, 123
平成 8 年	397, 146, 610
平成 9 年	420, 920, 228
平成 10 年	449, 784, 623
平成 11 年	459, 973, 069
平成 12 年	480, 718, 878
平成 13 年	489, 803, 107
平成 14 年	498, 685, 881
平成 15 年	519, 701, 117
平成 16 年	517, 485, 172
平成 17 年	527, 370, 038
平成 18 年	555, 543, 154
平成 19 年	559, 797, 874
平成 20 年	554, 681, 669
平成 21 年	544, 824, 157
平成 22 年	548, 585, 258
平成 23 年	555, 144, 327
合 計	9, 439, 243, 077

防護すべき安全施設および重大事故等対象施設への考慮

1. 防護すべき安全施設

地震及び津波以外の自然現象および（故意によるものを除く）人為事象（以下、外部事象という。）に対する安全施設への要求については「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、設置許可基準規則という。）にて規定されている。設置許可基準規則における安全施設は、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」の安全重要度クラス 1, 2, 3 に属する構築物、系統および機器を指していることから、各外部事象に対して防護する安全施設は、安全重要度クラス 1, 2, 3 に属する構築物、系統及び機器とする。

設置許可基準規則には安全施設に対し、以下のように規定されている。

【抜粋】実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

設置許可基準規則	解釈
<p>第六条（外部からの衝撃による損傷の防止）</p> <p>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>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発電用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>	<p>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（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含む。</p> <p>7 第 3 項は、設計基準において想定される発電用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（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含む。</p>

設置許可基準規則 第二条 用語の定義より抜粋

- ・ 「安全施設」とは、設計基準対象施設のうち、安全機能を有するもの
- ・ 「安全機能」とは、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能

重要度分類指針*より抜粋

- ・ 安全機能を有する構築物、系統及び機器をそれが果たす安全機能の性質に応じて、以下の 2 種に分類
 - (1) 異常発生防止系（以下、PS という。）
 - (2) 異常影響緩和系（以下、MS という。）
- ・ PS 及び MS のそれぞれに属する構築物、系統及び機器を、その有する安全機能の重要度に応じて、それぞれクラス 1, 2, 3 に分類

※：発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針

2. 重大事故等対処施設への考慮

設計基準事象に対して耐性を確保する必要があるのは設計基準事故対処設備であり、重大事故等対処施設ではないが、第四十三条の要求を踏まえ、設計基準事象によって、設計基準事故対処設備の安全機能と重大事故等対処設備が同時にその機能が損なわれることがないことを確認する。

重大事故等対処設備については、設置許可基準にて以下のように規定されている。

【抜粋】実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

第四十三条（重大事故等対処設備）

重大事故等対処設備は、次に掲げるものでなければならない。

第2項第3号 常設重大事故防止設備は、共通要因によって設計基準事故対処設備の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものであること。

第3項第7号 重大事故防止設備のうち可搬型のものは、共通要因によって、設計基準事故対処設備の安全機能、使用済燃料貯蔵槽の冷却機能若しくは注水機能又は常設重大事故防止設備の重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものであること。

設計基準設定において参考とする年超過確率評価について

1. 設計基準の設定について

設計基準を設定する際には、過去の経験データを参照し、十分余裕をもった値を設定すべきであることから、観測記録の最大値、及び規格・基準類を参照すれば十分とも考えられる。ただし、福島第一原子力発電所事故の教訓から極低頻度事象を想定することが必要であると認識されることから、過去 50 年程度の観測記録や、同程度の過去データを基に作成されていると考えられる規格・基準類を参照するだけでなく、不確かさを踏まえた上で可能な限り確率論的な考え方も参考として導入することが必要と考えられる。また、設計基準を設定する際の参考として年超過確率を評価・確認することは、今後新たなデータが出てきた場合に知見を反映し、その感度を見ることができるという利点がある。

I 規格基準類に基づく設定

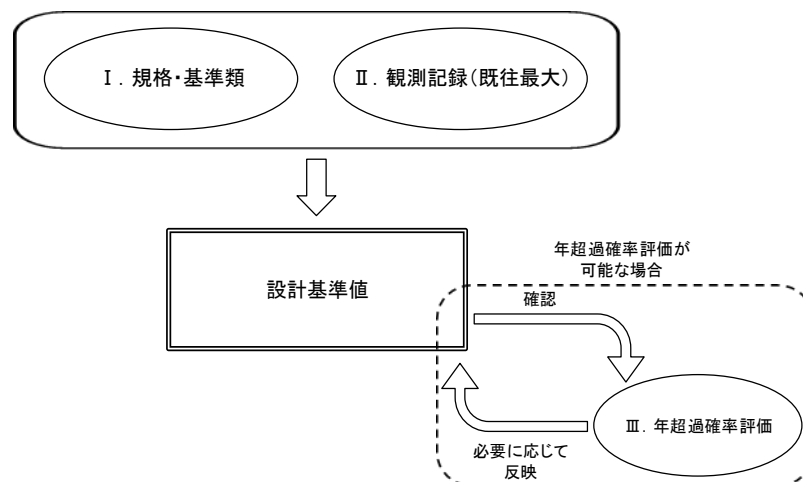
選定した自然現象に関する規格・基準類が存在する場合、それに参照する。

II 観測記録に基づく設定

柏崎刈羽原子力発電所及びその周辺における観測記録を調査の上、極値を参照する。

III 年超過確率評価に基づく設定

柏崎刈羽原子力発電所及びその周辺における観測記録を基に年超過確率評価を実施し、上記 I，II により設定した設計基準値について年超過確率を確認する。自然現象の特性に応じた想定すべき年超過確率の規模（後述）を、I，II により設定した設計基準値が下回る場合には、年超過確率評価を基にした設計基準値の見直しを図る。



2. 設計基準設定の参考とする年超過確率の規模について

2.1 自然現象の特性整理

想定すべき年超過確率については、対象とする自然現象の特性に応じた設定とする必要がある。プラントが苛酷な状況となる可能性があり、影響の有無、程度の評価を行うべき外部事象（2次評価の対象となる、風（台風）、竜巻、低温（凍結）、降水、積雪、落雷、地滑り、火山、生物学的事象）のうち、年超過確率評価が可能な事象は、風（台風）・竜巻・低温（凍結）・降水・積雪・落雷となる。これらの事象について特性を整理した検討フロー及び結果について図 1 に示す。

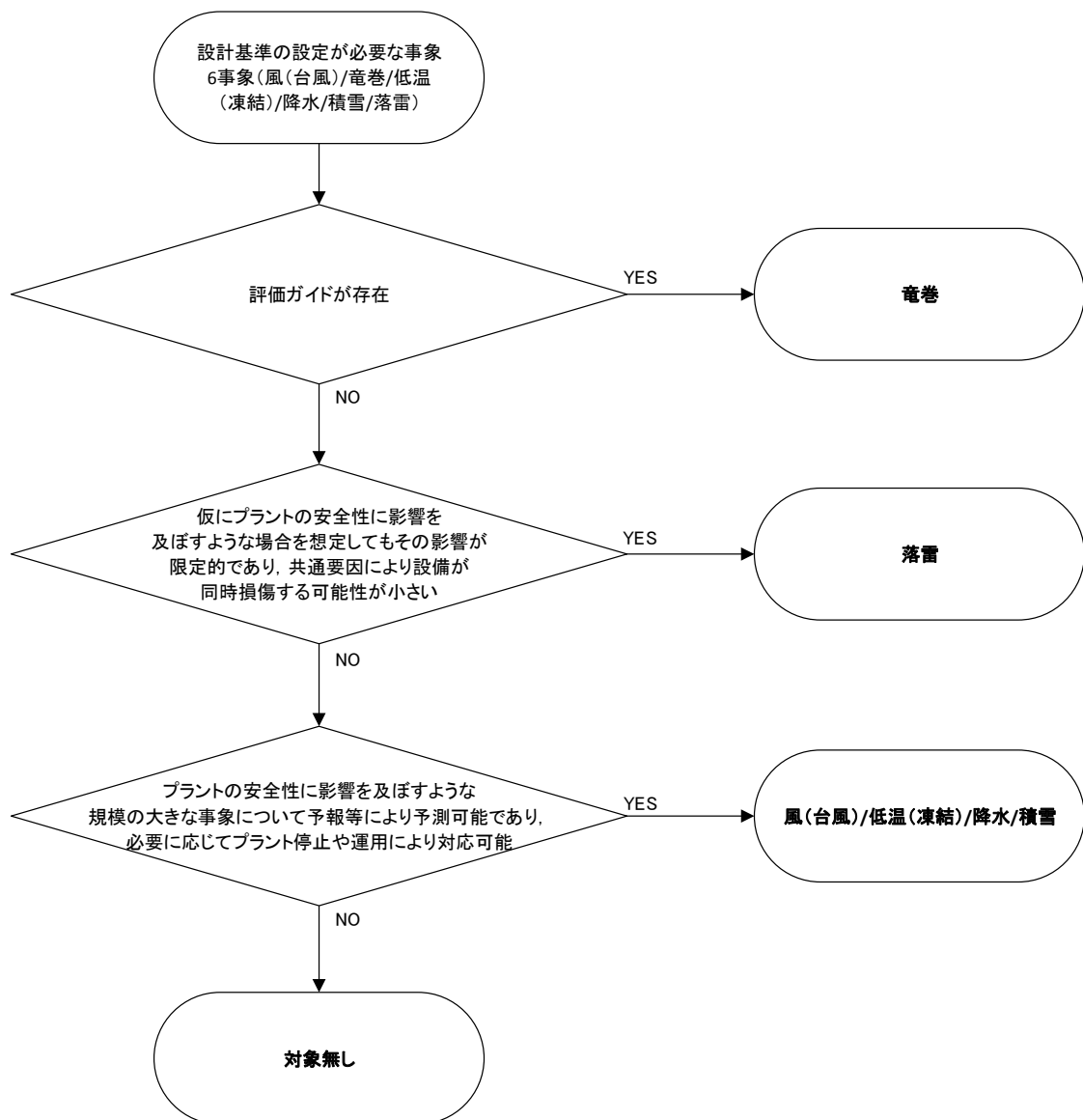


図 1 自然現象の特性整理フロー

2.2 年超過確率検討事例

整理された各自然現象についての設定する際には以下のような事例と比較し、参考とした。

- ① 設計基準地震動について、年超過確率を参照すると 10^{-4} /年～ 10^{-5} /年に相当する値になっている。
- ② 設計基準津波について、年超過確率を参照すると 10^{-4} /年～ 10^{-5} /年に相当する値となっている。
- ③ 従来の安全設計評価指針では、評価すべき事象の内、運転時の異常な過渡変化については“発電用原子炉施設の寿命期間中に予想される事象”，事故については“発電用原子炉施設の寿命期間中にまれではあるが発電用原子炉施設の安全性を評価する観点から想定する必要がある事象”としている。プラント寿命期間中（数十年程度）に1回の頻度は 10^{-1} /年～ 10^{-2} /年程度となることから、過渡変化は 10^{-1} /年～ 10^{-2} /年、事故は 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年程度の発生頻度と考えられる。
- ④ 諸外国のその他自然現象に関する基準を参照すると、国により対象とする自然現象の種類や基準に差は見受けられるものの、年超過確率 10^{-2} /年～ 10^{-5} /年（概ね年超過確率 10^{-4} /年）となる値を基準としている（欧州各国ストレステスト報告書より）。

2.3 各自然現象に適用する年超過確率

2.1にて整理した特性を考慮し、各自然現象に対して適用する年超過確率の値を検討する。その他自然現象に適用する年超過確率の共通する考え方としては、2.2 ③の事故の発生頻度 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年程度を目安とするが、各自然現象のプラントへの影響度等に応じた設定とする。

【竜巻】

- ・竜巻については、データの不確かさが比較的大きいことから 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年より1桁下げた範囲（ 10^{-4} /年～ 10^{-5} /年）での更に保守側の値 10^{-5} /年を確認するものとする。また、ガイドにおいても 10^{-5} /年（暫定値）としている。

【落雷】

- ・影響範囲が広範囲であり共通要因による損傷の可能性が大きい地震・津波（ 10^{-4} /年～ 10^{-5} /年）から1桁上げた範囲（ 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年）での保守側の値 10^{-4} /年を確認する。

【風（台風含む）・低温・降水・積雪】

- ・プラントの安全性に影響を与えるような規模の大きな事象について事前に対処が難しい地震・津波（ 10^{-4} /年～ 10^{-5} /年）から1桁上げた範囲（ 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年）での保守側の値 10^{-4} /年を確認する。

3. 過去の経験データからハザードを設定することの妥当性

上記 1. の通り、設計基準設定の際には、過去の経験データの極値及び規格基準類以外にも、参考として年超過確率評価を実施し、最も厳しい値を採用しているが、それらは全て過去の経験データに基づいた設定と言える。

基本的にプラント寿命は、大規模な気候変動の周期よりも短いと考えられるが、各自然現象について将来的な気候変動により厳しい傾向となることは否定できない。そのため、過去の経験データを用いて、将来的なハザードを予測するという点については十分な吟味が必要であり、特にプラント寿命の間に変化が予想される事象については、特別な配慮を与える必要がある。

将来的な気候変動として現時点でも予想されるものとしては地球温暖化が挙げられ、地球温暖化が進行した際には、気温上昇や台風の強度が強まる傾向が考えられるものの、現時点の柏崎周辺での経験データからは地球温暖化による有意な影響は観測されていない（図 2 参照）ことから、設計基準への特別な配慮は不要と考える。

ただし、気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

なお、台風の勢力の変化について、下記文献では、日本を含む東アジア諸国に過去襲来した台風の最大風速の年平均値が 1970 年代後半からの過去約 40 年間で 8m/s 程度の上昇傾向にあるとしている。

[Wei Mei, Shang-Ping Xie, Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970's, Nature Geoscience, vol. 9, Oct. 2016](#)

上記文献は、各台風の寿命中の最大風速に着目しているが、台風は新潟県に襲来するまでに勢力が弱まり風速が小さくなる傾向にある（添付資料 5 参照）こと、すでに述べたようにサイト周辺の最大風速の観測データに有意な変動は見られないことから、年超過発生確率の算出に影響を与えるものではない。また、風（台風）の年超過発生確率の算出にあたっては、柏崎市の観測記録に比べ風速の大きい傾向にある新潟市の観測記録を参照したことによる保守性があり、仮に柏崎市の観測記録から算出した年超過発生確率 10^{-4} /年の値に上記文献の上昇傾向（40 年間で 8m/s 程度）を加味したとしても、新潟市の観測記録から算出した年超過発生確率 10^{-4} /年の値 39.0m/s に包絡される（添付資料 5 参照）。

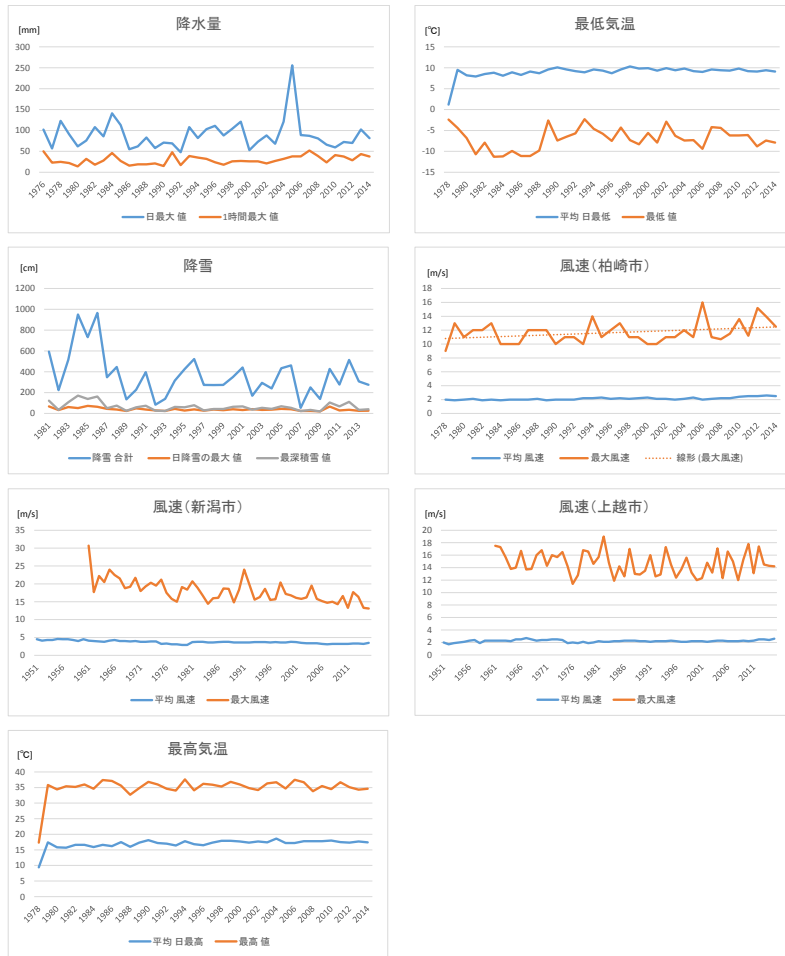


図 2 気候トレンド

風（台風）影響評価について

1. 基本方針

予想される最も苛酷と考えられる条件として設計基準を設定の上、安全施設の機能が風荷重に対して維持され、安全機能が損なわれないよう設計する。

2. 基準風速の設定

基準風速の設定は、以下の(1)及び(2)を参照するとともに、参考として(3)を評価・確認のうえ、最大風速（地上高 10m, 10 分間平均風速の日最大風速）のうち最も保守的となる値を採用する。

なお、最大瞬間風速等の風速変動といった局所的かつ一時的な影響であれば、竜巻の最大瞬間風速の影響に包絡されるが、ここでは風（台風）の影響範囲、継続性を鑑み、風（台風）に対して基準風速を設定する。

基準風速の設定にあたっては、最大風速を採用することにより、その風速の 1.5～2 倍程度の最大瞬間風速⁽¹⁾を考慮することになること、現行の建築基準法では最大瞬間風速等の風速変動による影響を考慮した係数を最大風速に乘じ風荷重を算出することが定められていることから、基準風速としては最大風速を設定する。（詳細は次頁参照）

(1) 規格・基準類

風に対する建築物の規格・基準として、発電用原子炉施設建設時の建築基準法施行令第 87 条（以下、「旧建築基準法施行令」という。）においては、日本最大級の台風の最大瞬間風速（63m/s, 地上高 15m）に基づく風荷重に対する設計が要求されていた。

その後、建築基準法施行令第 87 条の風荷重規定は 2000 年に改正され、それ以降、建築物については、地域毎に定められた基準風速の風荷重に対する設計が要求されており、柏崎市及び刈羽村の基準風速は 30m/s（地上高 10m, 10 分間平均風速）である。

屋外設備のうち、タンクについては、消防法（危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示第 4 条の 19）において、日本最大級の台風の最大瞬間風速（63m/s, 地上高 15m）に基づく風荷重に対する設計が、現在でも要求されている。

(2) 観測記録

気象庁の気象統計情報における風速の観測記録⁽¹⁾（別紙 1）によれば、柏崎市の地域気象観測システム（アメダス）、新潟地方気象台（新潟市）及び高田特別地域気象観測所（上越市）で観測された観測史上 1 位の最大風速及び最

大瞬間風速は下記のとおりである。また、新潟県内（佐渡島、粟島を除く）の各観測地点における観測記録（別紙2）を参照した結果、新潟市の観測記録を上回ることがないことを確認した。

ただし、刈羽村については、風速等を観測する気象庁の地域気象観測システム（アメダス）が設置されていないため、気象庁の気象統計情報に観測記録はない。

台風の時速記録（別紙3）において、新潟市に台風が接近または通過の際の時速の観測記録を参照した結果、新潟県に台風が襲来するまでに台風の勢力は弱まり風速が小さくなっているため、台風の影響には地域性があり、風（台風）の時速設定の際には、その地域性を考慮する必要があることを確認した。

柏崎市：最大風速 16m/s

（2006年4月11日，統計期間：1978年11月～2013年3月）

最大瞬間風速 32.5m/s

（2012年4月3日，統計期間：2008年3月～2013年3月）

新潟市：最大風速 40.1m/s

（1929年4月21日，統計期間：1886年1月～2013年3月）

最大瞬間風速 45.5m/s

（1991年9月28日，統計期間：1937年1月～2013年3月）

上越市：最大風速 23.1m/s

（1959年4月5日，統計期間：1922年1月～2013年3月）

最大瞬間風速 42.0m/s

（1998年9月22日，統計期間：1937年1月～2013年3月）

ここで、時速設定にあたり、各時速の定義を確認する。

気象庁の時速の観測については、時速（地上高10m，10分間平均）及び瞬間時速（地上高10m，3秒間平均）を記録している。「最大時速」は、時速（地上高10m，10分間平均）の日最大時速を、「最大瞬間時速」は、瞬間時速（地上高10m，3秒間平均）の日最大瞬間時速をいい、一般的に最大瞬間時速と最大時速の比は1.5～2倍程度とされている⁽¹⁾。（例えば、最大時速40m/sの場合は、60～80m/s程度の瞬間的な風が吹く可能性がある）

旧建築基準法施行令では、最大瞬間時速（63m/s，地上高15m）を参照していたが、現行の建築基準法施行令では、地上高10mにおける10分間平均時速を基準としている。ただし、現行の建築基準法施行令でも、風荷重の算出において、最大瞬間時速等の時速変動による影響を考慮し、時速に地表面粗度等により求められるガスト影響係数を乗じ速度圧を算出することが定められている。これにより、旧建築基準法施行令では全国ほぼ一律で定められていた風荷重を、現在では建築物の周辺状況及び構造特性等に応じて定

めることが可能となった。このような状況を踏まえ、安全設計上考慮する基準風速の定義は、現行の建築基準法に準拠し、地上高 10m での 10 分間平均風速を採用する。

以上を踏まえると、基準風速は、上記の柏崎市、新潟市及び上越市における観測史上 1 位の最大風速（地上高 10m, 10 分間平均風速の日最大風速）のうち、保守的に最も風速が大きい新潟市の最大風速である 40.1m/s とする。

(3) 年超過確率評価

年超過確率の評価は、気象庁「異常気象リスクマップ」⁽¹⁾（別紙 4）の手法により新潟市における統計期間（1961～2012 年）内の最大風速から評価した。評価結果となるハザード曲線を図 1 に示す。また、上記(1)及び(2)での最大値（最大風速 40.1m/s）について年超過確率を確認した結果、 6.4×10^{-5} /年となった。参考として、新潟市の最大風速について年超過確率 10^{-4} /年の値は、39.0m/s となった。

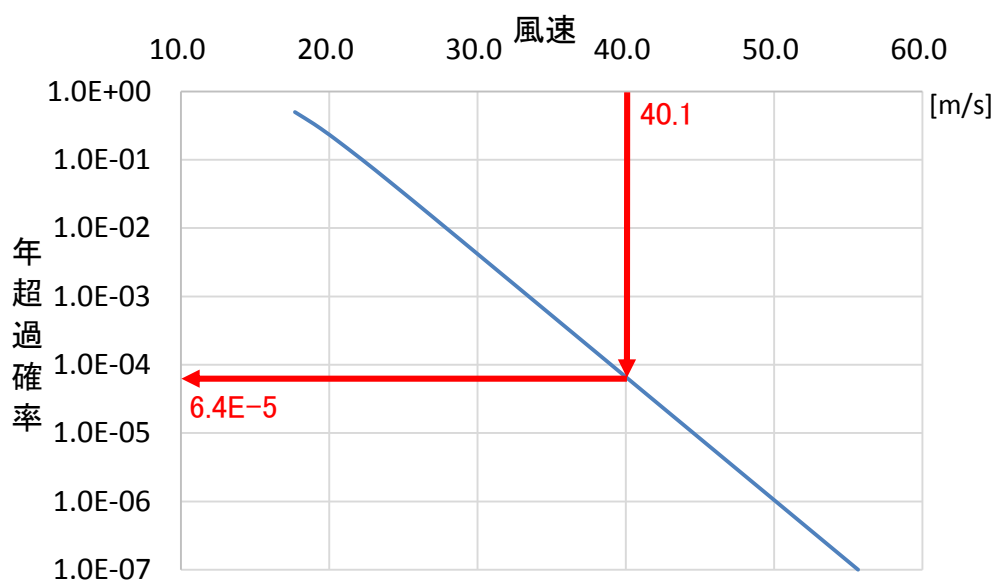


図 1 最大風速（新潟市）ハザード曲線

以上より、基準風速として使用する値としては、(2)観測記録の値である新潟市における観測史上 1 位の最大風速（地上高 10m, 10 分間平均風速の日最大風速）である 40.1m/s を定める。

ただし、タンクについては、消防法に従い、日本最大級の台風の最大瞬間風速に基づいた風荷重に対する設計が要求されていることから、設計対象物に応じ、消防法にて要求される風荷重と上記基準風速の風荷重を比較し、大きい方を採用する。

なお、建屋等に対しては、消防法に基づく風荷重の要求はないが、仮に消防法に基づくタンクの風荷重の計算方法を、7号機原子炉建屋に当てはめた場合であっても、風荷重の値は 2.94kN/m^2 であり、建築基準法に基づく風荷重(2.91kN/m^2)と概ね同じであり、設計用地震力に比べ十分小さいことから、安全機能を損なうことはない。

3. 安全施設の健全性評価

安全施設が、 40.1m/s （地上高 10m 、 10 分間平均）の風（台風）によって安全機能を損なわない設計であることを評価・確認するため、 40.1m/s の風（台風）に対する風荷重が安全施設に作用した場合の影響について評価し、安全機能が維持されることを確認した。

本評価における基本的な考え方は、以下の通り。また、図2に風（台風）に対する安全施設の評価フローを示す。

- 防護対象である安全施設のうち、外部事象防護対象施設について、以下の①又は②に分類の上、評価し、安全機能が維持できることを確認した。
- ①頑健性のある建屋内に設置されている設備については、 40.1m/s の風（台風）に対する風荷重が作用した場合における当該の建屋の健全性を確認することにより、安全機能を損なわないことを確認した。（別紙5）
- ②建屋外に設置されている設備については、当該の設備に 40.1m/s の風（台風）に対する風荷重（タンクについては、 40.1m/s の風荷重及び消防法に基づく風荷重）が作用した場合においても、安全機能を損なわないことを確認した。（別紙5）
- 上記以外の安全施設については、風（台風）に対して機能維持する、又は、風（台風）による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能な設計とすることにより、安全機能が維持可能である場合には影響評価完了とする。（別紙5）

なお、台風の発生に伴う飛来物の影響は、竜巻影響評価にて想定している設計飛来物の影響に包絡されており、安全施設の安全機能が損なわれるおそれはない。

4. 重大事故等対処設備に対する考慮

図3の風（台風）に対する重大事故等対処設備の評価フローに基づき、 40.1m/s の風（台風）に対し、必要な安全機能を維持できることを確認した。また、別紙5に重大事故等対処設備を内包する建屋の健全性確認結果を示す。

なお、風（台風）に対する重大事故等対処設備の設計方針は、設置許可基準規則第43条（重大事故等対処設備）にて考慮する。

5. 参考文献

(1) 気象庁 : <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

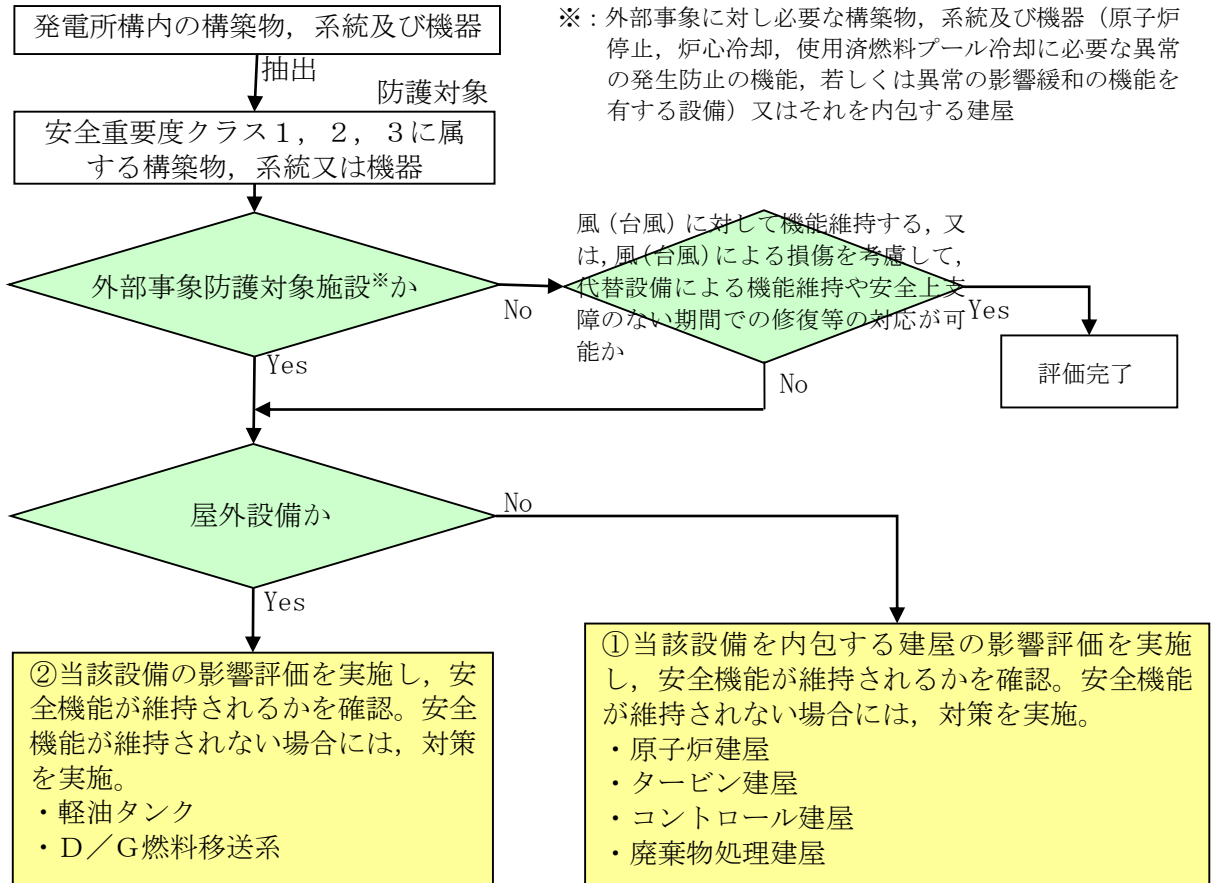
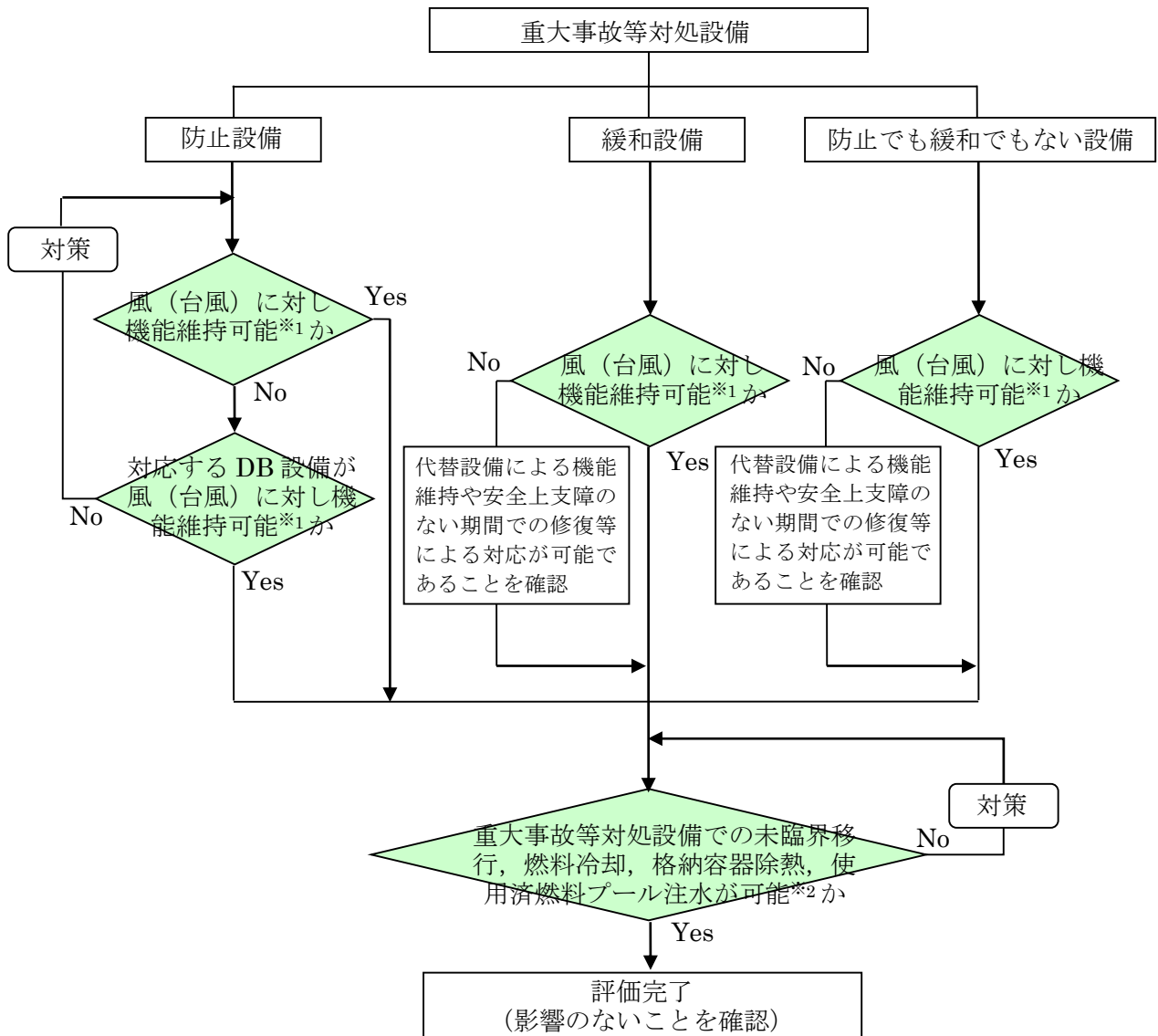


図2 風(台風)に対する安全施設の評価フロー



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋（原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋）の影響評価を実施し、安全機能が維持されることを確認。

※2：風（台風）に対して設計基準事故対処設備の安全機能は維持されるため、風（台風）により重大事故等対処設備の機能と設計基準事故対処設備の安全機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図3 風（台風）に対する重大事故等対処設備の評価フロー

表 1-1 観測記録（柏崎市）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
1978	9]	—
1979	13	—
1980	11	—
1981	12	—
1982	12	—
1983	13	—
1984	10	—
1985	10	—
1986	10	—
1987	12	—
1988	12	—
1989	12	—
1990	10	—
1991	11	—
1992	11	—
1993	10	—
1994	14	—
1995	11	—
1996	12	—
1997	13	—
1998	11	—
1999	11	—
2000	10	—
2001	10]	—
2002	11	—
2003	11	—
2004	12	—
2005	11	—
2006	16	—
2007	11	—
2008	10.7	20.2]
2009	11.5	21.6
2010	13.6	31.5
2011	11.2	24.4
2012	15.2	32.5
2013	11.1	22.8

値] : 資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

表 1-2 観測記録（新潟市）（1/3）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
1886	なし	なし
1887	なし	なし
1888	なし	なし
1889	なし	なし
1890	なし	なし
1891	なし	なし
1892	なし	なし
1893	なし	なし
1894	なし	なし
1895	なし	なし
1896	なし	なし
1897	なし	なし
1898	なし	なし
1899	なし	なし
1900	なし	なし
1901	なし	なし
1902	なし	なし
1903	なし	なし
1904	なし	なし
1905	なし	なし
1906	なし	なし
1907	なし	なし
1908	なし	なし
1909	なし	なし
1910	なし	なし
1911	なし	なし
1912	なし	なし
1913	なし	なし
1914	なし	なし
1915	なし	なし
1916	なし	なし
1917	なし	なし
1918	なし	なし
1919	なし	なし
1920	なし	なし
1921	なし	なし
1922	なし	なし
1923	なし	なし
1924	なし	なし
1925	18.1	なし

なし: この要素の観測を行っていない場合、測器の故障等で観測できなかった場合や、
火災や戦災等で資料を失った場合など

表 1-2 観測記録（新潟市）（2/3）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
1926	24.8	なし
1927	22.6	なし
1928	29.8	なし
1929	40.1	なし
1930	22.9	なし
1931	34.5	なし
1932	29.8	なし
1933	27.2	なし
1934	27.9	なし
1935	26.4	なし
1936	30.0	なし
1937	32.7	37.0
1938	33.0	30.8]
1939	21.0	26.9]
1940	22.0	29.4]
1941	22.7	31.0
1942	21.7	31.5
1943	19.0	27.8
1944	29.0	34.5
1945	27.7	36.9
1946	22.7	30.8
1947	22.7	33.7
1948	20.0	27.0
1949	24.8	34.1
1950	24.8	34.7
1951	22.6	28.0
1952	21.1	28.3
1953	18.2	33.7
1954	25.8	37.2
1955	21.7	33.6
1956	22.6	31.2
1957	24.5	41.4
1958	22.9	32.3
1959	20.2	31.3
1960	22.9	33.6
1961	30.7	44.5
1962	17.7	28.2
1963	22.2	33.2
1964	20.5	38.4
1965	24.0	37.6
1966	22.5	35.0

なし：この要素の観測を行っていない場合、測器の故障等で観測できなかった場合や、
火災や戦災等で資料を失った場合など

値]：資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

表 1-2 観測記録（新潟市）（3/3）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
1967	21.5	30.0
1968	18.8	27.4
1969	19.2	31.8
1970	21.7	32.8
1971	18.0	29.4
1972	19.3	31.3
1973	20.3	32.5
1974	19.5	32.5
1975	21.2	33.1
1976	17.5	30.2
1977	15.8	26.6
1978	15.0	26.3
1979	19.1	33.0
1980	18.4	29.3
1981	20.7	37.5
1982	18.9	31.8
1983	16.7	27.8
1984	14.4	29.0
1985	16.0	26.0
1986	16.1	28.1
1987	18.7	29.8
1988	18.6	29.6
1989	14.8	26.4
1990	18.4	31.0
1991	24.0	45.5
1992	19.8	35.8
1993	15.6	28.1
1994	16.3	30.4
1995	18.6	31.2
1996	15.5	28.0
1997	15.7	28.8
1998	20.4	38.8
1999	17.2	35.4
2000	16.8	35.8
2001	16.1	29.7
2002	15.8	27.6
2003	16.2	29.5
2004	19.5	37.1
2005	15.8]	33.2]
2006	15.2	34.7
2007	14.7	30.6
2008	15.0	25.2
2009	14.3	24.8
2010	16.6	26.3
2011	13.3	25.7
2012	17.7	33.6
2013	12.9	23.3

値] : 資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

表 1-3 観測記録（上越市）（1/3）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
1922	15.5]	なし
1923	11.0	なし
1924	14.0	なし
1925	12.0	なし
1926	12.0	なし
1927	15.2	なし
1928	12.1	なし
1929	11.5	なし
1930	12.8	なし
1931	12.9	なし
1932	13.5	なし
1933	15.1	なし
1934	13.4	なし
1935	12.8	なし
1936	12.5	なし
1937	12.0	22.4
1938	12.1	18.6
1939	9.7	16.5
1940	15.0	20.8
1941	17.5	19.3
1942	16.8	18.8
1943	13.2	21.3
1944	14.3	18.0
1945	16.0	23.7
1946	14.2	22.0
1947	14.3	22.2
1948	12.8	19.8
1949	15.0	21.0
1950	16.1	19.3
1951	15.7	23.3
1952	11.8	22.1
1953	13.5	24.0]
1954	17.7	26.0
1955	16.5	28.1
1956	17.2	28.4
1957	17.4	23.5
1958	15.0	24.2
1959	23.1	28.0
1960	16.1	24.4

なし：この要素の観測を行っていない場合，測器の故障等で観測できなかった場合や，
火災や戦災等で資料を失った場合など

値]：資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

表 1-3 観測記録（上越市）（2/3）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
1961	17.5	34.8
1962	17.3	28.6
1963	15.7	28.0
1964	13.8	27.3
1965	14.0	31.1
1966	16.7	28.7
1967	13.7	27.4
1968	13.8	27.1
1969	16.0	28.6
1970	16.8	32.6
1971	14.3	28.4
1972	16.0	30.2
1973	15.7	33.0
1974	16.5	29.6
1975	14.2	26.8
1976	11.4	26.6
1977	12.8	26.2
1978	16.8	30.6
1979	16.6	33.2
1980	14.6	27.4
1981	15.7	34.0
1982	19.0	40.3
1983	14.8	27.2
1984	11.9	27.1
1985	14.2	29.4
1986	12.6	25.2
1987	17.0	32.1
1988	13.0	28.0
1989	12.9	27.8
1990	13.5	29.8
1991	16.0	31.2
1992	12.6	26.4
1993	12.9	27.8
1994	17.3	34.7
1995	14.5	31.9
1996	12.4	27.4
1997	13.7	27.4
1998	15.6	42.0
1999	13.2	28.1
2000	12.0	26.5

表 1-3 観測記録（上越市）（3/3）
（気象庁ホームページより）

年	最大風速 [m/s]	最大瞬間風速 [m/s]
2001	12.3	25.5
2002	14.8	33.0
2003	13.2	29.7
2004	17.1	33.9
2005	12.3	27.9
2006	16.6	32.0
2007	15.0	30.0
2008	12.0	24.4
2009	15.3	29.1
2010	17.8	31.9
2011	13.1]	24.9]
2012	17.4	31.5
2013	13.8	25.6

値] : 資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

新潟県内（佐渡島，粟島を除く）の各観測地点において観測された
観測史上 1 位の日最大風速，日最大瞬間風速

新潟県内の各観測地点の位置を図 2-1 に示す。図 2-1 の観測地点のマークの違いは、表 2-1 に示すとおり観測要素の違いを表している。

各観測地点において観測された日最大風速を表 2-2，日最大瞬間風速を表 2-3 に示す。ただし，参照する観測地点は，佐渡島，粟島を除き，上越地方，中越地方及び下越地方の観測地点の内，観測要素に風を含んでいる観測地点とする。

表 2-2，2-3 より新潟市の日最大風速及び日最大瞬間風速は，何れも新潟県内で最も大きく，柏崎市の記録と比べても十分大きいことから，柏崎刈羽原子力発電所の基準風速設定の際に新潟市の風速を参照し，最大のものを採用することにより保守性は確保される。

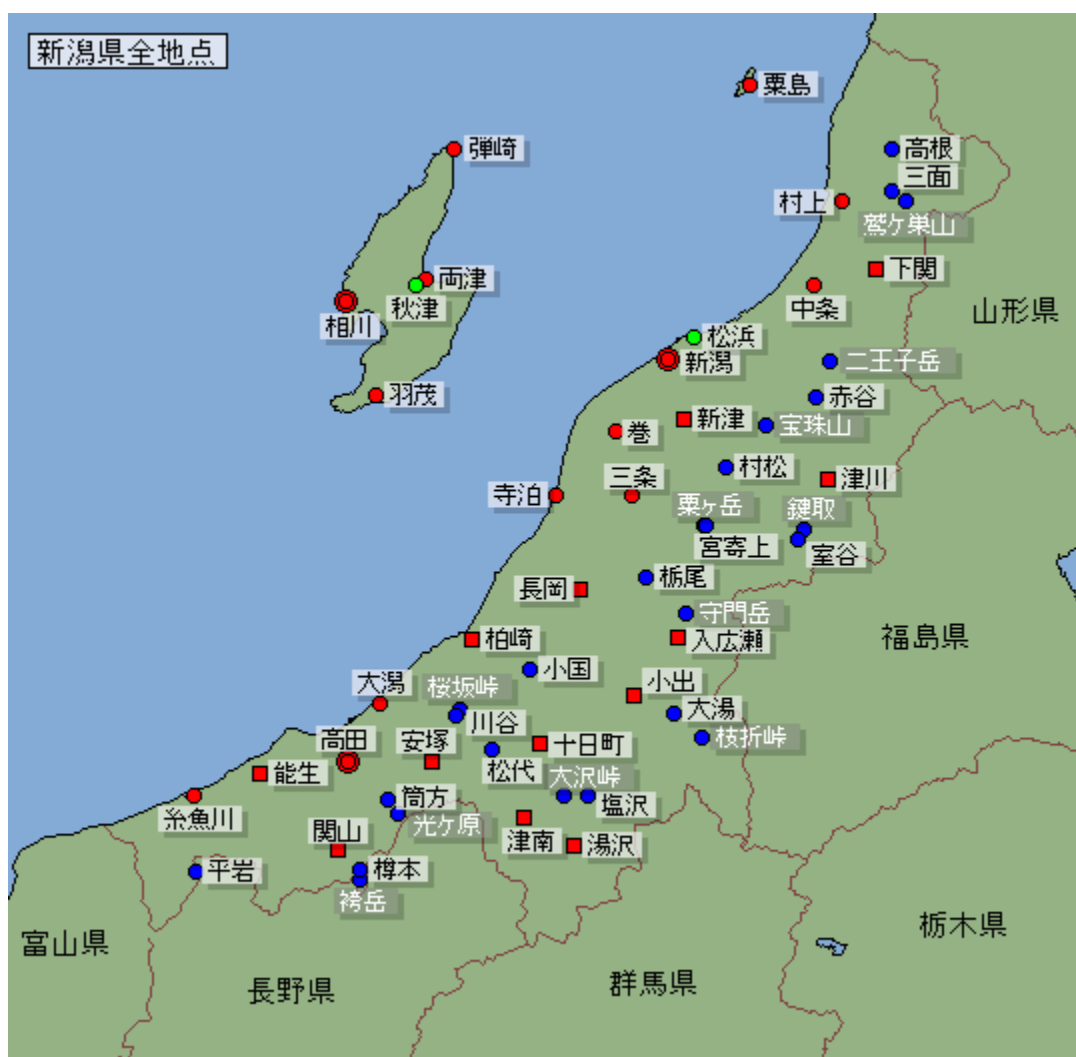


図 2-1 新潟県内の気象観測地点(気象庁ホームページより)

表 2-1 観測地点の種類及び観測要素（気象庁ホームページより）

マーク	地点の種類	観測要素
●	気象台等	降水量，風，気温，日照時間，積雪，気圧，湿度，天気など
●	アメダス	降水量，風，気温，日照時間
■	アメダス	降水量，風，気温，日照時間，積雪
●	アメダス	降水量，風，気温（一部の観測所は気温を除く）
■	アメダス	降水量，風，気温，積雪
●	アメダス	降水量
■	アメダス	降水量，積雪
□	アメダス	積雪

- 年代により，要素が異なる場合がある。
- 白地に黒い文字の観測所は現在運用中，白い文字の観測所は観測を終了した地点。一部の観測所では，季節により観測を休止する要素がある。

表 2-2 新潟県（佐渡島，粟島除く）の各観測地点において観測された
観測史上 1 位の日最大風速
（気象庁ホームページより）

観測地点	最大風速 [m/s]	観測日	統計期間
新潟	40.1	1929/04/21	1886/01～2013/09
松浜	26.9	2010/01/13	2003/01～2013/09
巻	24.7	2012/08/06	1978/11～2013/09
高田（上越市）	23.1	1959/04/05	1922/01～2013/09
長岡	23	1979/03/31	1976/02～2013/09
糸魚川	22	1979/10/19	1978/11～2013/09
寺泊	21	2006/11/07	2001/08～2013/09
新津	20.8	2012/04/03	1978/11～2013/09
津南	20.1	2012/04/03	1978/11～2013/09
中条	19	1981/08/23	1978/11～2013/09
大潟	18.2	2010/02/06	1978/11～2013/09
柏崎	16	2006/04/11	1978/11～2013/09
関山	16	2006/04/11	1978/11～2013/09
下関	15.2	2010/01/13	1978/11～2013/09
安塚	15	1979/03/31	1978/11～2013/09
湯沢	14.9	2012/04/03	1978/11～2013/09
三条	14	1997/06/29	1978/11～2013/09
能生	14	2007/01/07	1978/11～2013/09
十日町	12.9	2010/04/28	1978/11～2013/09
村上	12	2002/01/05	1978/11～2013/09
小出	12	1998/09/22	1978/11～2013/09
津川	11	1982/08/02	1978/11～2013/09
入広瀬	10	1987/06/25	1978/11～2013/09

表 2-3 新潟県（佐渡島，粟島除く）の各観測地点において観測された
観測史上 1 位の日最大瞬間風速
（気象庁ホームページより）

観測地点	最大瞬間風速 [m/s]	観測日	統計期間
新潟	45.5	1991/09/28	1937/01～2013/09
松浜	35.5	2010/01/13	2009/01～2013/09
巻	37.9	2012/04/03	2009/01～2013/09
高田（上越 市）	42.0	1998/09/22	1937/01～2013/09
長岡	31.1	2012/04/03	2008/11～2013/09
糸魚川	29.1	2012/04/03	2009/03～2013/09
寺泊	34.1	2012/04/03	2009/01～2013/09
新津	31.9	2012/04/04	2008/03～2013/09
津南	32.4	2012/04/03	2008/11～2013/09
中条	26.0	2012/04/03	2009/01～2013/09
大潟	31.9	2012/04/03	2009/03～2013/09
柏崎	32.5	2012/04/03	2008/03～2013/09
関山	25.9	2010/01/13	2009/09～2013/09
下関	28.6	2012/06/19	2008/03～2013/09
安塚	24.8	2012/04/04	2009/09～2013/09
湯沢	27.0	2012/04/03	2009/09～2013/09
三条	22.8	2012/04/03	2008/11～2013/09
能生	28.3	2010/12/03	2008/03～2013/09
十日町	23.1	2012/04/03	2009/09～2013/09
村上	22.9	2013/09/16	2008/09～2013/09
小出	18.8	2013/04/07	2009/09～2013/09
津川	20.8	2012/04/03	2008/03～2013/09
入広瀬	21.5	2012/04/03	2009/09～2013/09

台風 の 風速 記録

過去に発生した大型台風が日本に接近時または通過時に観測された最大風速及び最大瞬間風速並びに新潟県に接近時または通過時に観測された最大風速及び最大瞬間風速を表 3-1 に示す。

表 3-1 より沖縄，九州，四国では勢力が強い台風による影響を受け易いが，新潟県に台風が襲来するまでに台風の勢力は弱まり風速が小さくなっていることが確認できる。したがって，台風の影響は地域性があり，風（台風）の基準風速設定の際は，その地域性を考慮する必要がある。

そのため，基準風速は，添付資料 5 の 2.1(3)の通り新潟県（新潟市）における観測史上 1 位の最大風速（40.1m/s）とした。

表 3-1 台風 の 風速 記録
(気象庁ホームページ 災害をもたらした気象事象 より作成)

名称	期間	全国		新潟県	
		最大風速 (最大瞬間風速) [m/s]	観測地点	最大風速 (最大瞬間風速) [m/s]	観測地点
室戸台風	1934/09/21～(不明)	不明 (63)	室戸岬 (高知県室戸市)	不明	新潟 (新潟県新潟市)
枕崎台風	1945/09/17～09/18	51.3 (75.5)	宮崎県細島 (灯台：海上保安庁)	27.7 (36.9)	
伊勢湾台風	1959/09/26～09/27	45.4 (55.3)	伊良湖 (愛知県渥美町)	30.7 (44.5)	
第二室戸台風	1961/09/15～09/17	66.7 (84.5以上)	室戸岬 (高知県室戸市)	20.2 (31.3)	
昭和40年台風 23号	1965/09/10～09/18	69.8 (77.1)	室戸岬 (高知県室戸市)	16.0 (30.0)	
第二宮古島台 風	1966/09/04～09/06	60.8 (85.3)	宮古島 (沖縄県平良市)	接近せず	
第三宮古島台 風	1968/09/22～09/27	54.3 (79.8)	宮古島 (沖縄県平良市)	接近せず	
台風19号	1991/09/25～09/28	36 (60.9)	広島県 (広島市中区) 阿蘇山 (熊本県白水村)	24.0 (45.5)	

年超過確率の推定方法

1. 評価方法

年超過確率の推定は、気象庁の「異常気象リスクマップ」⁽¹⁾の確率推定方法を採用して評価を実施する。

評価フローを図 4-1 に示す。

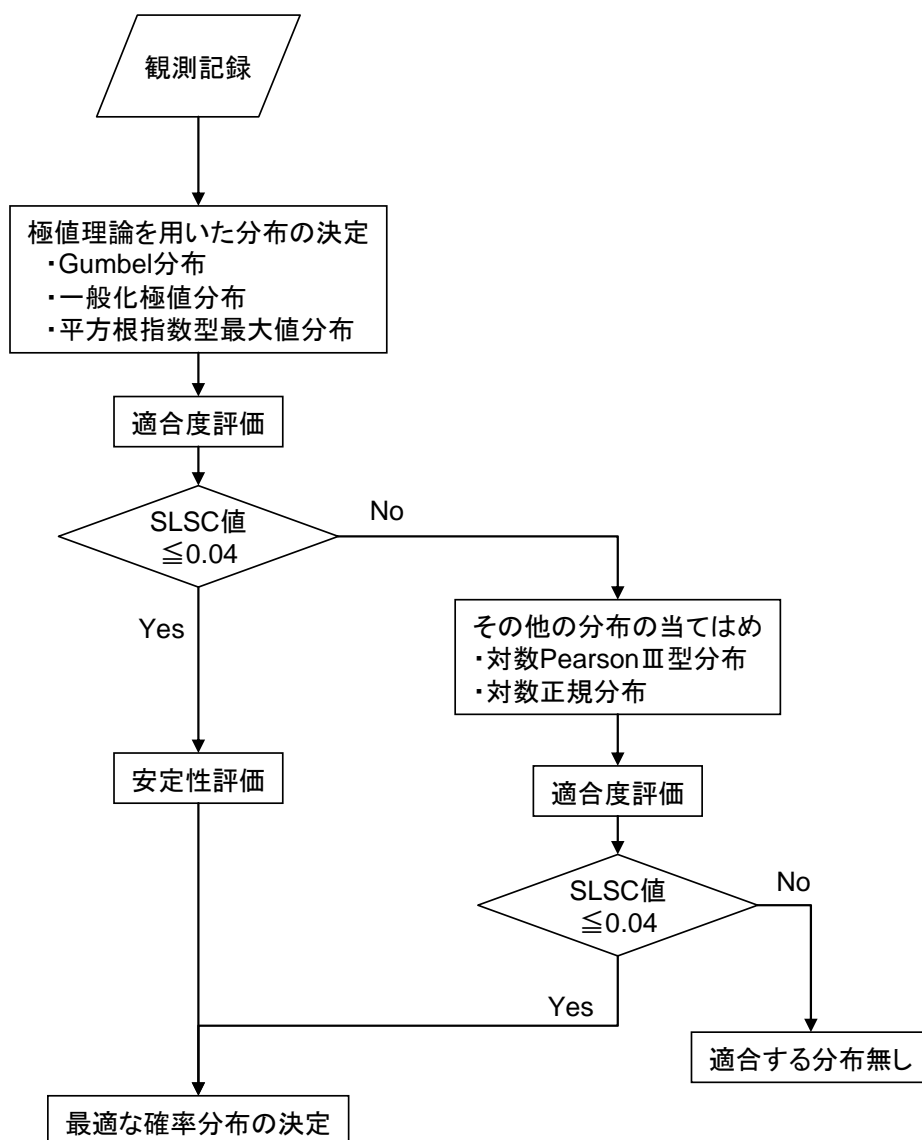


図 4-1 年超過確率評価フロー

(1) 確率分布の算出

観測記録から確率分布の分布特性を表す母数を推定し、確率分布形状を特定する。ここでは、極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）や従来から使用されている分布（対数 Pearson III 型分布、対数正規分布）の中から最適な確率分布を決定する。

確率分布モデルの母数推定については、以下に示す L 積率法（L Moments）や最尤法などの手法を用いる。⁽²⁾

L 積率法

第 1 次の L 積率 λ_1 、第 2 次の L 積率 λ_2 、第 3 次の L 積率 λ_3 はそれぞれ以下のように定義される。

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= b_0 \\ \lambda_2 &= 2b_1 - b_0 \\ \lambda_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \\ b_1 &= \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (j-1)x_j \\ b_2 &= \frac{1}{N(N-1)(N-2)} \sum_{j=1}^N (j-1)(j-2)x_j\end{aligned}$$

N : 標本数

x_j : N 個の標本を昇順に並び替えたときの小さい方から j 番目の値

最尤法

以下に示す対数尤度関数 L が最大となる a, b を算出

$$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$$

$f(x)$: 確率密度関数

また、例として極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）の母数推定方法、及び超過確率 p に対応する値の算出方法を表 4-1 に示す。

表 4-1 極値分布の母数推定法について

分布	母数推定法	母数	クオンタイル (超過確率 p に対応する値)
Gumbel 分布	L 積率法 (2 母数)	$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2}$ $c = \lambda_1 - 0.5772157a$	$x_p = c - a \cdot \ln[-\ln(p)]$
一般化 極値分布 (GEV 分布)	L 積率法 (3 母数)	$k = 7.859d + 2.9554 \cdot d^2$ ここで $d = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ $a = \frac{k\lambda_2}{(1 - 2^{-k}) \cdot \Gamma(1 + k)}$ $c = \lambda_1 - \frac{a}{k} \cdot [1 - \Gamma(1 + k)]$	$x_p = c + \frac{a}{k} \cdot \{1 - [-\ln(p)]^k\}$
平方根指数型 最大値分布	最尤法 (2 母数)	$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$ $= N \ln a + N \ln b - N \ln 2 - \sum_{j=1}^N \sqrt{bx_j}$ $- a \left[\sum_{j=1}^N \exp(-\sqrt{bx_j}) \right]$ $+ \sum_{j=1}^N \left[\sqrt{bx_j} \exp(-\sqrt{bx_j}) \right]$ L が最大となる a, b	$x_p = \frac{t_p^2}{b}$ ここで $\ln(1 + t_p) - t_p = \ln \left[-\frac{1}{a} \ln(p) \right]$

(2) 適合度評価

算出した分布がどの程度、観測記録と適合しているかを確認し分布の適合度を評価する。

本評価では、分布の適合度を SLSC (Standard Least Squares Criterion) と呼ばれる指標で評価する。

SLSC は、観測値をプロットポジション公式で並べた場合と、確率分布から推定した場合との確率の差を指標化した値である。(図 4-2)

SLSC が小さいほど、適合度が高く、経験的な分布とよくフィットする。本評価では SLSC が 0.04 以下で適合していると判断する。

プロットポジション公式とは、経験的に求められた公式であり、観測値の個数、大きさの順に並べたときの順位と再現期間との関係を数式化したものである。同公式では、いくつかの式が提案されているが、本評価においては多くの分布系によく

適合する以下の式を採用する。

$$T(i) = \frac{N + 0.2}{i - 0.4}$$

ここで、 N はデータの個数であり、大きい方から i 番目のデータの再現期間^{*}（最大風速の確率年） $T(i)$ とする。

※：ある現象（例えば 30m/s の風が吹くこと）が 1 回起こりうる「50 年」「100 年」という期間⁽¹⁾

このとき、SLSC 値は、データ値と関数値（それぞれ標準化した値）を 2 乗平均した以下の式で表される。⁽²⁾

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{0.99} - s_{0.01}|}$$

ここで、

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2$$

$s_{0.99}$, $s_{0.01}$: それぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量

s_i : 順序統計量データ x_i を推定母数で変換した標準変量

r_i : プロットングポジションに対応した理論クオンタイルを推定母数で変換した標準変量

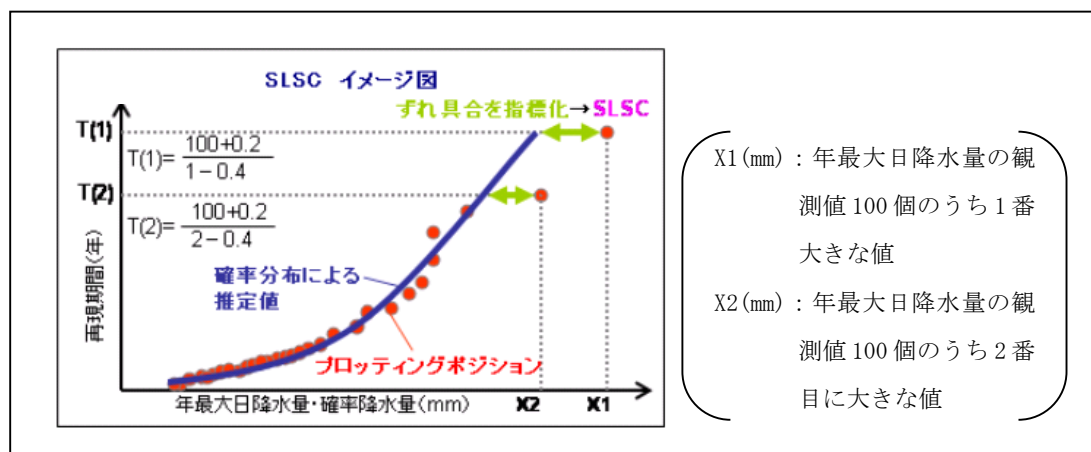


図 4-2 SLSC のイメージ図 (確率降水量の場合の例) (1)

(3) 安定性評価

(2)で分布の適合度を評価し、SLSCが0.04以下を満足した場合には、次に分布の安定性を評価する。現在得られている観測値をランダムに抜き取った場合に、結果が大きく変化しないことを評価する。本評価では安定性評価にはJack knife法を用いる。

2. 統計処理に用いる観測記録

風速の年超過確率評価の際に用いる観測記録については、観測地点の移転による観測環境の変化や観測装置が年代により異なっていることによる観測値の不均一性を考慮し設定する。

(1) 観測地点の移転（新潟地方気象台HPより）

① 柏崎市：地方気象観測システム（アメダス）

1978年（昭和53年）11月15日の観測開始以降、移転していない。

② 新潟市：新潟地方気象台

- ・ 1881年（明治14年）4月1日

内務省地理局所属の新潟測候所として、現在の新潟市学校町通り（新潟大学付属病院前付近、標高約10m）に設置。

- ・ 1891年（明治24年）1月1日

新潟市旭町通り（現在の日本海タワー付近。標高約25m）に移転。

- ・ 1928年（昭和3年）1月1日

新潟市西船見町（現在の雲雀町付近北西方。標高約7m）に移転。

- ・ 1938年（昭和13年）7月30日

中蒲原郡鳥屋野村字下所島（現在の新潟市中央区幸西、標高約2m）に移転。

- ・ 2012年（平成24年）6月29日

新潟市中央区美咲町 新潟美咲合同庁舎2号館（露場：標高約4m）に移転。

③ 上越市：高田特別地域気象観測所

1922年（大正11年）1月10日観測開始以降、1977年5月29日～12月25日の庁舎改築のための仮設移転期間を除き、本移転はしていない。

(2) 観測装置の変遷⁽³⁾

気象庁によると1960年までは、4杯式風速計（ロビンソン風速計）、により風程（回転数）から風速を求めていた。4杯式風速計は、その測器の構造上、風速を過大に表示してしまう特性があることから、観測値の補正が行われている。

1961～1974年までは、風に対する追従性を改良した3杯式風速計が用いられていたが、1975年以降は風車型自記風向風速計に変更されている。この変更により、日最大風速で9%、月平均風速で9～14%減少することが気象庁により確認されてい

る。

(3) 観測記録の公開期間

気象庁HPに公開されている風速等の観測記録は、気象庁による該当年の品質の確認が完了しているものから公開をしており、各観測地点での最大風速の現時点での公開期間は表4-2のとおりである。

表4-2 観測記録公開期間

観測地点	公開期間
	最大風速
柏崎市	1978～現在
新潟市	1961～現在
上越市	1961～現在

(4) 各観測地点の最大風速のトレンド

柏崎市のアメダス，新潟市の新潟地方気象台，上越市の高田特別地方気象観測所に加え，柏崎市近隣の長岡市のアメダスで観測された最大風速のトレンドグラフを図4-3に示す。

図4-3の新潟市の最大風速のトレンドを見ると，気象庁HPに観測記録が公開されている1961年以降に比べ，1960年以前の風速が大きくなっていること，1960年以前の観測記録にばらつきが大きいことが確認できる。この原因としては，観測所が1960年以前に複数回移転していること⁽⁴⁾による観測環境の変化，現在用いられている風速計とは異なる4杯式風速計を用いていること⁽³⁾が考えられる。

上越市の場合，風速計が年代により異なっているものの，観測所の移転がなかったことから大きなばらつきが生じなかったことが考えられる。

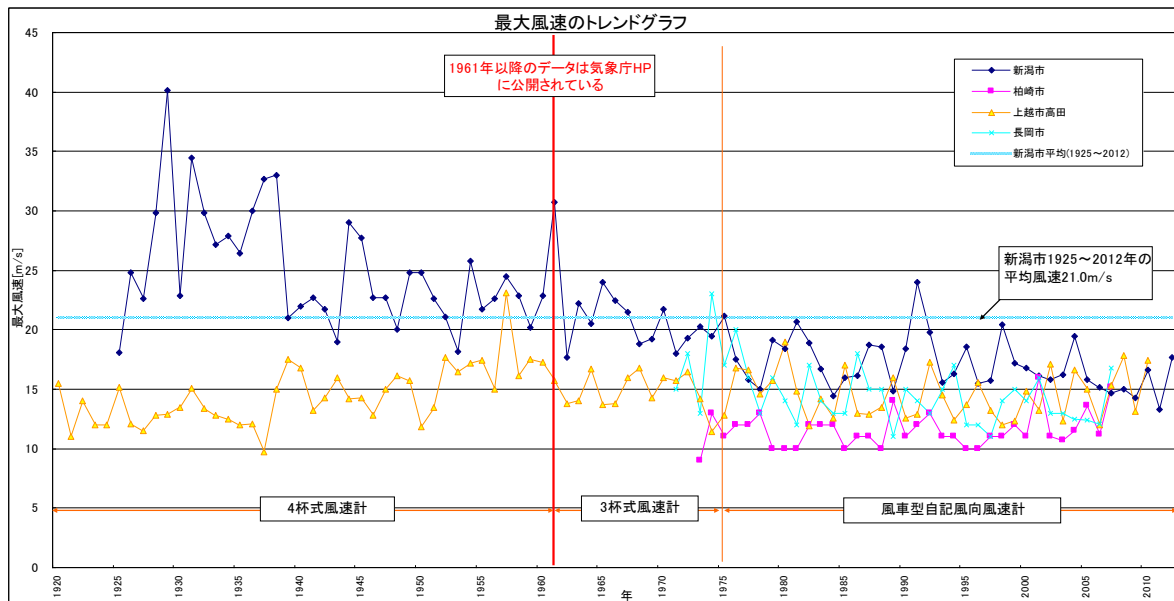


図4-3 各観測地点（柏崎市，新潟市，上越市，長岡市）における最大風速のトレンド

(5) 統計処理に用いる観測記録の設定

(1)～(4)を踏まえ，統計処理に用いる観測記録は，以下のとおり気象庁HPで公開されている観測記録を用いる。

ただし，柏崎市については観測記録が新潟市及び上越市に比べ少ないこと，柏崎市の観測記録は新潟市及び上越市よりも小さい傾向にあり，統計処理により求めた年超過確率 10^{-4} /年値は，新潟市及び上越市よりも小さくなるのが想定できるため，柏崎市については統計処理を行わない。

- ・ 新潟市：最大風速 1961～2012年の記録
（別紙1（添付5-8）～（添付5-9）参照）
- ・ 上越市：最大風速 1961～2012年の記録
（別紙1（添付5-11）～（添付5-12）参照）

3. 統計処理の結果

新潟市，上越市の最大風速の観測記録の平均，分散等を算出し 1. (1)で設定したGumbel分布，平方根指数型最大分布及び一般化極値分布に当てはめ，適合度評価(SLSC値)，安定性評価(Jack knife法)を行った結果，更には確率分布により推定した最大風速の確率年(再現期間)及び風速を表4-3，4に示す。

表4-3，4の結果より，SLSCが0.04以下を満足し，Jack knife推定誤差が小さく安定性がよい確率分布(新潟市の最大風速：Gumbel分布，上越市の最大風速：一般化極値分布)及びその確率分布により求めた年超過確率 10^{-4} /年の最大風速を表4-5のとおり求めた。

なお、表 4-5 で求めた年超過確率 10^{-4} /年の最大風速（新潟市の 39.0m/s）が、添付資料 5 の「2. (1)規格・基準類」及び「2. (2)観測記録」での最大値（新潟市の観測史上 1 位の最大風速 40.1m/s）を上回らないことから、基準風速は 40.1m/s となる。
（添付資料 5 の「2. (3)年超過確率評価」参照）

4. 参考文献

(1) 気象庁：

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/index.html>

(2) 星清，1995：水門統計解析，開発土木研究所月報 No. 540

(3) 気象庁：気象観測統計の解説 2005 年

(4) 新潟地方気象台の歴史：

<http://www.jma-net.go.jp/niigata/menu/history.shtml>

表 4-3 新潟市における最大風速の年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.036	0.156	0.033

確率年	風速[m/s]		
10	22.2	41.1	22.2
100	27.9	82.2	28.3
10000	39.0	198.3	41.2

確率年	Jack knife 推定誤差		
10	0.9	0.7	0.9
100	1.6	0.9	3.1
10000	3.1	1.4	12.8

表 4-4 上越市における最大風速の年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.052	0.168	0.035

確率年	風速[m/s]		
10	17.4	35.2	17.3
100	21.1	74.1	19.5
10000	28.5	186	21.5

確率年	Jack knife 推定誤差		
10	0.4	0.5	0.3
100	0.6	0.7	0.7
10000	1.0	1.0	2.0

表 4-5 年超過確率評価結果

	新潟市	上越市
	最大風速	最大風速
適合する 確率分布	Gumbel 分布	一般化極値分布
SLSC	0.036	0.035
Jack knife 推 定誤差	3.1	2.0
年超過確率 10 ⁻⁴ 年の風速 [m/s]	39.0	21.5

表 5-1 40.1m/s の風荷重に対する建屋等の健全性確認結果
(外部事象防護対象施設のうち建屋等)

分類	建屋等	確認部位 ^{※1}	(a)風荷重 [kN] ^{※2}	(b)設計用地 震力 [kN]	判定 (a)≤(b)か)
建屋	6号機原子炉 建屋	躯体 (38.2[m]－49.7[m])	2.65×10 ³	43.35×10 ³	○
	7号機原子炉 建屋	躯体 (38.2[m]－49.7[m])	2.65×10 ³	43.64×10 ³	○
	6号機タービ ン建屋	躯体 (30.9[m]－38.6[m])	4.83×10 ³	91.80×10 ³	○
	7号機タービ ン建屋	躯体 (20.4[m]－25.8[m])	7.90×10 ³	156.42×10 ³	○
	コントロール 建屋	躯体 (17.3[m]－24.1[m])	1.75×10 ³	44.15×10 ³	○
	廃棄物処理建 屋	躯体 (20.4[m]－30.9[m])	2.96×10 ³	65.61×10 ³	○
屋外 設備	軽油タンク 燃料移送ポン プ	40.1m/s の風荷重及び消防法に基づく風荷重に対しても機能喪失しない設計とする。		○	

※1：裕度の小さい部位の評価結果を記載

※2：風荷重は、建築基準法施行令第 87 条に従い算出（基準風速にガスト影響係数を乗じ算出する速度圧に風力係数、見附面積を乗じて算出）

表 5-2 40.1m/s の風荷重に対する建屋の健全性確認結果
(その他安全施設)

分類	建屋 ^{※3}	確認部位 ^{※1}	(a)風荷重 [kN] ^{※2}	(b)設計用地 震力 [kN]	判定 (a)≤(b)か)
建屋	免震重要棟 ^{※4}	躯体 (0.76[m]－5.36[m])	1.47×10 ³	12.17×10 ³	○
	5号炉緊急時 対策所	躯体 (39.5[m]－51.0[m])	2.37×10 ³	62.57×10 ³	○

※3：重大事故等対処設備を内包する建屋のうち、表 5-1 に記載した建屋は、本表では記載していない。

※4：基準地震動には機能喪失する可能性があるが、風（台風）単独事象に対する免震重要棟の健全性を確認する観点から、40.1m/s の風（台風）に対する風荷重が作用した場合における健全性を確認。

低温影響評価について

1. 基本方針

予想される最も苛酷と考えられる条件として設計基準を設定の上、安全施設の機能が低温に対し維持され、安全機能が損なわれないよう設計する。

2. 設計基準温度の設定

設計基準温度は以下の(1)及び(2)を参照するとともに、参考として(3)を評価・確認のうえ、最も保守的となる値を採用する。

(1) 規格・基準類

低温に関する規格・基準類の要求はない。そのため、屋外又は屋内であっても凍結の可能性がある配管等に対しては、建設時に -13.0°C 、継続時間 24 時間で凍結しない設計としている。

(2) 観測記録 (別紙 1)

発電所の立地地域である柏崎市の最低気温の観測記録史上 1 位は -11.3°C である。また、新潟地方気象台の最低気温の観測記録史上 1 位は -13.0°C である。

(3) 年超過確率評価 (別紙 2)

年超過確率の評価は、気象庁「異常気象リスクマップ」の評価方法を用いる。評価結果となるハザード曲線を図 1 に示す。また、上記(1)及び(2)での最大値(-13.0°C)について年超過確率を確認した結果、 $1.0 \times 10^{-2}/\text{年}$ となった。

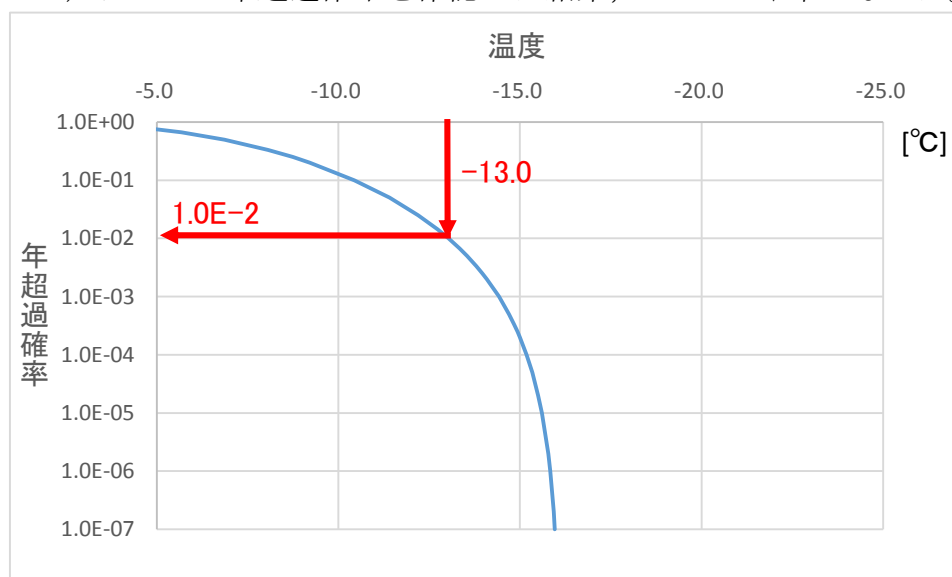


図 1 最低気温ハザード曲線

設計基準として使用する値としては、上記(1)、(2)での値よりも更なる裕度を

確保するために、年超過確率 10^{-4} /年の値である -15.2°C を低温に関する基準温度とする。

また、低温の継続時間については過去の最低気温を記録した当日の気温推移を鑑み、24時間とする（別紙3）。

上述のように当日中という限定的な期間に起こる低温もあるが、それに対し、最低気温を記録せずとも気温 0°C 未満が長時間継続する低温が発生する可能性がある。従って、年超過確率 10^{-4} /年の低温より高い温度 (-2.6°C) が長期間 (173.4時間) 継続した場合についても影響評価を実施する（別紙4）。

タンク等の容量が小さい場合には -15.2°C (24時間継続) の方が早く凍結し、容量が大きい場合には、最終的に低い温度に到達することから -2.6°C (173.4時間) の方が厳しくなると考えられる。よって、各設備での低温事象については上記の両方の場合を考慮する。

3. 安全施設の健全性評価

安全施設が、2.にて設定した低温によって安全機能を損なわない設計であることを評価・確認するため、低温が安全施設に作用した場合の影響について評価し、安全機能が維持されることを確認した。

本評価における基本的な考え方は、以下の通り。また、図2に低温に対する安全評価のフローを示す。

○防護対象である安全施設のうち、外部事象防護対象施設について、以下の①又は②に分類の上、評価し、安全機能が維持できることを確認した。

①屋内に設置されている設備については、建屋内は常に換気空調系を運転し温度を制御しているため、極端な低温にさらされることはなく、安全機能が維持可能である。

②建屋外に設置されている設備で、低温による影響を受ける可能性がある設備として、軽油タンク、非常用ディーゼル発電機燃料移送系があるが、流動点の低い特3号軽油への交換を実施していることから影響はない。

○上記以外の安全施設については、低温に対して機能維持する、若しくは、低温による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能な設計とすることにより、安全機能が維持可能である場合には影響評価完了とする。

以下に、低温により凍結しやすいと考えられる消火系について評価を示す。

・消火系配管は保温材が設置されており完全凍結が防がれることを確認している。

・消火系の水源である、ろ過水タンクについては、 -15.2°C (24時間) および -2.6°C (173.4時間) の低温に対し、凍結の可能性があるが、地下に設置されて

おり凍結の可能性がない防火水槽・海水等を代替の水源とすれば消火系が機能維持可能である。

4. 重大事故等対処設備に対する考慮

図 3 の低温に対する重大事故等対処設備の評価フローに基づき、2.にて設定した低温に対し、必要な安全機能を維持できることを確認した。

建屋内は常に換気空調系を運転し温度を制御していることから、建屋内に設置されている SA 設備は、極端な高温又は低温となることはない。

また、屋外の SA 設備は、淡水貯水池の凍結や可搬型 SA 設備への機械的影響が考えられるが、設計基準値よりも厳しい -17°C (24 時間) および -2.6°C (173.4 時間) の低温に対し、淡水貯水池は完全凍結しないと評価しており、可搬型 SA 設備は気象予報等を踏まえ、必要に応じ暖機運転等を行うことにより対処が可能である。

なお、フィルタベントについては、設計基準値よりも厳しい -17°C (24 時間) および -2.6°C (173.4 時間) の低温に対し、ヒータを考慮した条件ではスクラバ水は凍結しない。(表 1)

なお、低温(凍結)に対する重大事故等対処設備の設計方針は、設置許可基準規則第 43 条(重大事故等対処設備)にて考慮する。

表 1 FV 容器内の水の凍結開始時間

ケース	1	2	3	4
外気温	-17°C	-17°C	-2.6°C	-2.6°C
床ヒータ	未考慮	考慮	未考慮	考慮
凍結開始までの時間[h]	25.1	38.3	117.9	凍結しない

5. 参考文献

- (1) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

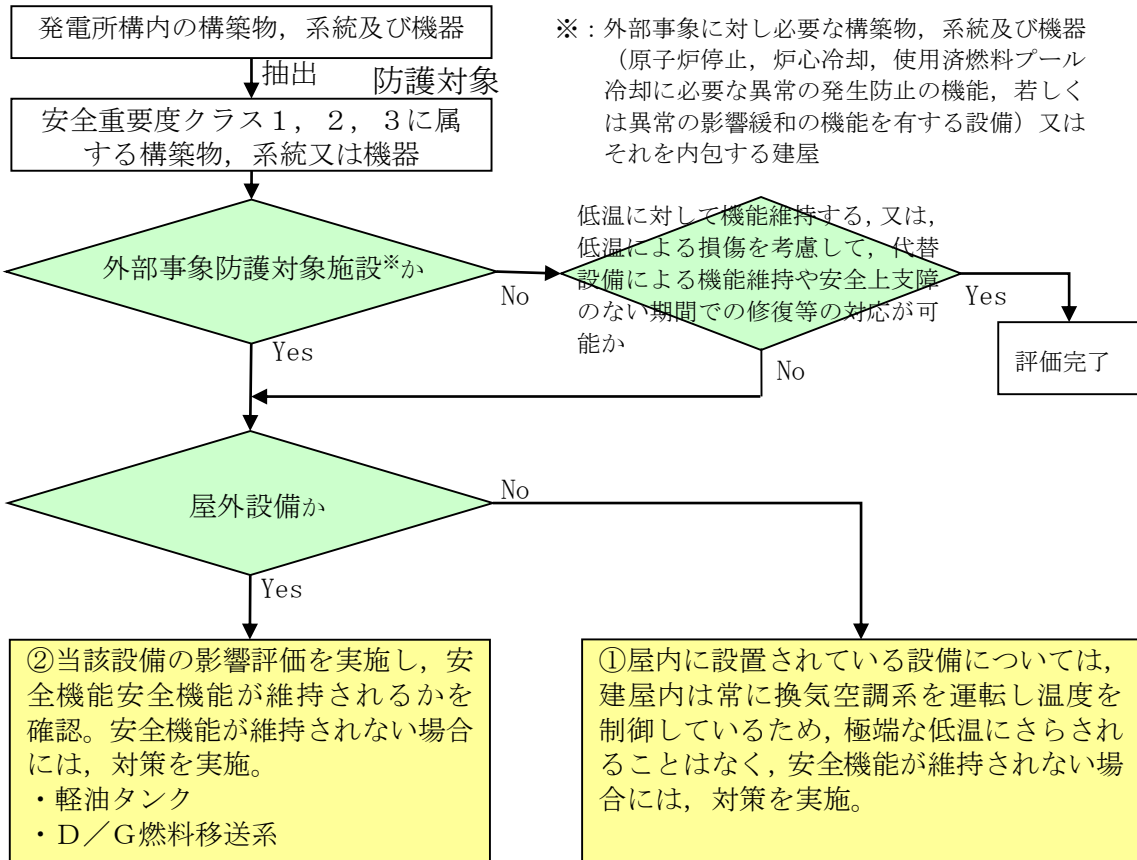
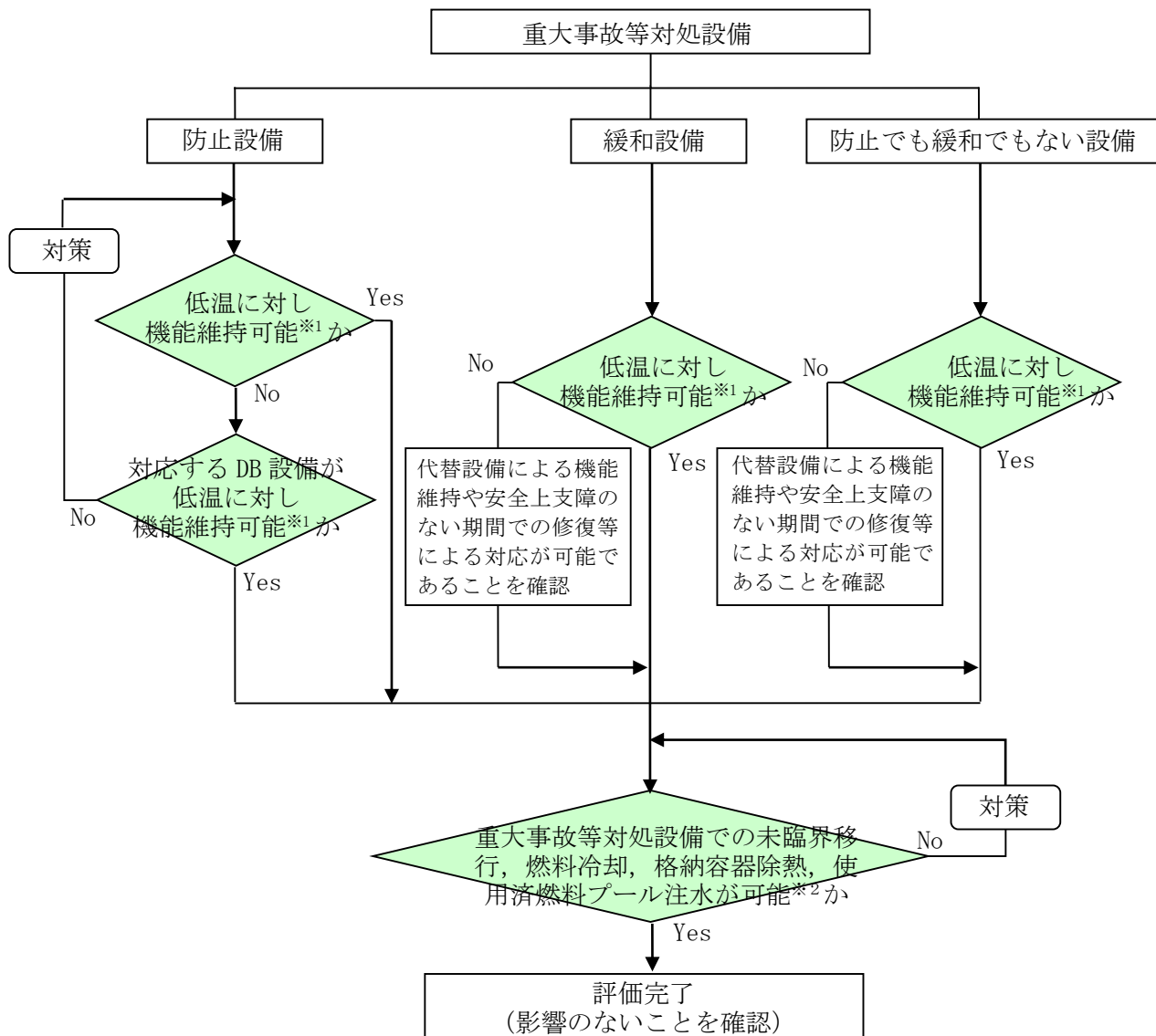


図 2 低温に対する安全施設の評価フロー



- ※1：屋内設備については，当該設備を内包する建屋（原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋，廃棄物処理建屋）の空調を期待できることから，安全機能が維持されることを確認。
- ※2：低温に対して設計基準事故対処設備の安全機能は維持されるため，低温により重大事故等対処設備の機能と設計基準事故対処設備の安全機能が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図3 低温に対する重大事故等対処設備の評価フロー

柏崎市における低温の観測記録

表 1-1 柏崎市における毎年の最低温度観測記録
(気象庁ホームページより)

年	気温[°C]	
	平均日最低	最低気温
1978	1.2 *	-2.4 *
1979	9.5	-4.4
1980	8.2	-6.8
1981	7.9	-10.7
1982	8.5	-7.9
1983	8.8	-11.3
1984	8.1	-11.2
1985	8.9	-9.9
1986	8.3	-11.1
1987	9.1	-11.1
1988	8.7 *	-9.8
1989	9.6	-2.6
1990	10.1	-7.4
1991	9.6	-6.5
1992	9.2	-5.7
1993	8.9	-2.3
1994	9.6	-4.6
1995	9.3	-5.8
1996	8.7	-7.5
1997	9.6	-4.3
1998	10.3	-7.3
1999	9.8	-8.3
2000	9.9	-5.6
2001	9.3	-7.9
2002	9.9	-2.9
2003	9.4	-6.3
2004	9.8	-7.4
2005	9.2	-7.3
2006	9.0	-9.4
2007	9.6	-4.2
2008	9.4	-4.4
2009	9.3	-6.2
2010	9.8	-6.2
2011	9.2	-6.1
2012	9.1	-8.8

値* : 資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

二重線 : 観測場所の移転, 観測方法の変更, 測器の変更などがあった場合
統計処理では, 上記の観測記録を全て使用して評価を実施。

年超過確率の推定結果

年超過確率の推定に使用するデータについては、風（台風）と同様、柏崎市に設置されているアメダスの観測記録から年超過確率を推定する。

表 2-1 最低気温の年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布※	一般化 極値分布
SLSC	0.055	-	0.034

確率年	最低温度[°C]		
	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布※	一般化 極値分布
10	-10.6	-	-10.4
100	-15.7	-	-13.0
10000	-25.8	-	-15.2

確率年	Jack knife 推定誤差		
	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布※	一般化 極値分布
10	0.6	-	0.6
100	1.0	-	0.8
10000	2.0	-	1.7

※：標準変量を算出するための特殊関数の定義域外となることから、SLSC 値算出不可

低温の継続時間について

過去の柏崎市の低温を記録した日の時間推移を図 3-1 に示す。これによると、最低気温を記録するのはほぼ朝方に集中しており、日中の気温はプラスとなる傾向となっている。よって、日中の 12 時間を除いて低温の継続時間を 12 時間と設定することも考えられるが、一定の保守性を確保する観点から、設計基準の低温の継続時間を 24 時間と設定する。

なお、上述のように当日中という限定的な期間に起こる低温もあるが、それに対し、最低気温を記録せずとも真冬日（摂氏 0°C 未満）が一定期間継続する低温が発生する場合がある。従って、設計基準の低温より高い温度が長時間、継続した場合についても影響評価を実施する。（別紙 4）

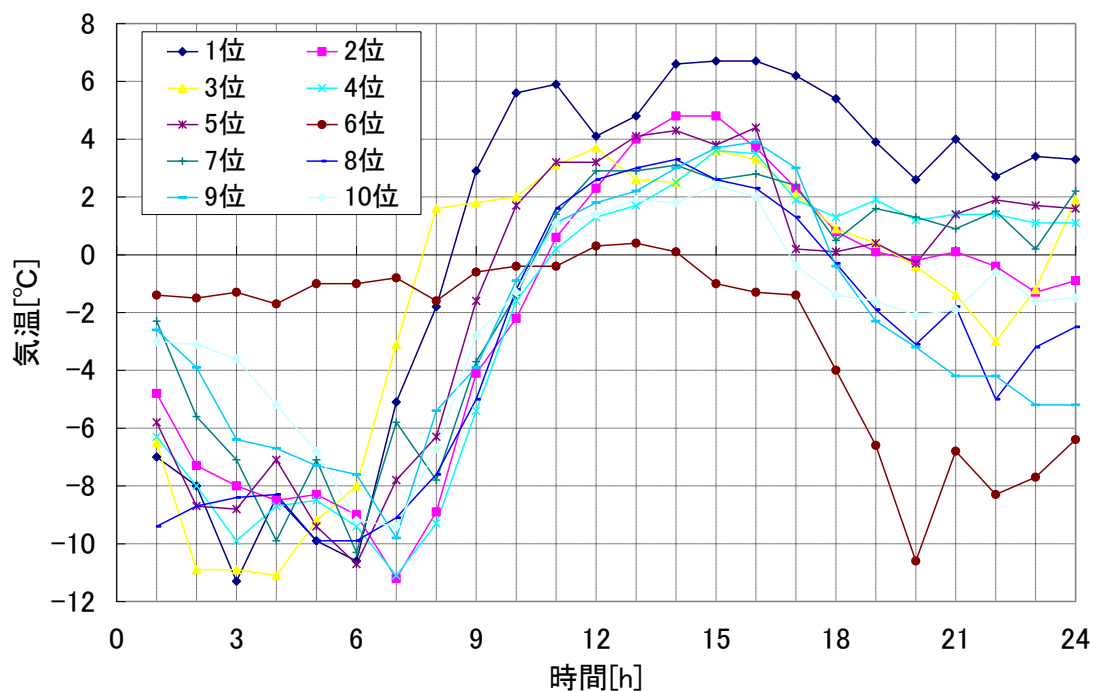


図 3-1 低温を記録した日の時刻歴（柏崎市）

長時間継続する低温について

1. 観測記録

気象庁アメダスから、1978年～2014年における柏崎市の観測記録を確認したところ、最高気温 0°C 以下の日が最も長く継続した期間は、「85 時間」であり、同期間における平均気温は、「 -2.6°C 」であった。(図 4-1)

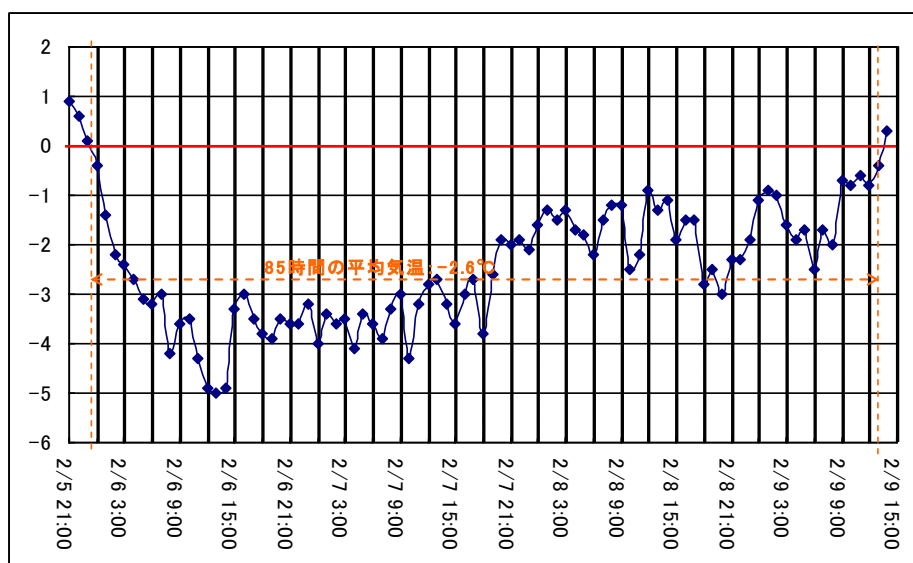


図 4-1 最高気温が 0°C 以下の日が最も長く継続した期間 (1984 年)

2. 年超過確率

過去の観測記録に基づき、統計処理を行った。評価結果となるハザード曲線を図 4-2 に示す。また、上記での低温継続時間の最大値 (85 時間) について年超過確率を確認した結果、 2.4×10^{-2} /年となった。参考として、年超過確率 10^{-4} /年となる「気温 0°C 以下が継続する期間」を、表 4-1 に示す。表 4-1 より、適合度評価 (SLSC 値) が 0.04 以下を満足し、安定評価 (Jack knife 法) の推定誤差が最小となる低温継続期間は「173.4 時間」となった。

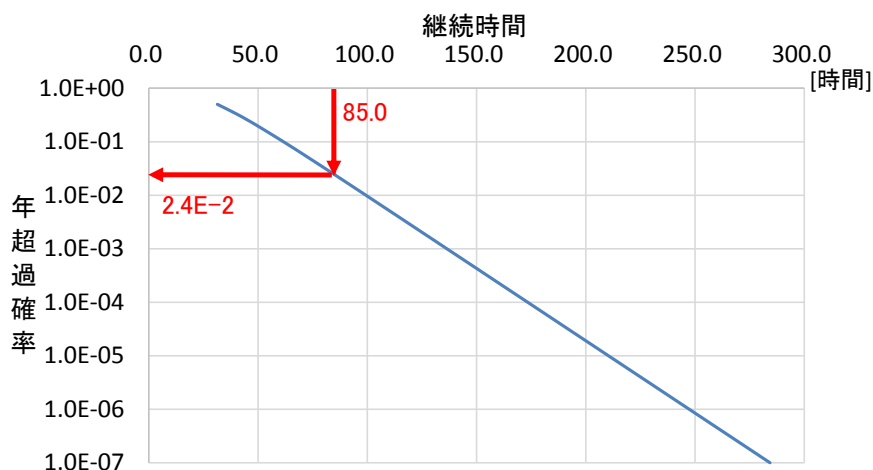


図 4-2 低温継続時間ハザード曲線

表 4-1 最高気温 0°C未滿が継続する期間の年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.031	0.043	0.032

確率年	継続期間 [時間]		
10	61.6	62.5	61.6
100	99.3	118.4	101.2
10000	173.4	272.9	184.1

確率年	Jack knife 推定誤差		
	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
10	5.7	7.5	5.8
100	9.7	15.6	14.6
10000	17.8	39.4	75.3

以上より、長期間継続する低温については、気温については-2.6°Cとし、継続時間については観測記録の値 85 時間が年超過確率評価において 2.4×10^{-2} /年であったことから、更なる裕度を確保するために年超過確率 10^{-4} /年の値 173.4 時間と定める。

降水影響評価について

1. 基本方針

予想される最も苛酷と考えられる条件として設計基準を設定の上、安全施設の機能が降水による浸水、荷重に対して維持され、安全機能が損なわれないよう設計する。

2. 基準降水量の設定

基準降水量の設定は、以下の(1)及び(2)を参照するとともに、参考として(3)を評価・確認のうえ、最も保守的となる値を採用する。

(1) 規格・基準類

降水に対する排水施設の規格・基準として、森林法に基づく林地開発許可に関する審査基準等を示した新潟県林地開発許可審査要領においては、排水施設の設計にあたって用いる設計雨量強度として 10 年確率で規定される雨量強度を用いることとしている。同要領では、継続時間 10 分から 60 分までの新潟県内の雨量強度表が示されており、発電所敷地が適用範囲内となる観測所「長岡」における雨量強度は継続時間 60 分の場合 51.1mm/h である。

(2) 観測記録

気象庁の気象統計情報における降水量の観測記録⁽¹⁾（別紙 1）によれば、柏崎市の地域気象観測システム(アメダス)での観測史上 1 位の最大 1 時間降水量は 52mm/h（2007 年 8 月 22 日）である。

(3) 年超過確率評価

年超過確率の評価は、気象庁「異常気象リスクマップ」⁽¹⁾（別紙 2）の手法により柏崎市における統計期間（1976～2012 年）内の最大 1 時間降水量から評価した。評価結果となるハザード曲線を図 1 に示す。また、上記(1)及び(2)での 1 時間降水量の最大値について年超過確率を確認した結果、 3.5×10^{-2} /年となった。参考として、1 時間降水量の最大値についての年超過確率 10^{-4} /年の値は、101.3mm/h となった。

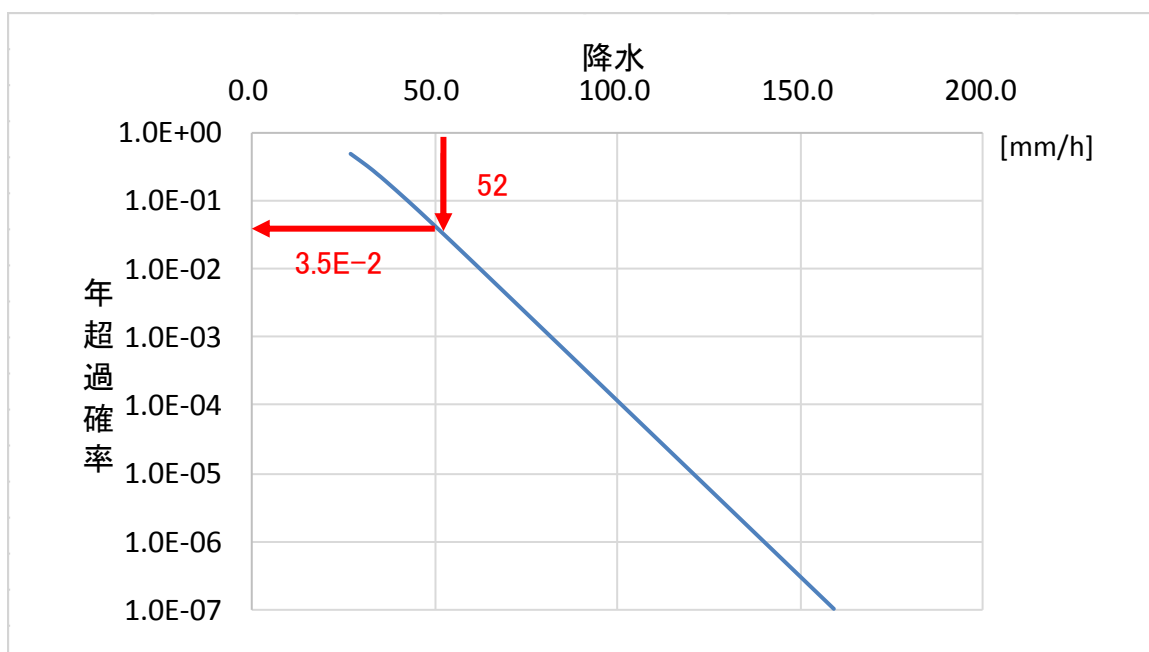


図1 1時間降水量（柏崎市）ハザード曲線

以上より、基準降水量として使用する値としては、(2)観測記録の値が(3)年超過確率評価において、 3.5×10^{-2} /年であったことから、更なる裕度を確保するために年超過確率 10^{-4} /年の値である1時間降水量 101.3mm/h を定める。

3. 安全施設の健全性評価

安全施設が、基準降水量の降水によって安全機能を損なわない設計であることを評価・確認するため、1時間降水量 101.3mm/h による浸水及び荷重が安全施設に作用した場合の影響について評価し、安全機能が維持されることを確認した。

本評価における基本的な考え方は、以下の通り。また、図2に降水に対する安全施設の評価フローを示す。

○防護対象である安全施設のうち、外部事象防護対象施設について、以下の①又は②に分類の上、評価し、安全機能が維持できることを確認した。

①頑健性のある建屋内に設置されている設備については、1時間降水量 101.3mm/h の降水による浸水に対し構内排水路等による排水や建屋止水対策により、1時間降水量 101.3mm/h の降水による荷重に対し雨樋やオーバーフロー管による排水によって影響がないことを確認した。（別紙3）

②建屋外に設置されている設備については、当該の設備に1時間降水量 101.3mm/h の降水に対する浸水及び荷重が作用した場合においても、安全機能を損なわないことを確認した。

○上記以外の安全施設については、降水に対して機能維持する、若しくは、降水による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復

等の対応が可能な設計とすることにより、安全機能が維持可能である場合には影響評価完了とする。（別紙 3）

4. 重大事故等対処設備に対する考慮

図 3 の降水に対する重大事故等対処設備の評価フローに基づき、設計基準の降水に対し、必要な安全機能を維持できることを確認した。

なお、降水に対する重大事故等対処設備の設計方針は、設置許可基準規則第 43 条（重大事故等対処設備）にて考慮する。

5. 参考文献

(1) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

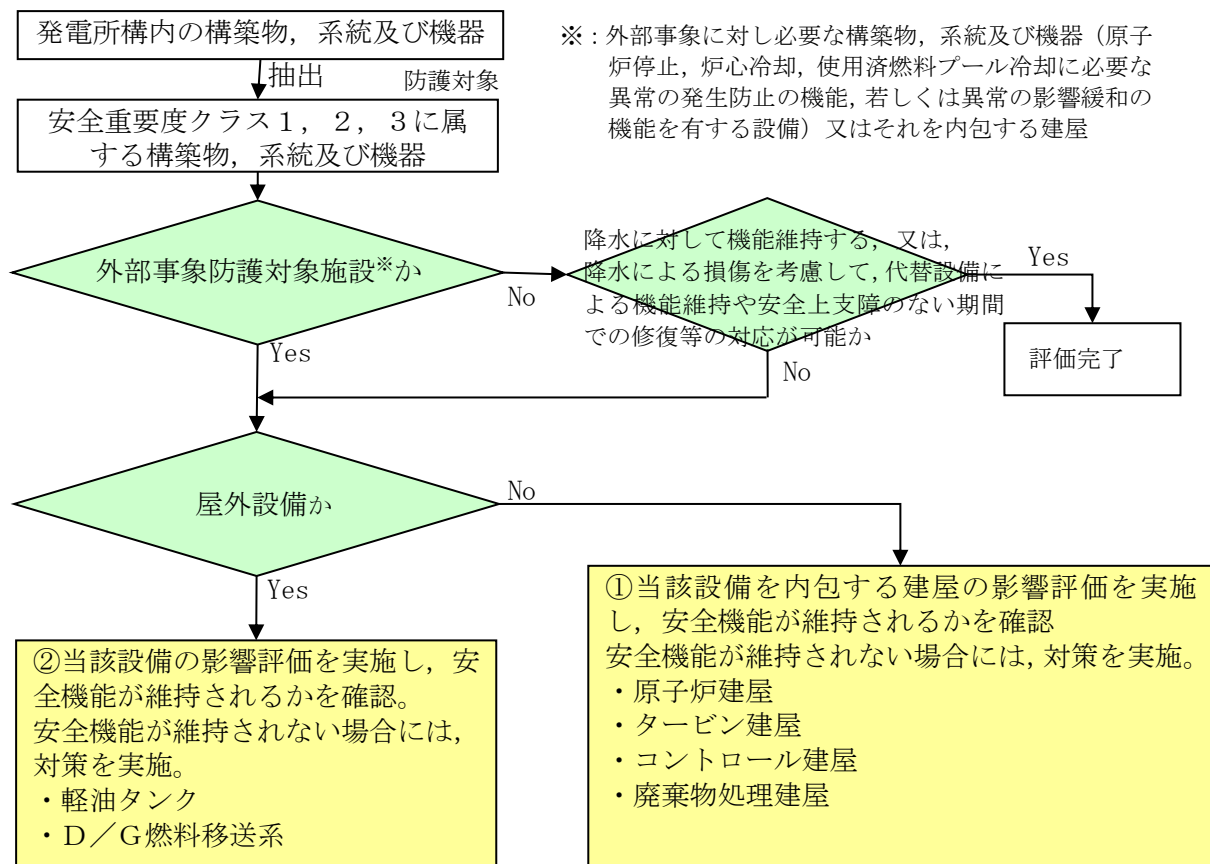
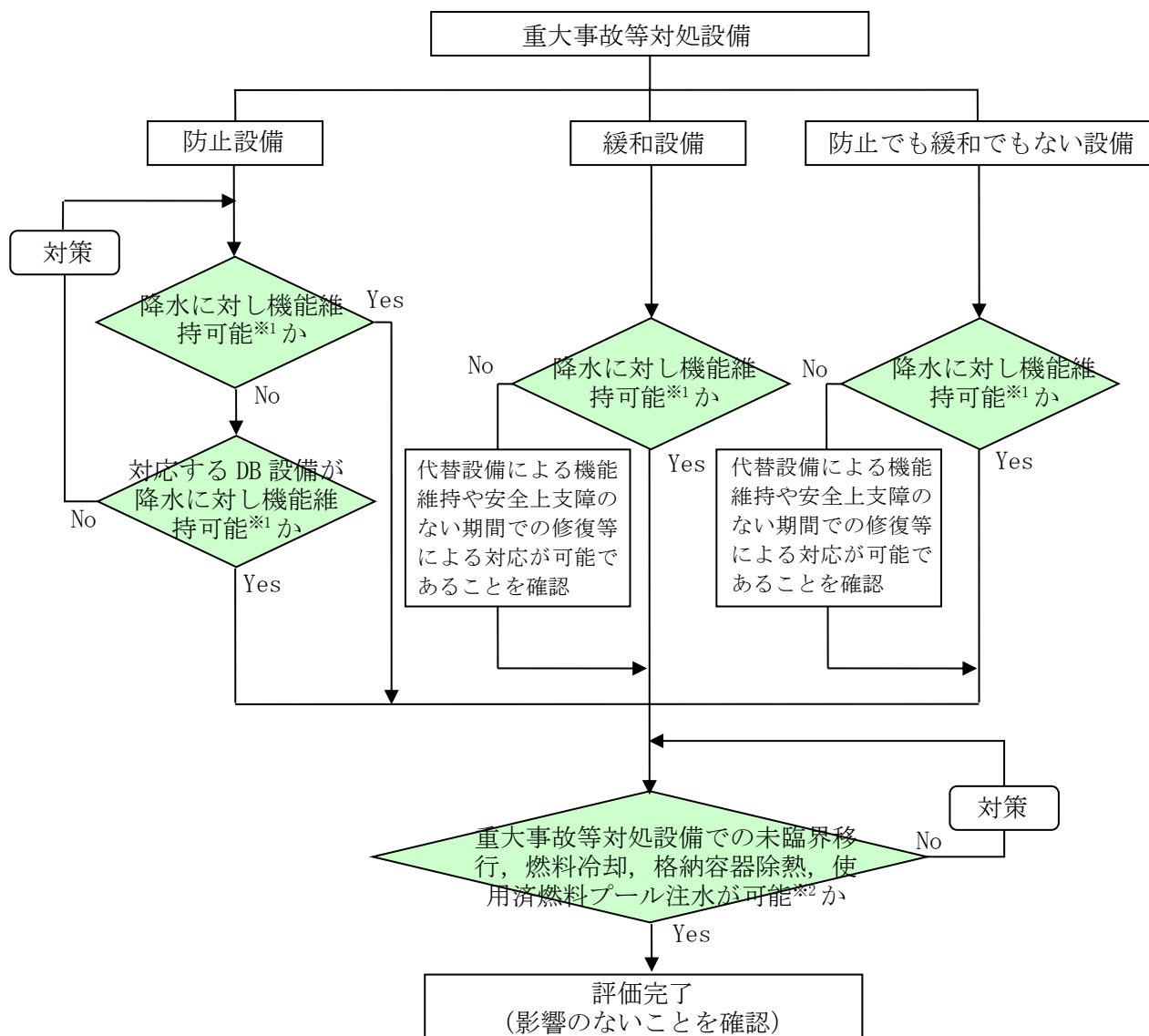


図 2 降水に対する安全施設の評価フロー



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋（原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋）の影響評価を実施し、安全機能が維持されることを確認。

※2：降水に対して設計基準事故対処設備の安全機能は維持されるため、降水により重大事故等対処設備の機能と設計基準設備の安全機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図3 降水に対する重大事故等対処設備の評価フロー

表 1-1 観測記録（柏崎市）
（気象庁ホームページより）

年	最大1時間 降水量 [mm]
1976	50]
1977	23]
1978	25]
1979	22
1980	14
1981	32
1982	18
1983	28
1984	46
1985	27
1986	16
1987	19
1988	19
1989	21
1990	15
1991	48
1992	17
1993	39
1994	35
1995	32
1996	24
1997	18
1998	26
1999	27
2000	26
2001	26
2002	21
2003	27]
2004	32
2005	38
2006	38
2007	52
2008	39.0]
2009	23.5
2010	41
2011	37.5
2012	28.5

値] : 資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

年超過確率の推定方法

1. 評価方法

年超過確率の推定は、気象庁の「異常気象リスクマップ」⁽¹⁾の確率推定方法を採用して評価を実施する。

評価フローを図 2-1 に示す。

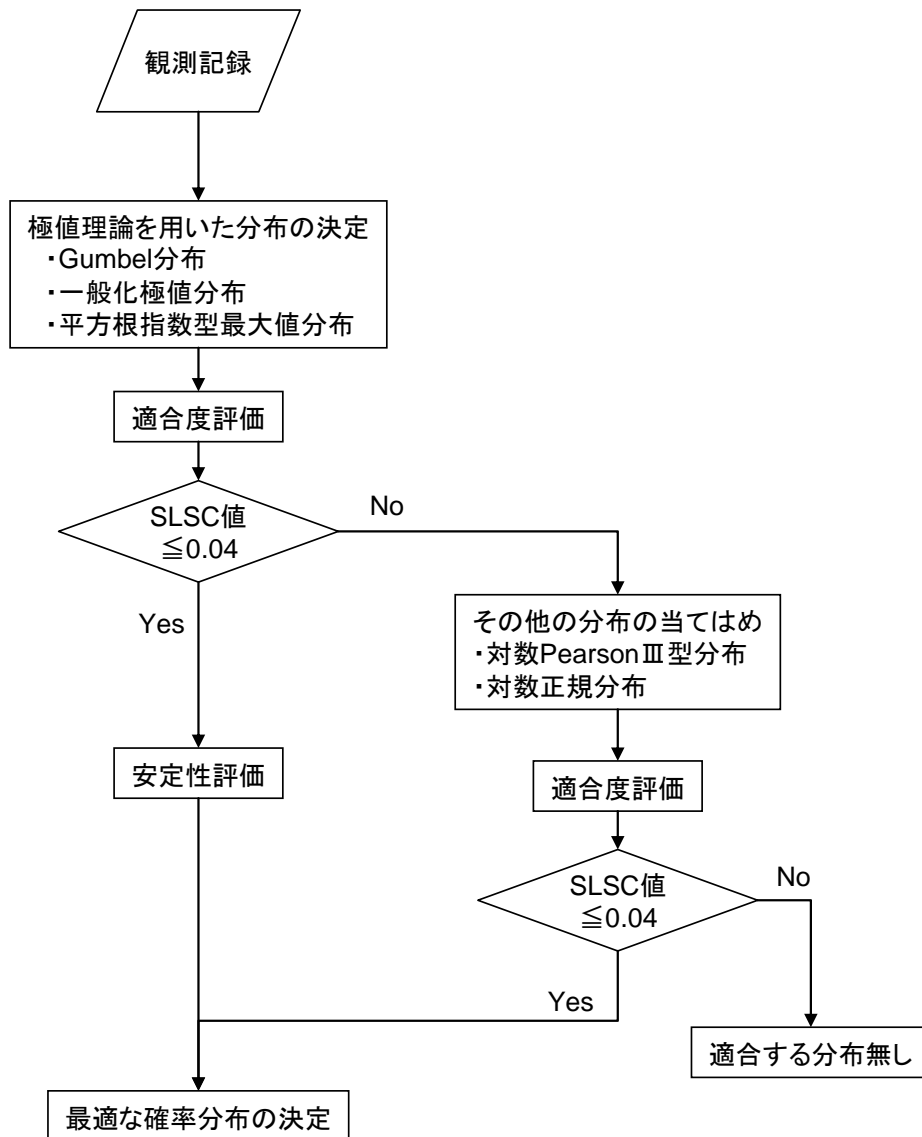


図 2-1 年超過確率評価フロー

(1) 確率分布の算出

観測記録から確率分布の分布特性を表す母数を推定し、確率分布形状を特定する。ここでは、極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）や従来から使用されている分布（対数 Pearson III 型分布、対数正規分布）の中から最適な確率分布を決定する。

確率分布モデルの母数推定については、以下に示す L 積率法（L Moments）や最尤法などの手法を用いる。⁽²⁾

L 積率法

第 1 次の L 積率 λ_1 、第 2 次の L 積率 λ_2 、第 3 次の L 積率 λ_3 はそれぞれ以下のように定義される。

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= b_0 \\ \lambda_2 &= 2b_1 - b_0 \\ \lambda_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \\ b_1 &= \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (j-1)x_j \\ b_2 &= \frac{1}{N(N-1)(N-2)} \sum_{j=1}^N (j-1)(j-2)x_j\end{aligned}$$

N : 標本数

x_j : N 個の標本を昇順に並び替えたときの小さい方から j 番目の値

最尤法

以下に示す対数尤度関数 L が最大となる a, b を算出

$$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$$

$f(x)$: 確率密度関数

また、例として極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）の母数推定方法、及び超過確率 p に対応する値の算出方法を表 2-1 に示す。

表 2-1 極値分布の母数推定法について

分布	母数推定法	母数	クオンタイル (超過確率 p に対応する値)
Gumbel 分布	L 積率法 (2 母数)	$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2}$ $c = \lambda_1 - 0.5772157a$	$x_p = c - a \cdot \ln[-\ln(p)]$
一般化 極値分布 (GEV 分布)	L 積率法 (3 母数)	$k = 7.859d + 2.9554 * d^2$ ここで $d = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ $a = \frac{k\lambda_2}{(1 - 2^{-k}) \cdot \Gamma(1 + k)}$ $c = \lambda_1 - \frac{a}{k} \cdot [1 - \Gamma(1 + k)]$	$x_p = c + \frac{a}{k} \cdot \{1 - [-\ln(p)]^k\}$
平方根指数型 最大値分布	最尤法 (2 母数)	$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$ $= N \ln a + N \ln b - N \ln 2 - \sum_{j=1}^N \sqrt{bx_j}$ $- a[\sum_{j=1}^N \exp(-\sqrt{bx_j}) + \sum_{j=1}^N \sqrt{bx_j} \exp(-\sqrt{bx_j})]$	$x_p = \frac{t_p^2}{b}$ ここで $\ln(1 + t_p) - t_p = \ln\left[-\frac{1}{a} \ln(p)\right]$

(2) 適合度評価

算出した分布がどの程度、観測記録と適合しているかを確認し分布の適合度を評価する。

本評価では、分布の適合度を SLSC (Standard Least Squares Criterion) と呼ばれる指標で評価する。

SLSC は、観測値をプロットポジション公式で並べた場合と、確率分布から推定した場合との確率の差を指標化した値である。(図 2-2) SLSC が小さいほど、適合度が高く、経験的な分布とよくフィットする。本評価では SLSC が 0.04 以下で適合していると判断する。

プロットポジション公式とは、経験的に求められた公式であり、観測値の個数、大きさの順に並べたときの順位と再現期間との関係を数式化したものである。同公式では、いくつかの式が提案されているが、本評価においては多くの分布系によく適合する以下の式を採用する。

$$T(i) = \frac{N + 0.2}{i - 0.4}$$

ここで、 N はデータの個数であり、大きい方から i 番目のデータの再現期間[※]（1時間降水量の確率年） $T(i)$ とする。

※：ある現象（例えば 100mm/h の降水が起こること）が 1 回起こりうる「50 年」「100 年」という期間⁽¹⁾

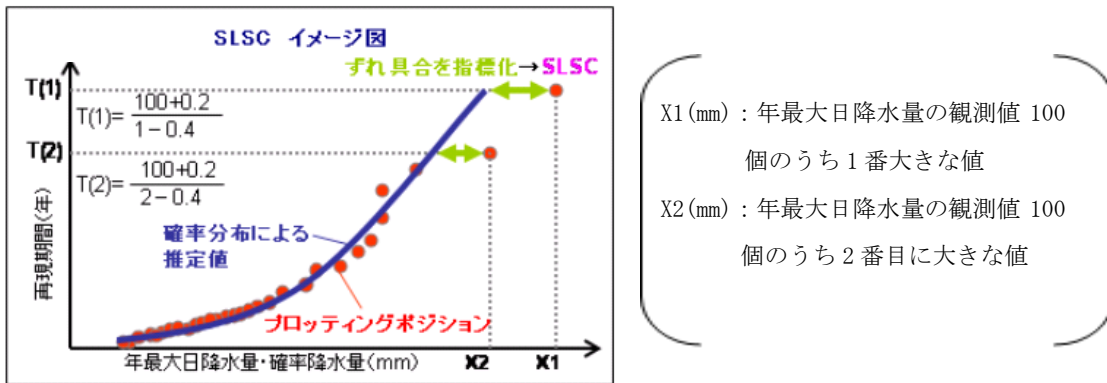


図 2-2 SLSC のイメージ図 (確率降水量の場合) (1)

このとき、SLSC 値は、データ値と関数値（それぞれ標準化した値）を 2 乗平均した以下の式で表される。⁽²⁾

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{0.99} - s_{0.01}|}$$

ここで、

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2$$

$s_{0.99}$, $s_{0.01}$: それぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量

s_i : 順序統計量データ x_i を推定母数で変換した標準変量

r_i : プロットングポジションに対応した理論クオンタイルを推定母数で変換した標準変量

(3) 安定性評価

(2) で分布の適合度を評価し、SLSC が 0.04 以下を満足した場合には、次に分布の安定性を評価する。現在得られている観測値をランダムに抜き取った場合に、結果が大きく変化しないことを評価する。本評価では安定性評価には Jack knife 法を用いる。

2. 統計処理の結果

柏崎市の年ごとの最大 1 時間降水量の観測記録を 1. (1) で設定した Gumbel 分布、平方根指数型最大分布及び一般化極値分布に当てはめ、適合度評価 (SLSC 値)、安定

性評価 (Jack knife 法) を行った結果, 及び, 確率分布により推定した確率年 (再現期間) ごとの 1 時間降水量を表 2-2 に示す。

表 2-2 の結果より, SLSC が 0.04 以下を満足し, Jack knife 推定誤差が小さく安定性がよい確率分布 (Gumbel 分布) 及びその確率分布により求めた年超過確率 10^{-4} /年の最大 1 時間降水量を表 2-3 のとおり求めた。

表 2-2 最大 1 時間降水量の年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.031	0.090	0.030

確率年	最大 1 時間降水量 [mm/h]		
10	43.0	55.1	43.0
100	62.7	100.8	61.7
10000	101.3	225.7	96.2

確率年	Jack knife 推定誤差		
10	2.9	2.2	2.9
100	5.0	2.9	6.0
10000	9.3	4.2	25.2

表 2-3 最大 1 時間降水量の年超過確率評価結果

	最大 1 時間降水量
適合する 確率分布	Gumbel 分布
SLSC	0.031
Jack knife 推 定誤差	9.3
年超過確率 10^{-4} /年の最大 1 時間降水量 [mm/h]	101.3

3. 参考文献

(1) 気象庁:

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/index.html>

(2) 星清, 1995: 水門統計解析, 開発土木研究所月報 No. 540

降水による浸水の影響評価

1. 概要

安全施設のうち外部事象防護対象施設の設置場所は、基準降水量 (101.3mm/h) の降水による浸水に対し、構内排水路による排水等により、安全機能を損なわない設計とする。

安全施設のうち外部事象防護対象施設は、基準降水量 (101.3mm/h) の降水による荷重に対し、排水口による排水等により影響を受けない設計とし、安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、降水による荷重及び浸水に対して、排水口による排水等、構内排水路等による排水、若しくは、降水による損傷を考慮し安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

2. 降水による敷地内滞留水の影響評価

2.1 浸水量評価

設計基準である 1 時間降水量 101.3mm/h における敷地内の浸水量を以下の条件のもと評価した。

(KK67-0056 改 06「実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準」への適合状況について」添付資料 1.0.2 別紙(30)参照)

<評価条件>

降雨強度：

1 時間降水量 101.3mm

雨水流出量：

「新潟県林地開発許可申請審査要領」(平成 26 年 5 月 7 日)に基づき、
ラショナル式より算出

排水量：

「新潟県林地開発許可申請審査要領」(平成 26 年 5 月 7 日)に基づき、
マニング式より算出

2.2 浸水量評価の結果

図 3-1 に滞留水の発生位置及び想定範囲を、表 3-1 に滞留深さの計算結果を示す。また、各流域における、排水および滞留水の状況は以下のとおりとなる。

〔荒浜側〕

荒浜側については、流域 A, B を除いて、排水量が雨水流出量を上回り、既存の排水路から雨水を海域に排水することが可能である。

流域 A, B については、T.M.S.L.+約 13m の地点で排水量が雨水流出量を下回ることも

ら、全ての滞留水が流域 B に流れ込むと保守的に仮定すると、その滞留水深さは約 8cm/h となる。

ただし、荒浜側には排水路とは別に排水用フラップゲートが設置されており、この滞留水は排水用フラップゲートを通じてすみやかに排水される。

〔中央土捨場〕

中央土捨場については、流域 G の排水量が雨水流出量を上回り、既存の排水路から雨水を海域に排水することが可能である。

〔大湊側〕

大湊側については、流域 H、K を除いて、排水量が雨水流出量を上回り、既存の排水路から雨水を海域に排水することが可能である。

流域 H については、T. M. S. L. +約 8m の地点で排水量が雨水流出量を下回るが、大湊側の 6 号炉・7 号炉の設置高さ T. M. S. L. +12m よりも低いため、滞留せずに海に流出する。流域 K については、T. M. S. L. +12m の地点で排水量が雨水流出量を下回ることから、全ての滞留水が流域 K の T. M. S. L. +12m の範囲に流れ込むと保守的に仮定すると、その滞留水深さは約 2cm/h となる。

ただし、大湊側には図 3-1 に示すとおり排水路とは別に排水用フラップゲートが設置されており、この滞留水は排水用フラップゲートを通じてすみやかに排水される。

以上のことから、一部滞留水が発生するものの排水用フラップゲートから滞留水をすみやかに海域に排水することが可能である。

なお、排水用フラップゲートについては、本評価の中では排水設備の一部として位置付けている。

表 3-1 滞留水深さの算定結果

流域		滞留水量 (m ³ /h)	滞留水拡散面積 [※] (ha)	滞留水深さ (m/h)
荒浜側	A	13,068	17.6	0.08
大湊側	H	1,512	T. M. S. L. +約 8 m の地点で排水量が雨水流出量を下回るが、大湊側の 6 号炉・7 号炉の設置高さ T. M. S. L. +12m よりも低いため、滞留せずに海に流出する	—
	K	1,764	9.1	0.02

※ 原子炉・タービン・サービス建屋等主要建屋の面積を除く

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

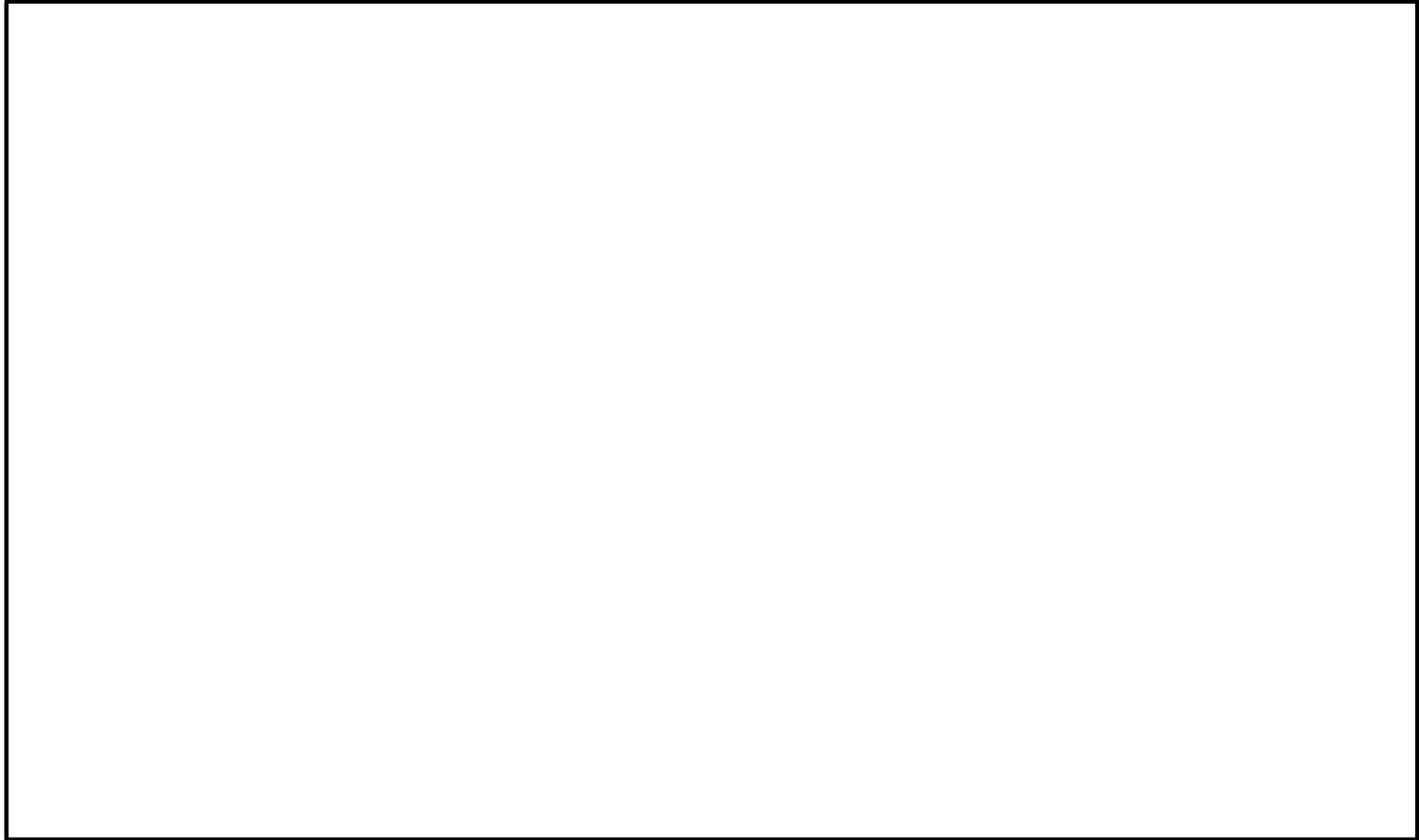


図 3-1 滞留水の発生位置・想定範囲

3. 浸水の影響について

原子炉建屋等への影響として、建屋周辺において1cm/h程度の滞留水が発生するおそれがあるが、滞留水の程度は軽微であり、溢水対策として建屋貫通部の止水処理等が実施されていることから重要区画へ浸水することはない。また、屋外設備である燃料移送系については、防護板等を設置する設計とすることから影響はない。

以上から、外部事象防護対象施設の安全機能が降水による浸水によって損なわれることはない。

4. 荷重の影響について

降水による荷重の影響として、原子炉建屋等は多量の降水に対しても、雨水排水口に加えオーバーフロー管を介して排水する設計としていることから、滞留水による荷重の影響が及ぶことはない。また、軽油タンクについては、降水が滞留する構造ではないことから、滞留水による荷重の影響が及ぶことはない。

以上から、外部事象防護対象施設の安全機能が降水による荷重によって損なわれることはない。

積雪影響評価について

1. 基本方針

予想される最も苛酷と考えられる条件として設計基準を設定の上、安全施設の機能が積雪による荷重、積雪による給気口等の閉塞に対し維持され、安全機能が損なわれないよう設計する。

2. 設計基準積雪量の設定

設計基準積雪量は以下の(1)及び(2)を参照するとともに、参考として(3)を評価・確認のうえ、積雪時の柏崎刈羽原子力発電所における除雪を考慮し、設定する。

(1) 規格・基準類 (別紙 1)

積雪に対する規格・基準として、建築物については建築基準法及び同施行令第86条第3項に基づく新潟県建築基準法施行細則において、地域毎に設計積雪量が定められている。柏崎市においては130cmであり、刈羽村においては170cmである。これらの値は、ひと冬の間を観測される最も大きな積雪深の値である年最大積雪深を基本として定められており、除雪に対して十分な維持管理が行われ、また、危険を覚知した時には速やかに雪下ろしが可能な形状の建築物等又はその部分については、同上第6項の規定により垂直積雪量を1メートルまで減らして計算することができる。

(2) 観測記録 (別紙 2)

柏崎市に設置されている気象庁地域気象観測システム(アメダス)によれば、日降雪量の最大値は72cm(1984年12月28日)であり、最深積雪量は171cm(1984年3月8日)、平均積雪深は31.1cmである。また、アメダスが設置される以前に柏崎市の農業気象観測所にて最深積雪量194cm(1927年2月13日)が観測されている。刈羽村における積雪の観測記録としては、最深積雪量は280cm(1974年3月13日)である。

○積雪時の発電所の対応について

柏崎刈羽原子力発電所においては、冬季には毎日降雪量を確認、除雪の必要性を判断することとしている。また、雪が降る日が多く、年に数回の頻度で発電所構内における除雪活動を行っている。

構内の道路又はアクセスルートについては、社外委託により、9台の除雪機

で除雪を行っている（別紙 3）。

なお、この除雪ルートについては、構内道路に加え可搬設備を用いる場合に
必要な建屋近傍を含むルートとなっている。

また、建屋屋上の除雪に関しては、気象情報（降雪予報）、事務所周辺地盤
面及び構内に設置している監視システム等による積雪量を監視し、除雪を
実施することとしている（別紙 4）。

高台に配備している設備については、同様に積雪時に除雪を実施し、必要な
時に迅速、かつ確実に運転できるようにしている（別紙 5）。

上記の通り、発電所構内の除雪体制が確立されていること、さらに、積もるま
でに一定の時間を要することから、基準積雪量としては、1日あたりの積雪量を
考慮する。

(3) 年超過確率評価（別紙 6）

年超過確率の評価は、気象庁「異常気象リスクマップ」⁽¹⁾の評価方法を用いる。
評価結果となるハザード曲線を図 1 に示す。また、(2)観測記録での日降雪量の
最大値（72cm）について年超過確率を確認した結果、 3.0×10^{-2} /年となった。

参考として、1日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-4} /年の値は 135.9cm となっ
た。

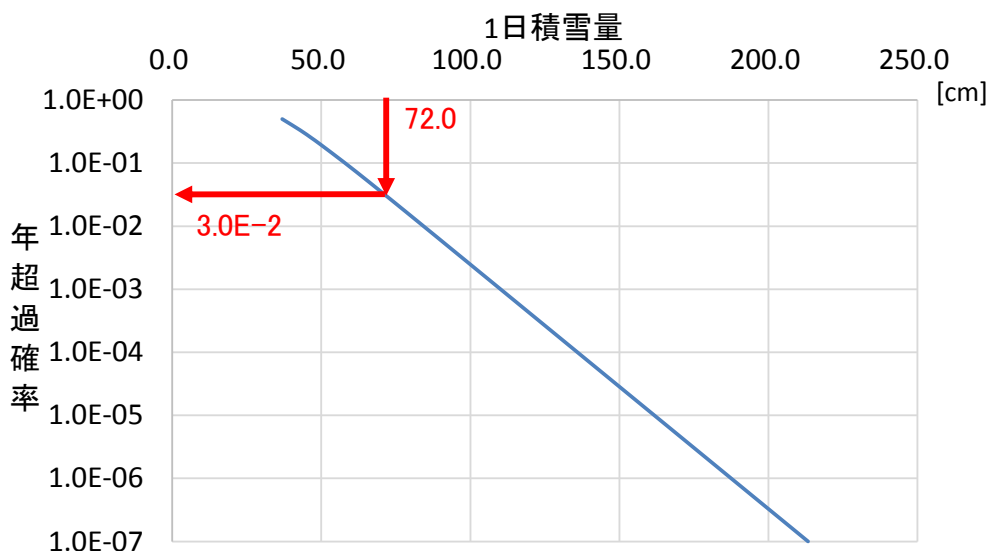


図 1 1日積雪量ハザード曲線

(4) 設計基準の策定

設計基準として使用する値としては、(2)観測記録の値 72cm が(3)年超過確率

評価において 3.0×10^{-2} /年であったことから、更なる裕度を確保するために年超過確率 10^{-4} /年の値 135.9cm を設計基準積雪量と定める。

ただし、1日あたりの積雪量であることから、それ以前に積もった積雪分を考慮していないため、過去の観測記録から、最深積雪量の平均値 (31.1cm) を加えた値を基準積雪量として用いることとする。

したがって、基準積雪量を以下のとおり設定した。

$$\begin{aligned} \text{基準積雪量} &= 1 \text{日あたりの積雪量の年超過確率 } 10^{-4} / \text{年の値 (135.9cm)} \\ &\quad + \text{最深積雪量の平均値 (31.1cm)} \\ &= 167.0 \text{cm} \end{aligned}$$

3. 安全施設の健全性評価

2. (4)にて示した設計基準に対する安全施設への影響を評価する。設計基準の積雪量に対して、安全施設が積雪荷重、空気、流体の取り入れ口の閉塞によって機能喪失に至ることがないことを確認した。

本評価における基本的な考え方は、以下の通り。また、図2に積雪に対する安全施設の評価フローを示す。

○防護対象である安全施設のうち、外部事象防護対象施設について、以下の

①～③に分類の上、評価し、安全機能が維持できることを確認した。

① 屋内にある設備は、当該設備を有する建屋が設計基準積雪量の荷重に対して機械的裕度強度を有する設計であることを確認した (別紙 7)。

② 屋外の設備は設計基準積雪量の荷重に対して健全であることを確認した。(別紙 7)

③ 流体の取り入れ口等の閉塞による影響について、各建屋の換気口等の高さが設計基準積雪量に対して高い位置に設置してあること及び上向きに開口部がない設計であることを確認した (別紙 8)。また、積雪と風等により給気口等の閉塞が考えられるが、この場合には、操作員がルーバに付いた積雪を落とすことにより閉塞を防止する。

○上記以外の安全施設については、積雪に対して機能維持する、若しくは、積雪による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能な設計とすることにより、安全機能が維持可能である場合には影響評価完了とする。(別紙 7)

以上のことから、安全施設の積雪時に必要な安全機能が損なわれることはないことを確認した。

4. 重大事故等対処施設に対する考慮

図 3 の積雪に対する重大事故等対処設備の評価フローに基づき、設計基準の積雪量の荷重に対し、必要な安全機能が確保されていることを確認した。

なお、積雪に対する重大事故等対処設備の設計方針は、設置許可基準規則第 43 条（重大事故等対処設備）にて考慮する。

5. 参考文献

- (1) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

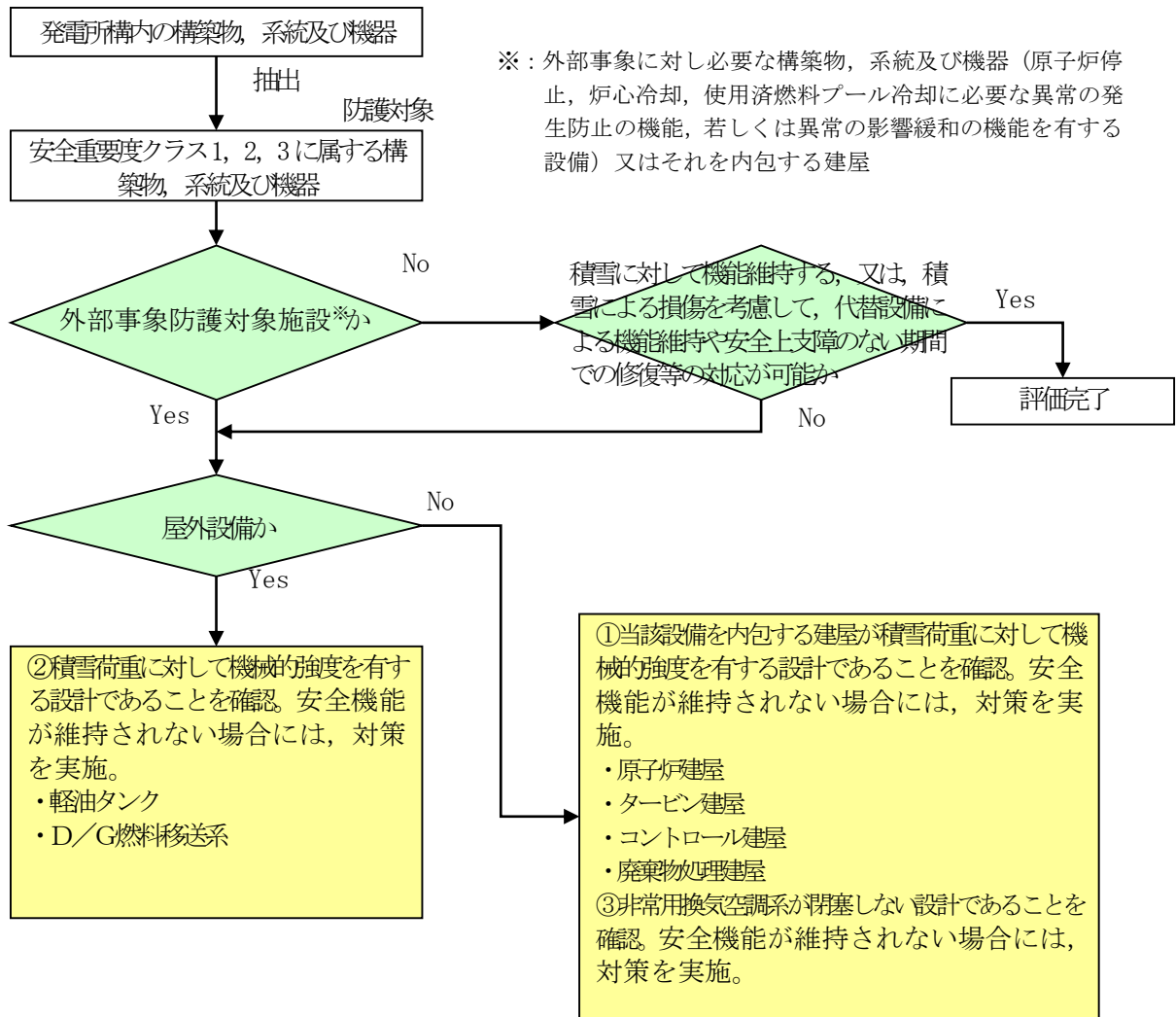
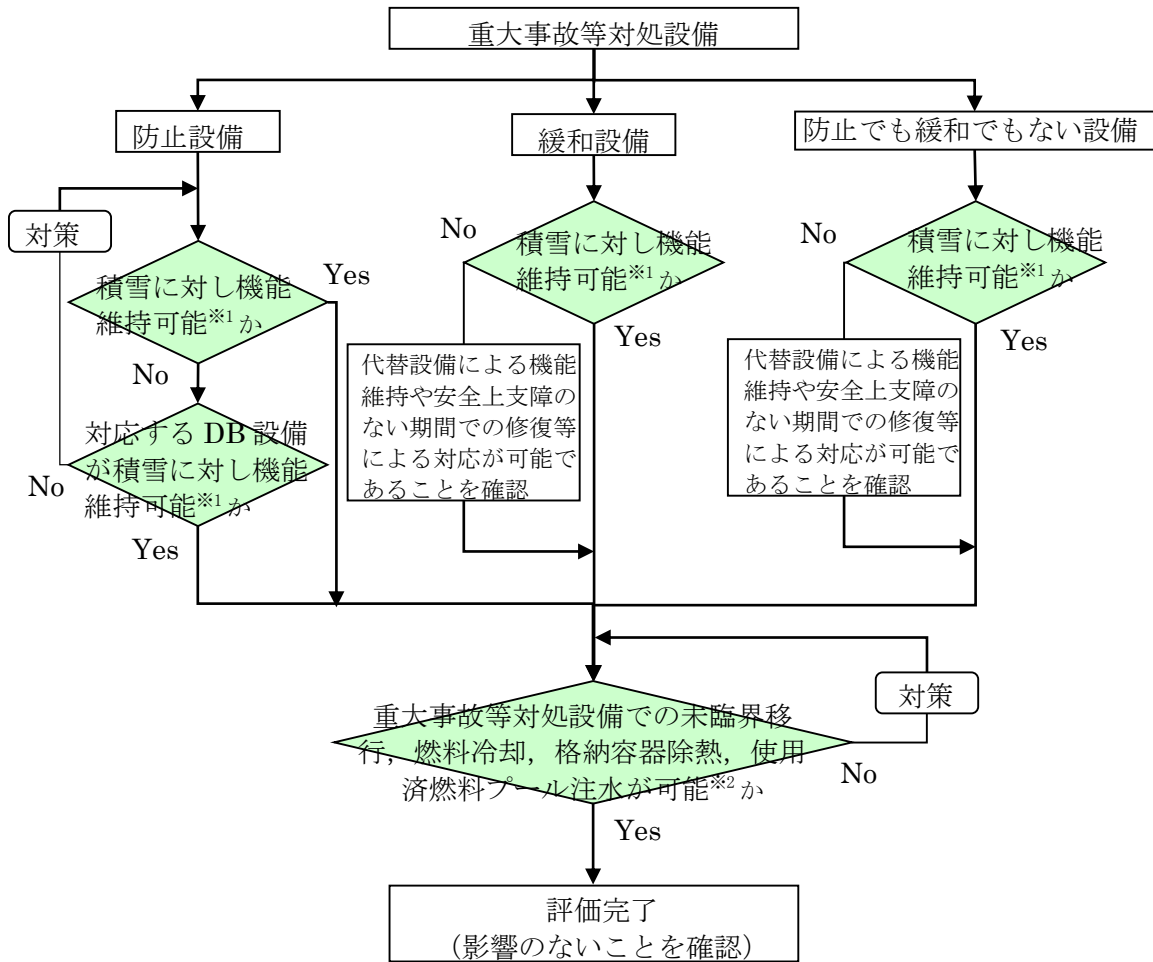


図2 積雪に対する安全施設の評価フロー



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋（原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋）の影響評価を実施し、安全機能が維持されることを確認。
 ※2：積雪に対して設計基準事故対処設備の安全機能は維持されるため、積雪により重大事故等対処設備と設計基準事故対処設備の安全機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図3 積雪に対する重大事故等対処設備の評価フロー

新潟県垂直積雪量（積雪荷重）運用基準（一部抜粋）[1]

建築基準法施行令（以下「政令」）の一部が改正（平成 12 年政令第 211 号）され、政令第 86 条の規定において、垂直積雪量を特定行政庁が規則で定めることとなったことから、新潟県建築基準法施行細則（平成 12 年県規則第 125 号）に第 14 条第 3 項を追加し、その数値を定め、政令改正との整合を図り、新潟県特定行政庁における垂直積雪量（積雪荷重）運用基準を定めている。

運用基準の積雪に関する記載は以下の通りである。

（目的）

第 1 条 この基準は、建築基準法施行令（昭和 25 年政令第 338 号、以下『政令』という。）第 86 条の規定による積雪荷重についての運用その他必要な事項を定めて、建築物及び工作物（以下、「建築物等」という。）の構造上の安全を確保することを目的とする。

（適用範囲）

第 2 条 この基準は、新潟県特定行政庁が所管する区域内の建築物等に適用する。

（垂直積雪量）

第 3 条 垂直積雪量は、知事が定めた数値(下表)以上とし、かつ、建築物等の敷地の位置における局所的地形要因による影響等を考慮して設計するものとする。
2 山間部等における積雪の状況は、標高が同程度であっても建築物の敷地の位置によって大きく異なることがあることから、十分に考慮して設計するものとする。

（自然落雪による低減）

第 4 条 政令第 86 条第 4 項の規定による屋根の積雪荷重は、屋根ふき材、屋根形状、気温、雪の性状等により雪の自然落下が期待でき、十分な維持管理が行われ、また、危険を覚知した時には速やかに雪下ろしが可能な形状の建築物等又はその部分については、同上第 6 項の規定により垂直積雪量を 1 メートルまで減らして計算することができるものとする。

[1]新潟県 HP (<http://www.pref.niigata.lg.jp/jutaku/1223229707455.html>)

柏崎市における積雪の観測記録

年超過確率の推定に使用するデータについては、柏崎刈羽原子力発電所の最寄りの気象官署又はアメダスとする。従って、柏崎市に設置されているアメダスの観測記録から年超過確率を推定する。

表 2-1 柏崎市における毎年の積雪観測記録
(気象庁ホームページより)

寒候年	雪 (cm)		
	降雪の合計	日降雪の最大	最深積雪
1981	594*	67*	122*
1982	224*	32*	34*
1983	516	61	107*
1984	951	51	171
1985	733	72	139
1986	966	64	162
1987	347	44	50
1988	446	37	75
1989	135	24	25
1990	227	49	59
1991	396	37	73*
1992	84*	29*	26*
1993	140	23	24
1994	315	43	62
1995	425	27	59
1996	523	39	78
1997	274	26	29
1998	272	37	42
1999	274	31	42
2000	350	40	63
2001	441	32	67
2002	170	41	36
2003	294	34	54
2004	240	36	43
2005	434	43	68
2006	461	40	53
2007	53	23	22
2008	250	24	34
2009	138	20	19
2010	427	66	105
2011	278	29	67
2012	514	35	111

値*：資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。統計処理では、上記の観測記録を使用して評価を実施。

平均積雪量の算出

平均積雪量は、柏崎市のアメダスの観測記録から積雪が確認された日数 (N) と、その日の最深積雪量 (S_{Ni}) から算出する。

$$(\text{平均積雪量}) = \frac{1}{N} \sum_i S_{Ni}$$

上式は、積雪が確認された場合の平均的な積雪量を与える式となる。

柏崎市のアメダスの記録から、平均積雪量を計算すると以下の通りとなる。

観測期間：1980年11月1日～2013年3月31日

積雪が確認された日数 (N)：1,925日

最深積雪量の合計：59,766 cm

$$\text{平均積雪量} = \frac{59,766}{1,925} = 31.1 \text{ [cm]}$$

構内の除雪方法について

積雪時の発電所の体制

- ・車両の通行等に支障がないよう、積雪深が5～10cmに達した場合、除雪を開始する。
- ・委託により実施しており、9台の除雪機（ホイールローダ等の重機）により除雪を行う。

除雪ルート

- ・除雪ルートは構内の道路及び可搬設備を使用する場合のアクセスルート



図 3-1 構内の除雪ルート（緑線）

構内道路の除雪写真



重機による除雪作業(1)



重機による除雪作業(2)



重機による除雪作業(3)



重機の凍結路面の滑り防止対策

原子炉建屋等の屋上の除雪運用について

評価対象の建屋は、設計基準積雪量の荷重に対して健全であることを確認しているが、積雪に対する頑健性を高めるため、建屋屋上の積雪量の監視及び気象情報（降雪予報）の収集を行い、除雪を実施する。

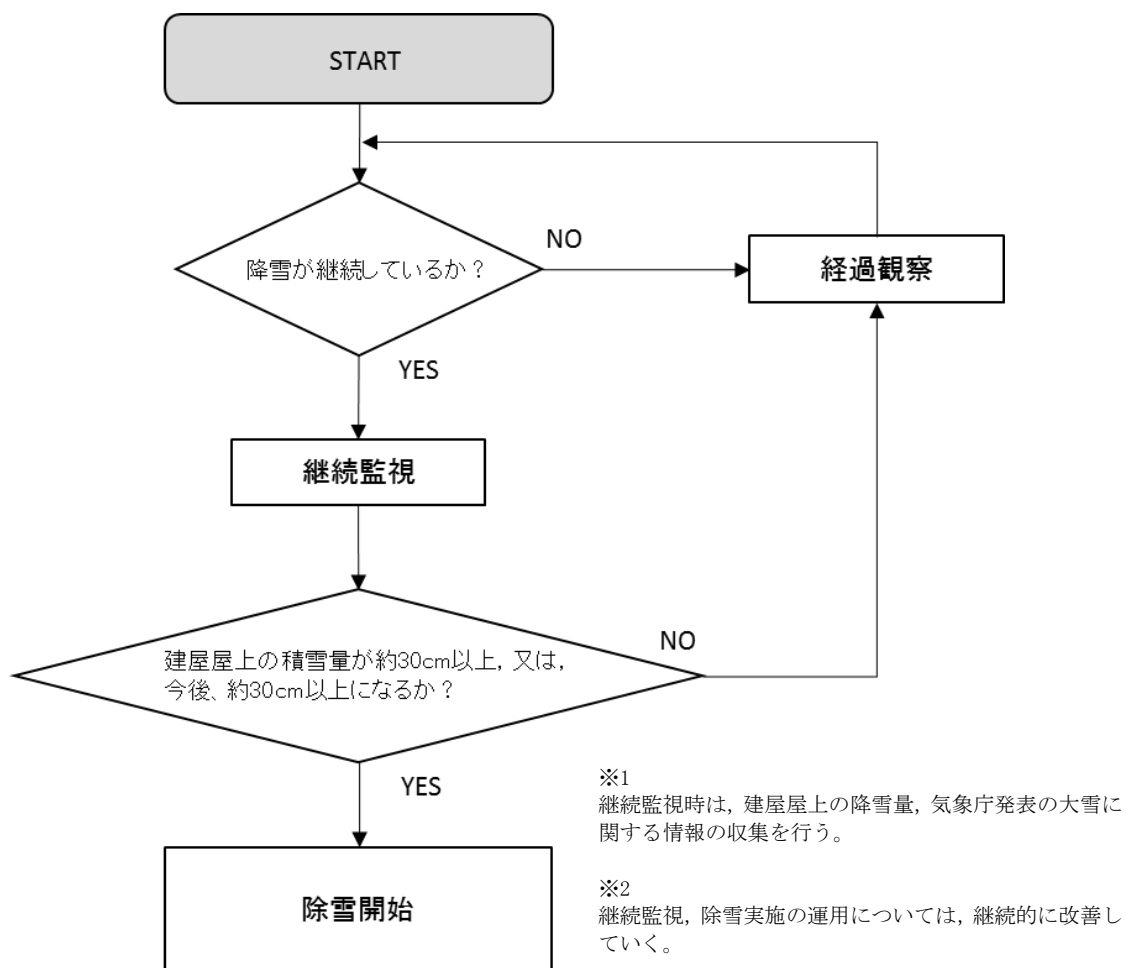


図 4-1 原子炉建屋等屋上積雪量の管理作業フロー

電源車，空冷式 GTG 等の除雪方法について

高台に配備している設備については，気象予報等を踏まえ除雪を実施し，緊急時の運転に支障がないようにしている。



設備の除雪 (1)



設備の除雪 (2)

年超過確率の推定方法

1. 評価方法

年超過確率の推定は、気象庁の「異常気象リスクマップ」の確率推定方法を採用して評価を実施する^[1]。

評価フローを図 6-1 示す。

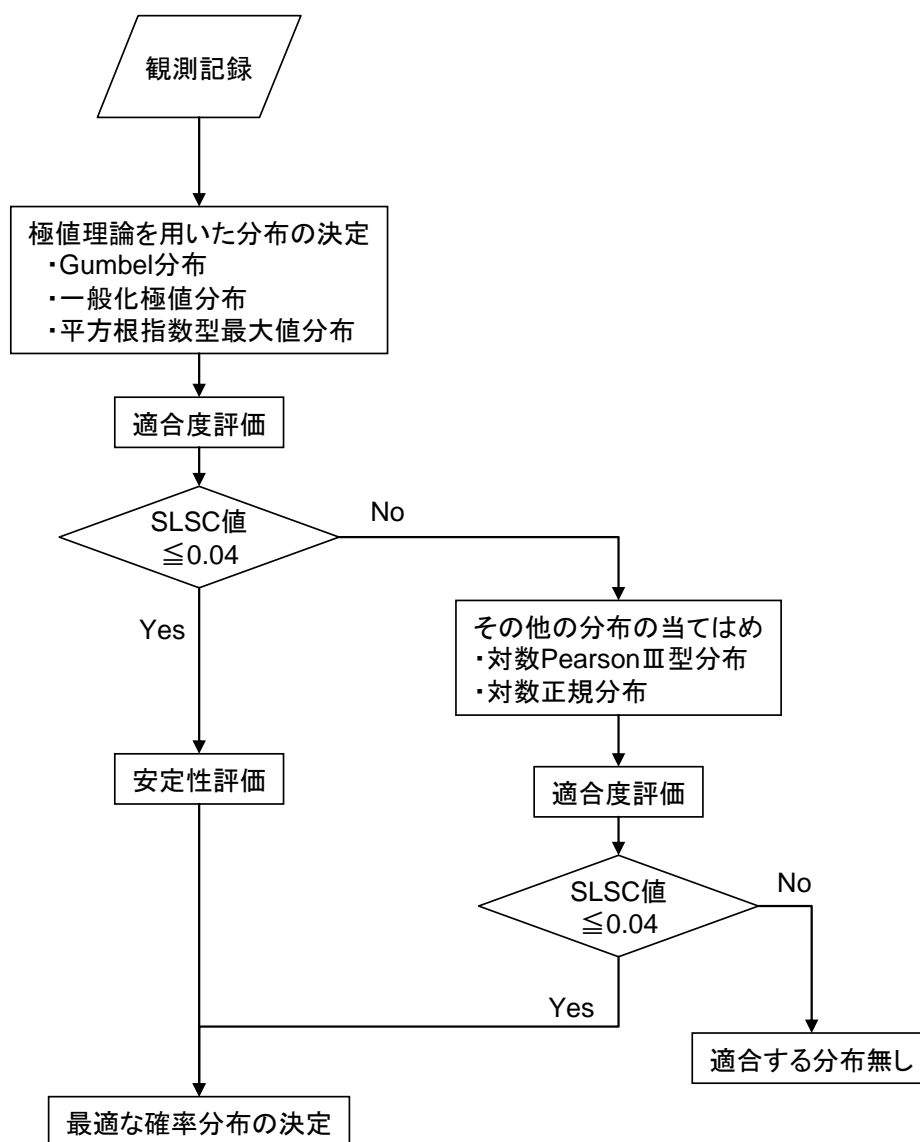


図 6-1 年超過確率評価フロー

(1) 確率分布の算出

観測記録から確率分布の分布特性を表す母数を推定し、確率分布形状を特定する。ここでは、極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）や従来から使用されている分布（対数 PearsonⅢ型分布、対数正規分布）の中から最適な確率分布を決定する。

確率分布モデルの母数推定については、以下に示す L 積率法（L Moments）や最尤法などの手法を用いる。^[2]

L 積率法

第 1 次の L 積率 λ_1 、第 2 次の L 積率 λ_2 、第 3 次の L 積率 λ_3 はそれぞれ以下のように定義される。

$$\lambda_1 = b_0$$

$$\lambda_2 = 2b_1 - b_0$$

$$\lambda_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0$$

ここで、

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j$$

$$b_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (j-1)x_j$$

$$b_2 = \frac{1}{N(N-1)(N-2)} \sum_{j=1}^N (j-1)(j-2)x_j$$

N : 標本数

x_j : N 個の標本を昇順に並び替えたときの小さい方から j 番目の値

最尤法

以下に示す対数尤度関数 L が最大となる a, b を算出

$$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$$

$f(x)$: 確率密度関数

また、例として極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）の母数推定方法、及び超過確率 p に対応する値の算出方法を表 6-1 に示す。

表 6-1 極値分布の母数推定法について

分布	母数推定法	母数	クオンタイル (超過確率 p に対応する値)
Gumbel 分布	L 積率法 (2 母数)	$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2}$ $c = \lambda_1 - 0.5772157a$	$x_p = c - a \cdot \ln[-\ln(p)]$
一般化 極値分布 (GEV 分布)	L 積率法 (3 母数)	$k = 7.859d + 2.9554 * d^2$ ここで $d = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ $a = \frac{k\lambda_2}{(1 - 2^{-k}) \cdot \Gamma(1 + k)}$ $c = \lambda_1 - \frac{a}{k} \cdot [1 - \Gamma(1 + k)]$	$x_p = c + \frac{a}{k} \cdot \{1 - [-\ln(p)]^k\}$
平方根指数型 最大値分布	最尤法 (2 母数)	$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$ $= N \ln a + N \ln b - N \ln 2 - \sum_{j=1}^N \sqrt{bx_j}$ $- a[\sum_{j=1}^N \exp(-\sqrt{bx_j}) + \sum_{j=1}^N \sqrt{bx_j} \exp(-\sqrt{bx_j})]$	$x_p = \frac{t_p^2}{b}$ ここで $\ln(1 + t_p) - t_p = \ln[-\frac{1}{a} \ln(p)]$

(2) 適合度評価

算出した分布がどの程度、観測記録と適合しているかを確認し分布の適合度を評価する。

本評価では、分布の適合度を SLSC (Standard Least Squares Criterion) と呼ばれる指標で評価する。

SLSC は、観測値をプロットイングポジション公式で並べた場合と、確率分布から推定した場合との確率の差を指標化した値である。(図 6-2)

SLSC が小さいほど、適合度が高く、経験的な分布とよくフィットする。本評価では SLSC が 0.04 以下で適合していると判断する。

プロットイングポジション公式とは、経験的に求められた公式であり、観測値の個数、大きさの順に並べたときの順位と再現期間との関係を数式化したものである。同公式では、いくつかの式が提案されているが、本評価においては多くの分布系によく適合する以下の式を採用する。

$$T(i) = \frac{N + 0.2}{i - 0.4}$$

ここで、 N はデータの個数であり、大きい方から i 番目のデータの再現期間* (一日当たりの降雪量の確率年) $T(i)$ とする。

※：ある現象（例えば 1 日 80cm が降雪すること）が 1 回起こりうる「50 年」「100 年」という期間^[1]

このとき、SLSC 値は、データ値と関数値（それぞれ標準化した値）を 2 乗平均した以下の式で表される。^[2]

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{0.99} - s_{0.01}|}$$

ここで、

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2$$

$s_{0.99}$, $s_{0.01}$: それぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量

s_i : 順序統計量データ x_i を推定母数で変換した標準変量

r_i : プロットングポジションに対応した理論クオンタイルを推定母数で変換した標準変量

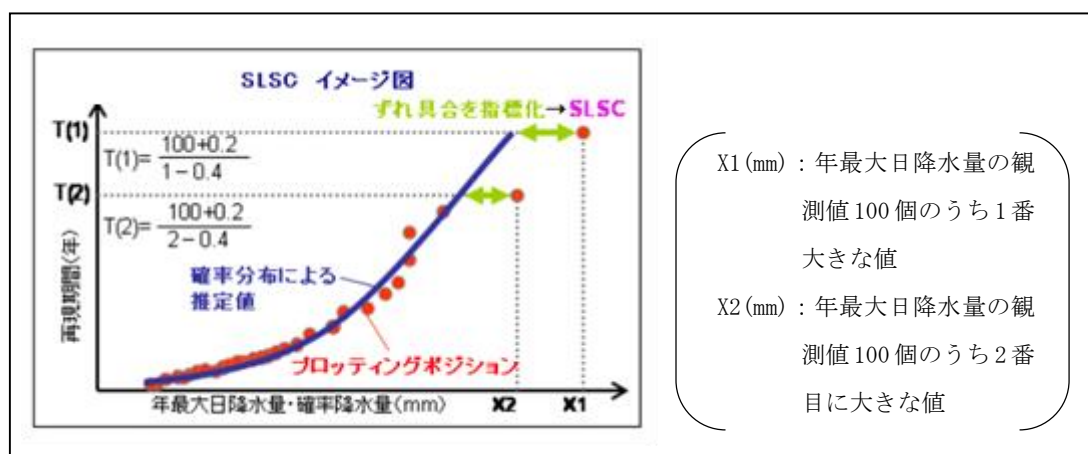


図 6-2 SLSC のイメージ図 (確率降水量の場合) ^[1]

(3) 安定性評価

(2) で分布の適合度を評価し、SLSC が 0.04 以下を満足した場合には、次に分布の安定性を評価する。現在得られている観測値をランダムに抜き取った場合に、結果が大きく変化しないことを評価する。本評価では安定性評価には Jack knife 法を用いる。

[1] 気象庁 HP (http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/cal_qt.html)

[2] 星清, 1995 : 水門統計解析, 開発土木研究所月報 No. 540

2. 評価結果

表 6-2 一日あたりの積雪量に対する年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.038	0.067	0.038

確率年	積雪量		
10	58.0	68.0	57.9
100	84.3	117.6	88.8
10000	135.9	249.8	165.2

確率年	Jack knife 推定誤差		
10	4.8	2.8	4.8
100	8.4	3.5	10.2
10000	15.9	5.0	43.7

表 6-3 年最深積雪量に対する年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.037	0.034	0.032

確率年	積雪量		
10	119.0	117.0	118.1
100	193.1	220.2	223.7
10000	338.4	504.5	575.3

確率年	Jack knife 推定誤差		
10	14.8	15.2	14.7
100	26.4	33.1	38.2
10000	49.8	85.7	226.6

(単位 : cm)

表 7-1 建屋等の許容荷重と設計積雪荷重の比較
(外部事象防護対象施設のうち建屋等)

区分	対象建屋・機器	許容荷重[N/m ²] ^{※1}		判定 ^{※2}
		6号炉	7号炉	
建屋	原子炉建屋	12000	12000	○
	コントロール建屋	21000 (6, 7号炉共通)		○
	タービン建屋 (熱交換器エリア含む)	10000	10000	○
	廃棄物処理建屋	9000 ^{※3} (6, 7号炉共通)		○
屋外 設備	軽油タンク	13000	13000 (設計荷重)	○
	燃料移送ポンプ	別途, 防護対策を実施するなかで設計基準積雪荷重を考慮した設計とする。		○ ^{※4}

表 7-2 建屋等の許容荷重と設計積雪荷重の比較
(その他安全施設)

区分	対象建屋	許容荷重[N/m ²] ^{※1}		判定 ^{※2}
		6号炉	7号炉	
建屋	緊急時対策所 (免震重要棟)	14000		○
	緊急時対策所 (5号炉原子炉建屋)	32000		○

※1: 有効数字2桁で切り捨て

※2: 設計基準積雪荷重は以下の通り算出し, 許容荷重値内であることを確認した。

$$167\text{cm (基準積雪量)} \times 29.4\text{N/cm} \cdot \text{m}^2 \text{ (新潟県建築基準法施工細則)} = 4909.8\text{N/m}^2$$

※3: 廃棄物処理建屋については, 屋上のルーフブロックを撤去することとしており, 許容堆積荷重の暫定値として記載。

※4: 防護対策を実施する予定のため, 機能維持するとした。

表 8-1 給気口等からの閉塞高さ (1/3)

場所	系統	名称	TMSL[m]	設置高さ[m]※1	判定※2	写真 番号
K6 C/B	MCR・C/B 空調	MCR・C/B 計測制御電源盤区域(A)給気ルーバ	28.0	3.9	○	
K6 C/B	C/B 空調	C/B 計測制御電源盤区域(B)・(C)・常用電気品区域給気ルーバ	25.7	8.5	○	
K6 C/B	MCR	MCR 排気ルーバ	18.3	6.3	○	
K6 C/B	C/B 空調	C/B 計測制御電源盤区域(A)排気ルーバ	14.8	2.8	○	
K6 C/B	C/B 空調	C/B 計測制御電源盤区域(B)排気ルーバ	18.3	6.3	○	
K6 C/B	C/B 空調	C/B 計測制御電源盤区域(C)排気ルーバ(A)	14.8	2.8	○	
K6 C/B	C/B 空調	C/B 計測制御電源盤区域(C)排気ルーバ(B)	14.8	2.8	○	
K6 C/B	C/B 空調	区分Ⅲバッテリー室排気ルーバ	14.9	2.9	○	
K7 C/B	MCR・C/B 空調	MCR・C/B 共用給気ルーバ	28.3	4.2	○	1
K7 C/B	MCR・C/B 空調	MCR・C/B 共用排気ルーバ	28.3	4.2	○	1
K7 C/B	C/B 空調	C/B 計測制御電源盤区域(C)バッテリー室排気ルーバ	15.2	3.2	○	
K7 C/B	C/B 空調	区分Ⅲバッテリー室排気ルーバ	15.2	3.2	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(A)非常用給気ルーバ(A)	23.7	11.7	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(A)非常用給気ルーバ(B)	23.7	11.7	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(B)非常用給気ルーバ(A)	23.7	11.7	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(B)非常用給気ルーバ(B)	23.7	11.7	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(C)非常用給気ルーバ(A)	23.7	11.7	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(C)非常用給気ルーバ(B)	23.7	11.7	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(A)非常用排気ルーバ	19.8	7.8	○	
K6 R/B	DG 空調	DG(B)非常用排気ルーバ	19.8	7.8	○	

※1：地面又は建屋屋上からの高さ

※2：設置高さが基準積雪量（167cm）以上であることを判定基準としている。

表 8-1 給気口等からの閉塞高さ (2/3)

場所	系統	名称	TMSL[m]	設置高さ[m] ^{※1}	判定 ^{※2}	写真 番号
K6 R/B	DG 空調	DG(C) 非常用排気ルーバ	19.8	7.8	○	
K6 R/B	DG/Z 空調	DG(A)/Z 給気ルーバ	28.9	16.9	○	
K6 R/B	DG/Z 空調	DG(B)/Z 給気ルーバ	29.4	17.4	○	
K6 R/B	DG/Z 空調	DG(C)/Z 給気ルーバ	31.9	19.9	○	
K6 R/B	DG/Z 空調	DG(A)/Z 排気ルーバ	25.5	13.5	○	
K6 R/B	DG/Z 空調	DG(B)/Z 排気ルーバ	25.4	13.4	○	
K6 R/B	DG/Z 空調	DG(C)/Z 排気ルーバ	34.4	22.4	○	
K6 T/B	Hx/A 空調	Hx/A(A)(C) 非常用共用給気ルーバ	19.7	7.7	○	
K6 T/B	Hx/A 空調	Hx/A A系非常用電気品室排気ルーバ	28.6	2.8	○	
K6 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常用・(A) 非常用共用排気ルーバ	15.5	3.5	○	
K6 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常用・(B) 非常用給気用バードスクリーン	31.1	5.3	○	
K6 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常用・(B) 非常用共用排気ルーバ	28.6	2.8	○	
K6 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常用・(C) 非常用共用排気ルーバ	15.5	3.5	○	
K7 R/B	DG 空調	DG(A) 非常用給気ルーバ(A)	23.5	11.5	○	2, 3
K7 R/B	DG 空調	DG(A) 非常用給気ルーバ(B)	23.5	11.5	○	2, 3
K7 R/B	DG 空調	DG(B) 非常用給気ルーバ(A)	23.5	11.5	○	4, 5
K7 R/B	DG 空調	DG(B) 非常用給気ルーバ(B)	23.5	11.5	○	4, 5
K7 R/B	DG 空調	DG(C) 非常用給気ルーバ(A)	23.5	11.5	○	6, 7
K7 R/B	DG 空調	DG(C) 非常用給気ルーバ(B)	23.5	11.5	○	6, 7

※1：地面又は建屋屋上からの高さ

※2：設置高さが基準積雪量（167cm）以上であることを判定基準としている。

表 8-1 給気口等からの閉塞高さ (3/3)

場所	系統	名称	TMSL [m]	設置高さ [m]※1	判定※2	写真 番号
K7 R/B	DG 空調	DG (A) 非常用排気ルーバ	19.8	7.8	○	
K7 R/B	DG 空調	DG (B) 非常用排気ルーバ	19.8	7.8	○	
K7 R/B	DG 空調	DG (C) 非常用排気ルーバ	19.8	7.8	○	
K7 R/B	DG/Z 空調	DG (A) /Z 給気ルーバ	29.2	17.2	○	
K7 R/B	DG/Z 空調	DG (B) /Z 給気ルーバ	29.2	17.2	○	
K7 R/B	DG/Z 空調	DG (C) /Z 給気ルーバ	31.9	19.9	○	
K7 R/B	DG/Z 空調	DG (A) /Z 排気ルーバ	25.3	13.3	○	
K7 R/B	DG/Z 空調	DG (B) /Z 排気ルーバ	25.3	13.3	○	
K7 R/B	DG/Z 空調	DG (C) /Z 排気ルーバ	34.9	22.9	○	
K7 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 非常用 (A) 給気ルーバ	29.8	4.0	○	
K7 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常・非常用 (A) 排気ルーバ	29.4	3.6	○	
K7 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常・非常用 (B) 給気ルーバ	29.4	3.6	○	
K7 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常・非常用 (B) 排気ルーバ	29.5	3.7	○	
K7 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 非常用 (C) 給気ルーバ	29.8	4.0	○	
K7 T/B	Hx/A 空調	Hx/A 常・非常用 (C) 排気ルーバ	14.9	2.9	○	

※1：地面又は建屋屋上からの高さ

※2：設置高さが基準積雪量（167cm）以上であることを判定基準としている。

給気ルーバ

写真番号	1	写真番号	2	写真番号	3	写真番号	4
設備名	MCR 給気・排気ルーバ	設備名	D/G(A)給気ルーバ	設備名	D/G(A)給気ルーバ	設備名	D/G(B)給気ルーバ
写真		写真		写真		写真	
							

写真番号	5	写真番号	6	写真番号	7		
設備名	D/G(B)給気ルーバ	設備名	D/G(C)給気ルーバ	設備名	D/G(C)給気ルーバ		
写真		写真		写真			
							

落雷影響評価について

1. 基本方針

予想される最も苛酷と考えられる条件を設計基準として設定の上、安全施設の機能が落雷による雷撃電流に対して維持され、安全機能が損なわれないように設計する。

2. 基準雷撃電流値の設定

基準雷撃電流値の設定は、以下の(1)及び(2)を参照するとともに、参考として(3)を評価・確認のうえ設定する。

(1) 規格・基準類

原子力発電所における耐雷設計の規格・基準には電気技術指針 JEAG4608⁽¹⁾があり、以下のように規定している。

(a) JEAG4608 では、電力設備の避雷設備の設計について、電力中央研究所報告 T40「発電所および地中送電線の耐雷設計ガイド」⁽²⁾を参照している。同ガイドでは、500kV 開閉所における送電線ならびに電力設備に対し、150kA を想定雷撃電流として推奨している。

(b) JEAG4608 では、建築物等の避雷設備に関して、日本工業規格 JIS A 4201:2003「建築物等の雷保護」や日本工業規格 JIS A 4201-1992「建築物等の避雷設備（避雷針）」を参照している。JIS A 4201:2003 では、避雷設備について、設備を保護する効率に応じ設定するグレード分けである保護レベルごとに規定している。保護レベルは、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの4段階に設定され、保護レベルⅠは最も小さい雷撃電流をもつ雷まで捕捉できる。

保護レベルの設定にあたって、JEAG4608 では原子力発電所の危険物施設に対する保護レベルを IEC/TR 61662⁽³⁾に基づく選定手法により保護レベルⅣと評価している。また、消防庁通知⁽⁴⁾に基づき、原子力発電所の危険物施設では保護レベルⅡを採用すると規定している。

以上2種類より保守的に保護レベルを決定すると、保護レベルⅡとなる。JIS A 4201:2003 においては、保護レベルに応じた最大雷撃電流値は具体的に示されていないものの、日本工業規格 JIS-Z 9290-4⁽⁵⁾において、

保護レベルに応じた最大雷撃電流値が定められており、保護レベルⅡの場合の最大雷撃電流値は、150kA、保護レベルⅣの場合の最大雷撃電流値は100kAと規定されている。

以上、(a)、(b)より規格・基準類による想定すべき雷撃電流値のうち最大のもののは150kAである。

(2) 観測記録

雷撃電流の観測記録として、落雷位置標定システム（IMPACT[※]）による落雷データをを用いた。落雷は大きく夏季雷、冬季雷に大別されるが、新潟県全域から本州内陸部にかけて1999年～2012年（14年間）に夏季（4月から10月）約630,000件、冬季（11月から3月）約63,000件が確認されており、最大雷撃電流値はそれぞれ460kA（2004年4月24日 新潟県北部と山形県との県境の山間部）、449kA（2010年11月29日 新潟県沖合）である。

ただし、IMPACTの結果は柏崎刈羽原子力発電所を中心とした日本海から内陸部までの範囲を拡張して観測したものであり、過去の柏崎刈羽原子力発電所にて実施した落雷観測記録の月別結果（別紙1）から、日本海側に位置する柏崎刈羽原子力発電所の落雷特性としては、冬季雷が支配的であることが分かる。

以上より、観測記録の最大値は、新潟県全域から本州内陸部にかけての記録として460kAである。

※IMPACT…雷観測センサー、標定計算装置により、雷撃の発生位置や電流値を測定するシステム。主に送電線、配電線並びに変電所電力設備への雷撃発生情報の取得を目的に使用している。

(3) 年超過確率評価

別紙1より、柏崎刈羽原子力発電所構内の雷撃頻度調査ならびに避雷鉄塔による雷遮蔽効果検証のため、1996年～2005年（8年4ヶ月間）にかけて落雷観測を実施しており、その観測記録より求めた雷撃頻度は4.7件/年である。また、雷撃電流発生頻度分布については、T40にて報告されている雷撃電流値に対する累積頻度を使用する。

別紙2より、柏崎刈羽原子力発電所敷地への年超過頻度 10^{-4} 件/年となる雷撃電流値は、雷撃電流発生頻度分布から約560kAとなる。これは観測記録の最大値460kAを上回る値であり、年超過確率に基づく評価は最も苛酷な条件と言

える。こうした過大な落雷の原子炉建屋への直撃を防ぐため、柏崎刈羽原子力発電所では、避雷鉄塔を設置している。この避雷鉄塔による遮蔽効果を考慮した雷撃比率評価の結果、6号炉及び7号炉原子炉建屋への年超過頻度 10^{-4} 件/年となる雷撃電流値は、約 156kA となる。(別紙2 1.2)

別紙 1, 2 の頻度評価結果から導いたハザード曲線を図 1 に示す。また、(1)規格・基準類の値 150kA について年超過確率を確認した結果、 1.2×10^{-4} /年となった。

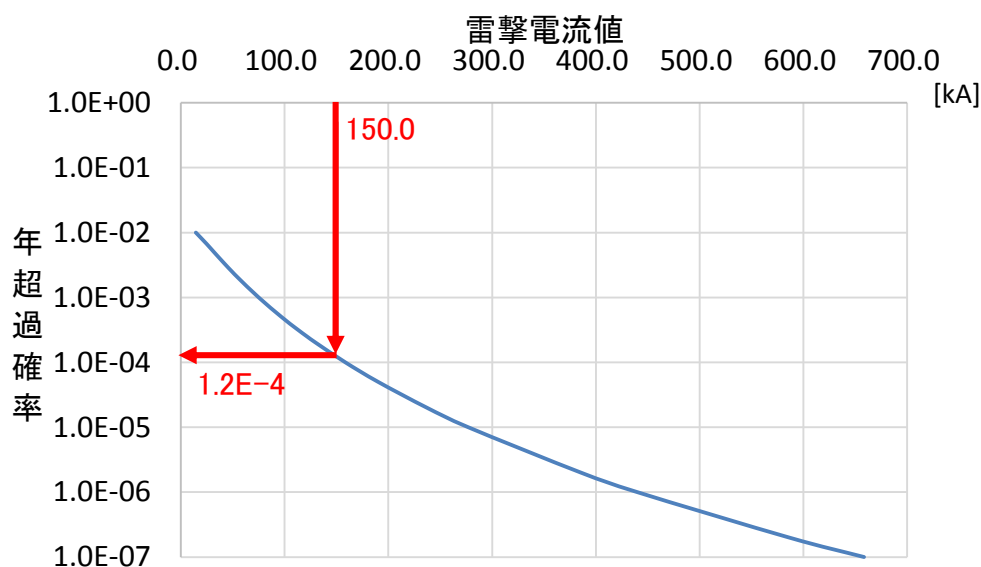


図 1 雷撃電流値ハザード曲線

上記(1)規格・基準類における電流値 150kA は建屋への想定される雷撃電流値について定めている。(2)観測記録における電流値 460kA は、より広い新潟県周辺の広範な地域で観測された雷撃電流値を示しており遮への効果は考慮されておらず、遮への効果を考慮した場合の電流値は 114kA となる。設計基準電流値は、避雷鉄塔等の遮への効果を考慮した上で建屋内機器への影響を見るという観点から、原子炉建屋頂部排気筒への雷撃電流を想定し設定する。(1)規格・基準類の電流値 150kA が、(3)年超過確率評価において、 1.2×10^{-4} /年であったことから、更なる裕度を確保するため、年超過確率評価 10^{-4} /年の値約 156kA を参考に、200kA と設定する。

3. 安全施設の健全性評価

設計基準の雷撃電流値（原子炉建屋頂部排気筒への 200kA の雷撃電流）によって安全施設が安全機能を損なうことがない設計であることを確認するために、図 2 に示すフローに沿って評価・確認を実施した。

(1) 建屋

原子炉建屋などの建築基準法に定められる高さ 20m を超える建築物等には避雷設備を設けている。また、避雷設備の接地極を構内接地網と接続し接地抵抗を下げる等の対策を実施していることから影響を受けにくい設計としている。

(2) 原子炉建屋等に内包される設備

原子炉建屋には屋上に排気筒（高さ 86.5m）を設置しており、比較的落雷の頻度が高いと考えられる。(1) で記載した雷害対策を実施しているため影響を受けにくいと考えられるものの、建屋に内包される電気・計装設備については、大地電位上昇により接地系間に生じる電位差や、雷電流の拡散による誘導電流により制御ケーブルに生じるサージによって、機器が絶縁破壊に至る可能性が有る。このため、7号炉で実施した雷インパルス試験の結果を参考に、設計基準電流が原子炉建屋頂部排気筒に流れた際の誘導電圧を算出し、建屋内部の電源盤、制御盤などの重要設備が損傷するリスクを評価し、設計基準である原子炉建屋頂部排気筒への 200kA 落雷により安全機能が損なわれないことを確認した。（別紙3）

(3) 屋外設備

軽油タンクについては接地を構内接地網に接続し接地抵抗を低減しており影響を受けにくい設計としている。また、非常用ディーゼル発電機燃料移送系については、計装設備として軽油タンクの油面計があるが、万一当該機器の損傷に至る場合にも、軽油タンクの油量については現場確認が可能であり、当該機器の喪失によってプラントの安全機能に影響が及ぶことはない。

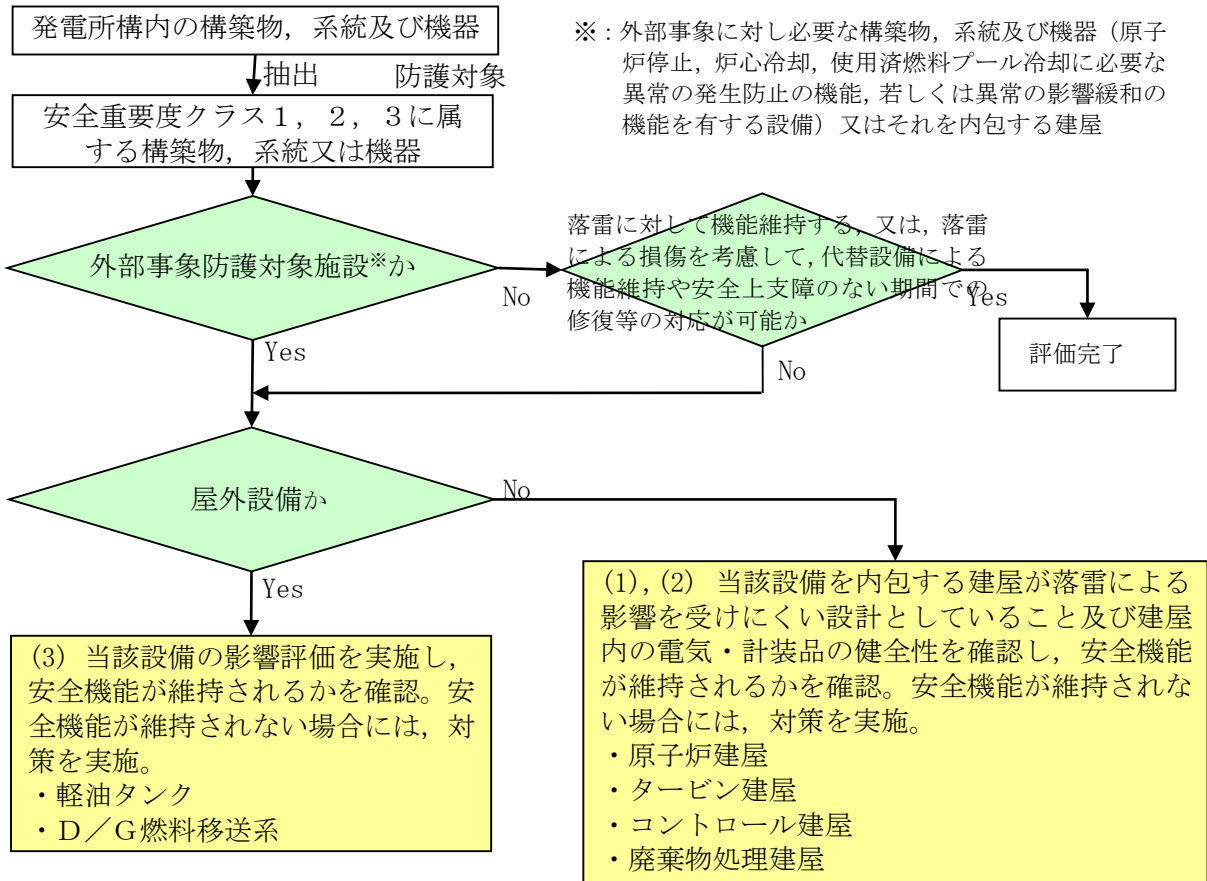


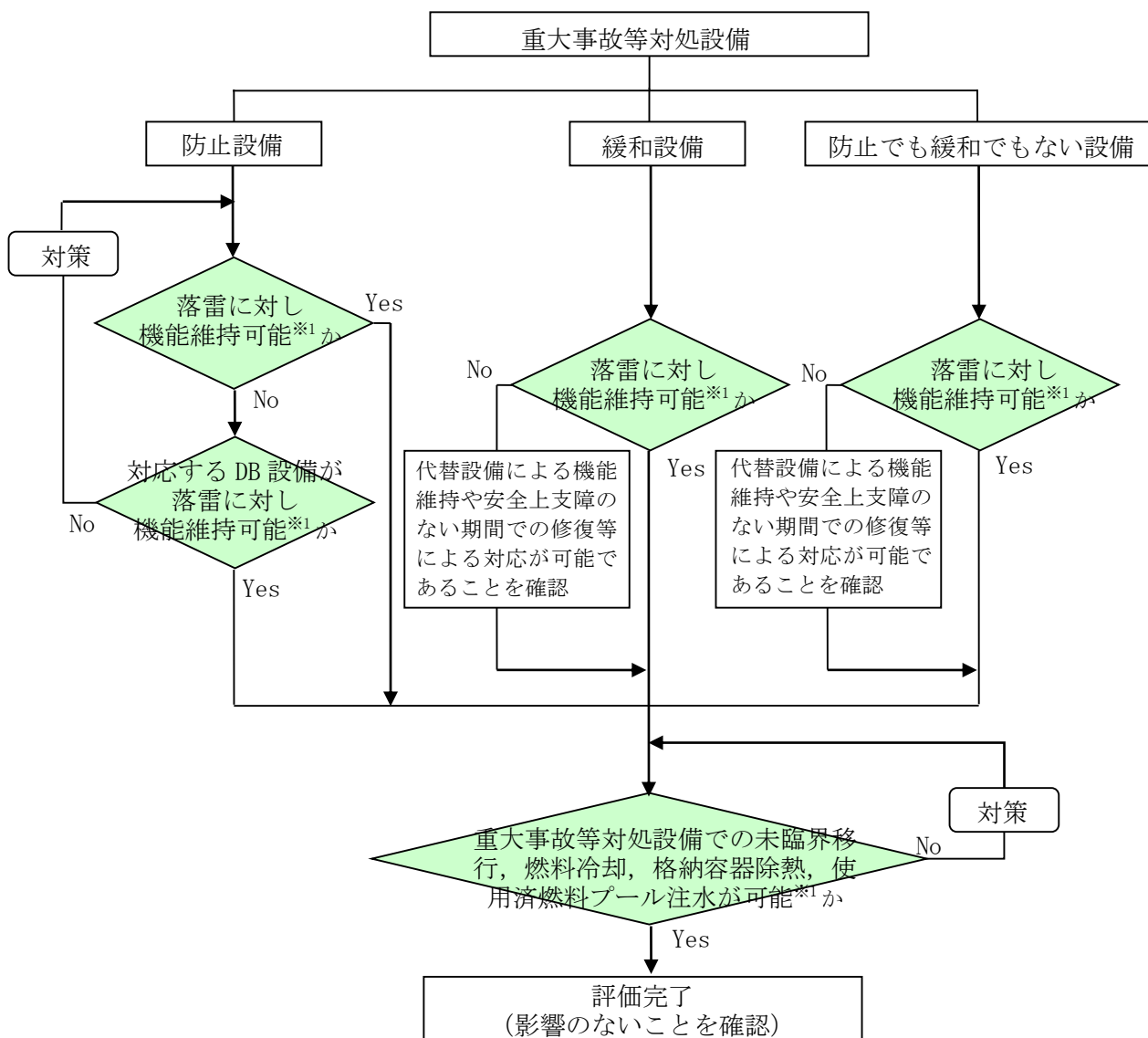
図2 落雷に対する安全施設の評価フロー

4. 重大事故等対処設備に対する考慮

重大事故等対処施設の内、屋内設備については、建屋内にあることから落雷の影響を受けにくい。また、屋外設置の可搬型設備は、可搬型重大事故等対処設備保管場所の一部（荒浜側）は、近傍に送電鉄塔（新新潟幹線・南新潟幹線）を設置していることから落雷の影響を受けにくい。また、設備の高さが20mを超えるようなものはなく落雷の影響を受けにくい。また、重大事故等対処施設の安全機能が喪失した場合においても、建屋による防護の観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認した。

図3に落雷に対する重大事故等対処施設の評価フローを示す。

なお、落雷に対する重大事故等対処設備の設計方針は、設置許可基準規則第43条（重大事故等対処設備）にて考慮する。



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋（原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋）が落雷による影響を受けにくい設計としていることを確認し、安全機能が維持されることを確認。

図3 落雷に対する重大事故等対処設備の評価フロー

参考文献

- (1) 電気技術指針 JEAG4608(2007) : 「原子力発電所の耐雷指針」
- (2) T40 電力中央研究所報告 発電所および地中送電線の耐雷設計ガイド (1996)
- (3) IEC/TR 61662(1995) : Assessment of the risk of damage due to lightning.
- (4) 消防庁通知(2005) : 平成 17 年 1 月 14 日消防危第 14 号危険物の規則に関する規則の一部を改正する省令等の施行について
- (5) JIS-Z 9290-4(2009) 雷保護第 4 部 : 建築物内の電気及び電子システム

柏崎刈羽原子力発電所への落雷頻度および雷撃電流分布の分析

1. 構内落雷観測結果の概要

年間落雷発生頻度については、柏崎刈羽原子力発電所における落雷観測結果をもとに算出する。

過去 1996 年～2005 年の 8 年 4 ヶ月の間、構造物（避雷鉄塔、排気筒、通信・送電鉄塔）への雷撃回数について観測（静止カメラによる雷撃様相撮影）を実施した結果 776 件が報告されており、70%以上が避雷鉄塔への落雷となっている（表 1-1）。また、原子炉建屋への落雷は観測されていない。これは、避雷鉄塔や排気筒に遮へいされるためと考えられる。

また、落雷観測記録の月別結果を図 1-1 に示す。夏季（4 月から 10 月）の落雷が占める割合は 5.3%程度であり、日本海側に位置する柏崎刈羽原子力発電所の落雷特性としては、冬季雷が支配的であることが分かる。

表 1-1 構内落雷観測結果（1996 年～2005 年・カメラ観測）

分類	落雷箇所	落雷数 (件)	%
避雷鉄塔	荒浜側避雷鉄塔	248	32.0
	大湊側避雷鉄塔	193	24.9
	新設避雷鉄塔	108	13.9
排気筒	1, 2 号炉排気筒	19	2.4
	3 号炉排気筒	27	3.5
	4 号炉排気筒	50	6.4
	5 号炉排気筒	58	7.5
	6 号炉排気筒	1	0.2
	7 号炉排気筒	2	0.3
その他	無線通信鉄塔	27	3.5
	送電鉄塔	38	4.9
	その他	5	0.6
—	合計	776	100

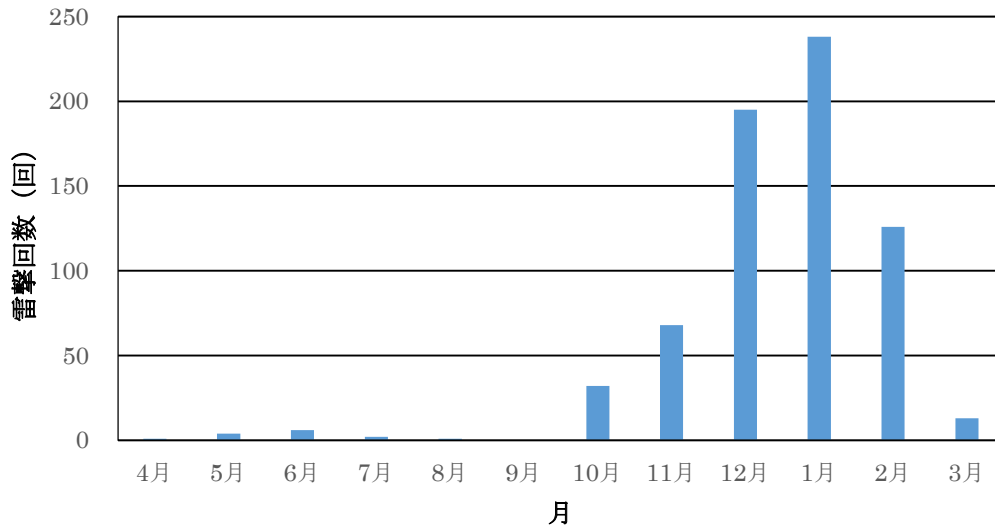


図 1-1 構内落雷観測の月別結果 (1996 年～2005 年・カメラ観測)

2. 雷撃頻度の算出

構内落雷観測では、1. のカメラによる雷撃観測に加え避雷鉄塔 3 基に設置した波形電流観測装置により、雷撃電流値・波形観測を実施している。この観測結果における雷撃電流頻度分布を図 1-2 に示す。測定された雷撃電流頻度分布の特徴として累積頻度 50%値が電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布の 26kA に比べ 3 kA 程度と小さいこと、12 kA (累積頻度 5%) 付近で分布が屈曲していることが挙げられる。この原因としては、リターンストローク^{*}を伴わない上向きリーダを小電流の落雷として観測したことが考えられる。そこで、リターンストロークを伴わない上向きリーダをカウントしていることが、雷撃電流頻度分布の屈曲に影響していると考え、12kA 以下の除いた分布および電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布を図 1-3 に示す。12kA 以下を除いた分布は、除かない分布に比べ電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布に接近し差がないと言えることから、避雷鉄塔における雷撃電流観測結果の 5%程度がリターンストロークを伴う落雷とすることは妥当であると考えられる。

また、図 1-4 に示す電力中央研究所の福井県における冬季雷の観測結果⁽¹⁾においては、10 kA 以下の小電流データを除いた分布を図示して、わが国で電力設備の耐雷設計に用いられている夏季雷の雷撃電流頻度分布と比較し、「超高压送電線等の耐雷設計上問題となる大電流領域では、その頻度はほとんど差がない」としている。図 1-3、図 1-4 は同様の傾向を示していることから、避雷鉄塔における雷撃電流観測結果の小電流データを取り除く取扱いが妥当であると言える。

表 1-1 のカメラ観測の結果は、8 年 4 ヶ月間で 776 件が記録されているが、構内面積約 4.2km²を踏まえると、年間の大地雷撃密度は 22 件/km²・年である。これは、従来用いられている年間雷雨日数 (IKL) を敷地周辺に用いた方法による 3.3 件/km²・年や、落雷位置標定システム (IMPACT) による観測結果に捕捉率を考慮し算出した 1.2 件/km²・年に比べ大きな値である。このためカメラ観測の結果についても、リターンストロークを伴わない上向きリーダを観測したために、雷撃回数が増加したと考えられる。そこで、敷地内への雷撃頻度を算出するにあたっては、表 1-1 の結果についても 5%程度がリターンストロークを伴った対地雷であると想定する。この場合、雷撃頻度を評価すると、次のようになる。

$$776 \text{ 件} \times 0.05 / 8 \text{ 年 4 ヶ月} = 4.7 \text{ 件} / \text{年}$$

※典型的な冬季雷では、上向きリーダと呼ばれる比較的小規模の放電が大地側から伸びていき雷雲に到達すると、主放電電流 (リターンストローク) として大きな電流が流れる。雷雲に到達しない上向きリーダはリターンストロークを誘導しないため、大きな雷撃に発展しない。

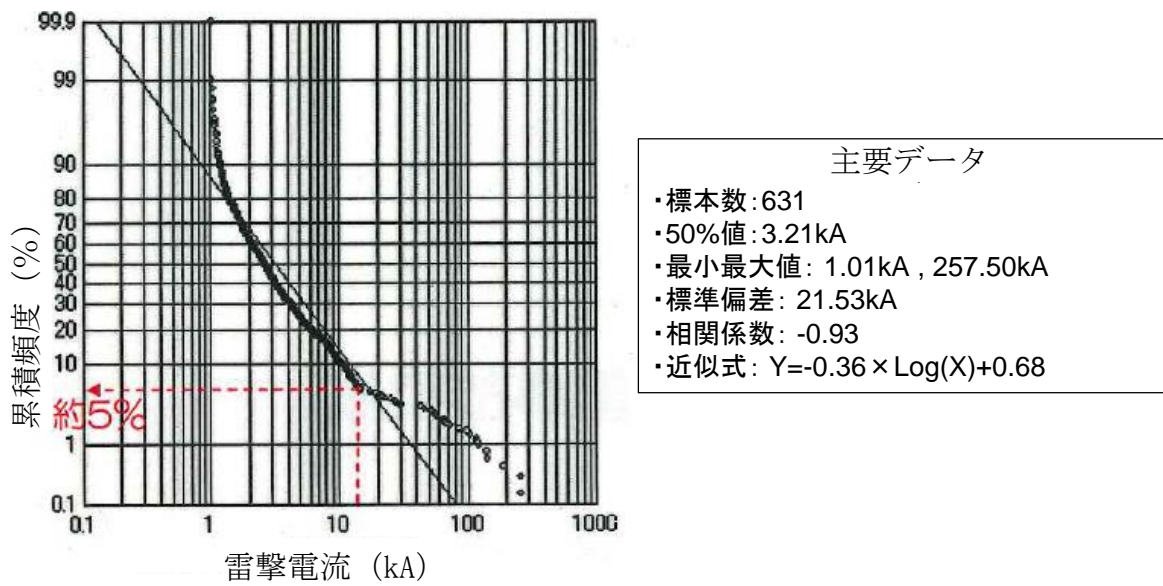


図 1-2 構内雷撃観測の雷撃電流累積頻度分布 (1996 年～2005 年・波形観測)

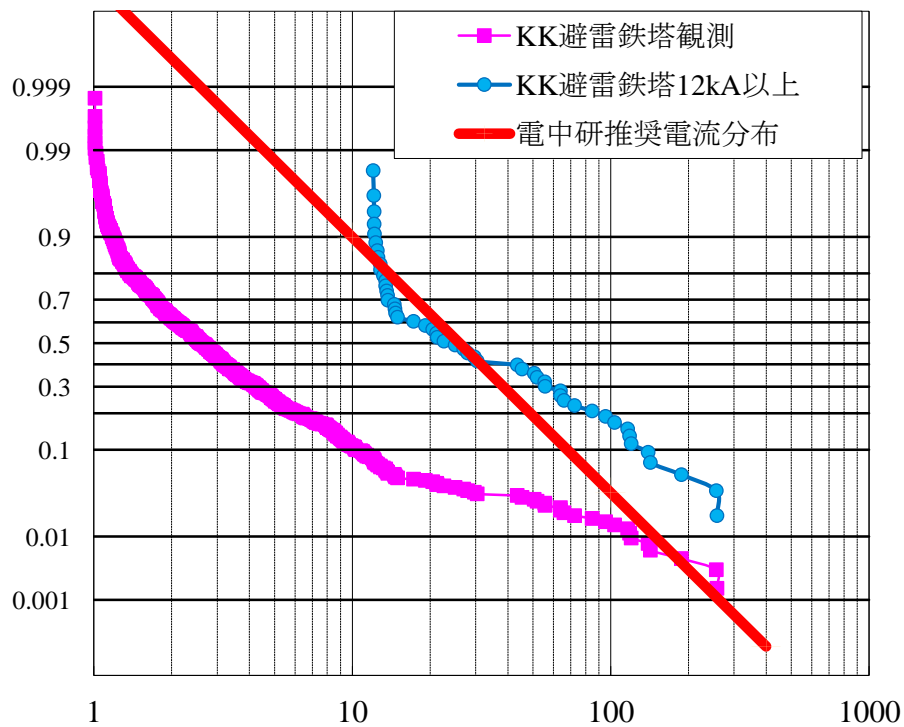


図 1-3 構内雷撃観測の雷撃電流累積頻度分布 (1996 年～2005 年・波形観測) と電力中央研究所推奨雷撃電流頻度分布

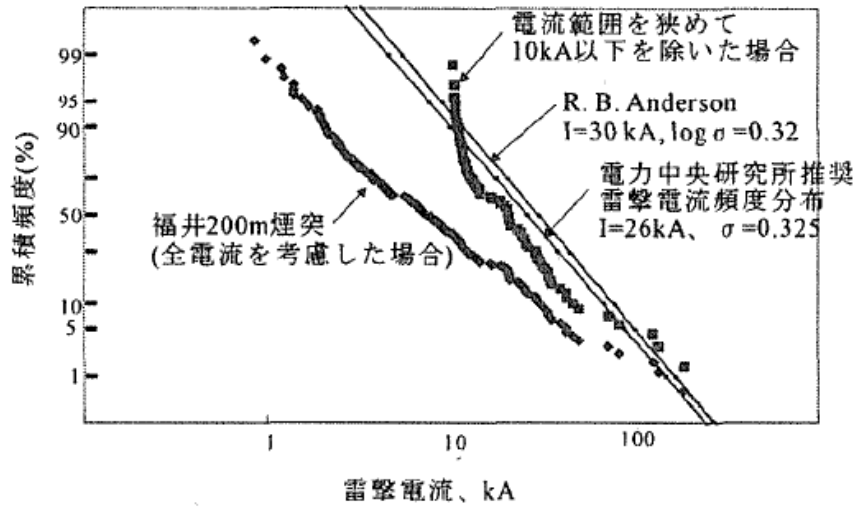


図 1-4 福井県の雷観測に基づく雷撃電流頻度分布

参考文献

- (1) T03024 電力中央研究所 日本海沿岸地域における冬季の上向き雷電流特性—
1989年度～2002年度—

柏崎刈羽原子力発電所構内への落雷分布評価

1. 発電所構内への落雷計算

日本海沿岸に位置する柏崎刈羽地域では冬季に雷が多く発生することから、耐雷設計上では冬季雷によるリスクが支配的な要因となる。冬季雷の特性として避雷鉄塔などの高構造物から上向きの雷が多く発生する。通常の耐雷設計は夏季雷を対象としており、冬季雷（上向き雷）を対象にした雷遮へい理論は未だ検討中である。現在のところ、実際に使用できる冬季雷に対する雷遮へい計算手法としては電力中央研究所で開発されたものが唯一と思われることから、電力中央研究所の手法により冬季雷による発電所構内建物への雷撃比率を計算し、原子炉建屋および独立排気筒への落雷頻度・電流値を算出した。

1.1. 計算手法

落雷頻度の算出に当たっては、冬季雷モデルを用いて発電所構内建物（独立排気筒や原子炉建屋）への雷撃比率を計算し、別紙 1 で評価した構内への落雷頻度（4.7 件/年）に基づいて、当該建物への 10^4 年における落雷件数を算出する。雷撃比率の計算においては、独立排気筒と原子炉建屋を対象として、評価対象外のその他建物へ落雷する可能性を除外して保守的に評価する。次に、この落雷件数の逆数から雷撃確率を算出して、雷撃電流頻度分布に基づき 10^4 年に想定される最大電流値を想定雷撃電流値として評価する。

1.1.1. 冬季雷モデル

上向きリーダに起因すると考えられる冬季雷では、複数地点、主に高構造物からほぼ同時にリーダが発生している事象が観測されており、また、一つの雷撃が生じても雷雲の全電荷は中和されずに別の上向きリーダが雷雲に達して同時雷撃を生じることもあり得る。

しかしながら、これら全てを考慮した解析は未だ可能になっていないことから、ここでは雷雲が近づいてきて構造物表面の電界がある臨界値を越えたときに上向きリーダが発生し、そのリーダが雷雲まで進展して構造物への雷撃が生じるモデルを考える。

冬季雷による上向き雷の発生として以下を仮定する（図 2-1, 図 2-2 参照）。

- 1) 雷雲が高構造物に近づいてくるとき、雷雲内の電荷は高さ H にある電荷 Q で代表されるものとする。
- 2) 雷雲が高構造物から R の距離まで近づくと、雷雲の電荷により地上高 h の高構造物先端の電界が臨界値 E_{crit} を越えて上向きリーダが発生し、高構造物への雷撃が生じる。すなわち、 R は雷雲電荷の大きさ Q 、その高さ H 、および構造物高さ h で定まる吸引半径であり、鉄塔を中心とした半径 R の領域に雷雲電荷が入ればその構造物に落雷が生じる。
- 3) 上向きリーダは雷雲の電荷に向かって直線的に進み、雷雲電荷に達すると雷撃となる。
- 4) 二つ以上の高構造物がある場合には、最初に上向きリーダが発生した構造物に雷撃が生じるとする。例えば、雷雲が近づいてきたとき、低構造物先端の電界が E_{crit} となる前に高構造物先端の電界が E_{crit} になれば高構造物に雷撃が発生する。

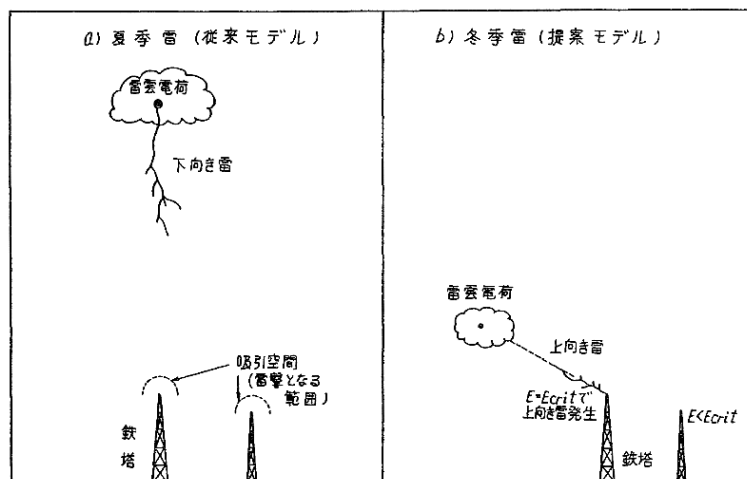


図 2-1 夏季雷と冬季雷のモデル

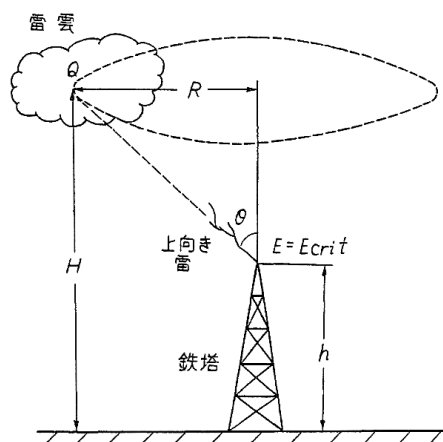


図 2-2 上向き雷の雷撃計算パラメータ

1. 1. 2. 二つの構造物がある場合の雷撃計算

各構造物において先端の電界が臨界値 E_{crit} を越えて上向き雷が発生する吸引距離 R_s を計算する。次に、各構造物に雷撃を生じる雷雲の襲来範囲を計算する。この時、図 2-3 のように、二つの構造物の相対位置、個々の構造物の吸引距離の大小関係により各構造物への雷の襲来範囲は変化する。

例えば、7号炉建屋周辺の高構造物の配置を図 2-4 に示す。対象となる7号炉建屋では排気筒が原子炉建屋屋上に設置され、その高さは86.5mである。周辺には315m離れて避雷鉄塔、263m離れて5号炉排気筒があり、また7号炉建屋と5号炉排気筒のほぼ中間には6号炉建屋がある。避雷鉄塔とこれらの建屋は図にあるようにほぼ一直線上に並んでいる。冬季雷では高構造物から上向きの雷放電が多く発生するが、7号炉建屋は、避雷鉄塔や5号炉排気筒など、より高い構造物に隣接して設置されているため、これらの高構造物によって雷が遮蔽され雷撃数は少なくなると考えられる。

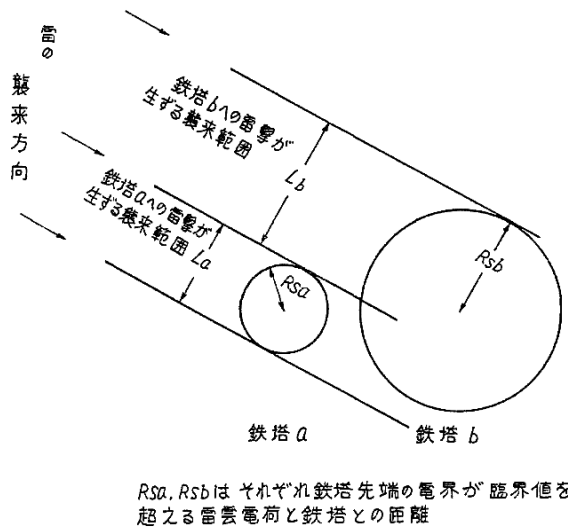


図 2-3 二つの構造物ある場合の雷撃範囲

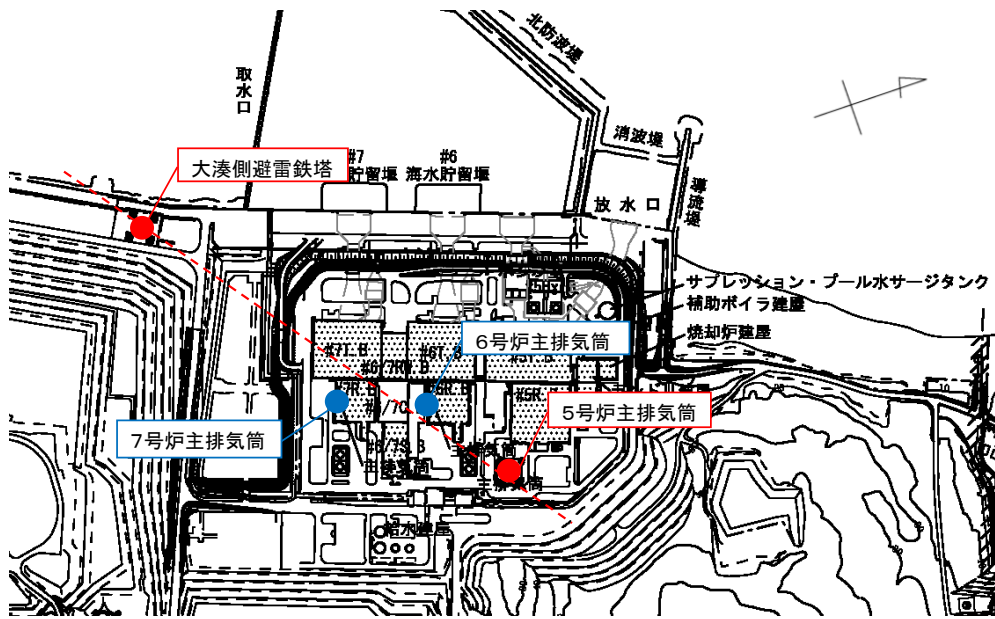


図 2-4 6号炉, 7号炉建屋付近の構内図

1.1.3. 雷撃対象と想定落雷数

① 雷撃対象

発電所構内の建造物の互いの遮へい効果を考慮して個々への雷撃を計算することは現状の計算手法では困難であり、また、建物を細かく区別するほど個々の建物への雷撃頻度は低下することから設計基準としては保守的にならない（最大電流は低下する）。そこで、役割や大きさから建物を下記の3つに分類する。

「避雷鉄塔」，「独立排気筒」，「その他の建物（原子炉建屋など）」

「その他の建物」には燃料タンクやタービン建屋などが含まれるが、発電所の機能維持として特に重要であり、かつ高構造物である原子炉建屋を代表建物として想定する。6号炉および7号炉の場合、建屋と排気筒が一体となっていることから、同一建物として排気筒への雷撃頻度を評価する。

また、6号炉および7号炉をそれぞれ個別の排気筒として考慮した場合、各号炉への雷撃頻度はおよそ半分程度になると予想されるが、今回は保守的に7号炉排気筒を代表させることにより、6号炉相当分についても7号炉が受雷するような評価とした。

1) 評価対象モデル：

「大湊側避雷鉄塔，5号炉排気筒，7号炉建屋」

② 想定落雷数

柏崎地域への年間雷撃数は別紙1内、柏崎刈羽原子力発電所落雷観測結果に基づけば、4.7件/年である。上記の雷撃対象では、「その他の建物」として7号炉原子炉建屋を代表建物としたが、落雷実測では、1号炉～4号炉付近の避雷塔と5号炉～7号炉排気筒付近の避雷塔へほぼ等しい割合で雷撃している。したがって図2-5の1号炉～4号炉エリア（荒浜側）と5号炉～7号炉エリアへの落雷数はエリアを2分割した年間2.35件/年であると想定する。

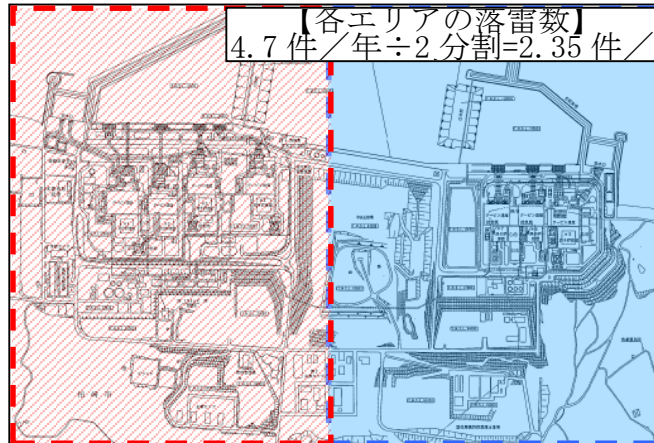


図 2-5 落雷数とエリア分割

1.2. 雷撃頻度および最大電流の計算

5号炉排気筒による遮へいの効果を考慮するにあたり、図 2-6 に示すような二つの構造物の雷撃確率のシミュレーション結果を使用する。西側から5号炉排気筒及び7号炉建屋に向かい進入する落雷を想定し、二つの構造物を結んだ直線と直角方向から雷が進入するという条件でのシミュレーション結果⁽¹⁾を用いる。図 2-7 に低構造物への雷撃比率が 0.1%となる分布を示す。

図 2-7 中には、5号炉排気筒と7号炉建屋の距離 ($D=263$ m)、両者の高さ(5号炉排気筒高さ： $H=160$ m、7号建屋高さ： $h=86.5$ m) から定まるポイント ($h/H=0.54$, $D/H=1.64$) を示しているが、7号炉建屋のプロット点はカーブよりも上にあることから、7号炉建屋への雷撃比率は 0.1%以上であることが分かる。

両構造物の高さが等しい場合には、両構造物への雷撃比率は等しくなると考えられ、また、構造物高さとの雷撃比率の関係は過去の検討⁽²⁾から累積正規分布で近似できることから、 $h/H=1$ の時 50%、図 2-7 より $h/H=0.33$ の時 0.1%として、 $h/H=0.54$ の点を内挿すると、雷撃比率 p は約 1.7%と推定される。

柏崎地域への年間雷撃数は柏崎刈羽原子力発電所落雷観測結果に基づけば 4.7 件であることから、先に想定したとおり 7号建屋付近への落雷数 N をエリア 2 分割に相当する 2.35 件/年であるとする。また、この地域における冬季雷の侵入方向は冬季の風向きを考えると西方向（西北西～南西）が約 70%を占め（図 2-8）、その場合には海岸に設置された避雷塔によって多くの雷は捕捉されると考えられる。ここでは過酷側を考え、残りの 30%の雷はすべて避雷鉄塔に補足されず侵入すると仮定して侵入比率 r を 0.3 とする。

以上を考慮すると、再現期間を y として 7 号炉建屋への雷撃数 N_t は以下のようになる。

$$N_t = N \times y \times p \times r$$

これらの雷撃について、発生する電流最大値を雷撃電流頻度分布での確率 $P = 1 / (N_t)$ の点で評価する。雷撃電流頻度分布に関しては通常の耐雷設計で用いる雷撃電流分布^{*1}に基づき評価する（図 2-9）。なお、再現期間は 10^4 年とする。

$$\begin{aligned} N_t &= 2.35 \times 10^4 \times 1.7 \times 10^{-2} \times 0.3 \\ &= 120 \text{ 件} \end{aligned}$$

確率 $P_0 = 1 / (120)$ に対応する電流値は 156 kA となる。

（柏崎刈羽原子力発電所敷地への年超過頻度 10^{-4} 件／年となる雷撃電流値は、雷撃電流頻度分布から約 560kA）

※1 電力中央研究所推奨の雷撃電流頻度分布は、鬼怒川線や猪苗代線に代表される 8 送電線での磁鋼片による雷電流値の観測結果に基づいている。

柏崎刈羽原子力発電所構内の観測結果として、リターンストロークを伴わない落雷と推定される 12kA 以下の落雷を除いた分布と電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布を比較したところ、同様の傾向を示した（別紙 1 図 1-3 参照）。なお、この雷撃電流頻度分布は、図 2-9 に示される通り、福井県で観測された冬季雷の雷撃電流分布と比較して、耐雷設計上問題となる大電流領域では、ほとんど差が無いとされている。

また、図 2-10 に電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布と落雷位置評定システムによる新潟地域での観測結果（2011 年～2012 年）との比較を示す。この図のとおり、電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布は落雷位置評定システムで観測されたデータと大きな相違はみられない。

以上から、柏崎刈羽原子力発電所の耐雷設計に電力中央研究所の推奨雷撃電流頻度分布を適用することは妥当である。

また、わが国の電力設備の JEC-0102 “試験電圧標準” の電力設備の雷インパルス耐電圧値の根拠に用いられるなど、雷害対策検討のベースデータとなっていることから、既存の耐雷設計とも整合する。

なお、雷撃電流頻度分布は構造物の高さによって、ほとんど変化せず、構造物への想定雷撃電流値は、落雷頻度に依存する。図 2-11 に、雷撃モデルとして電気幾何学モデルを仮定した場合の、各構造物の高さ(10m, 40m, 80m, 120m)における雷撃電流頻度分布を示す。頻度分布は構造物の高さによらずほぼ一致している。

ここで算出される落雷電流による建屋内設備への影響については、別紙 3 のとおり、実機での雷インパルス試験結果を用いた評価を実施している。

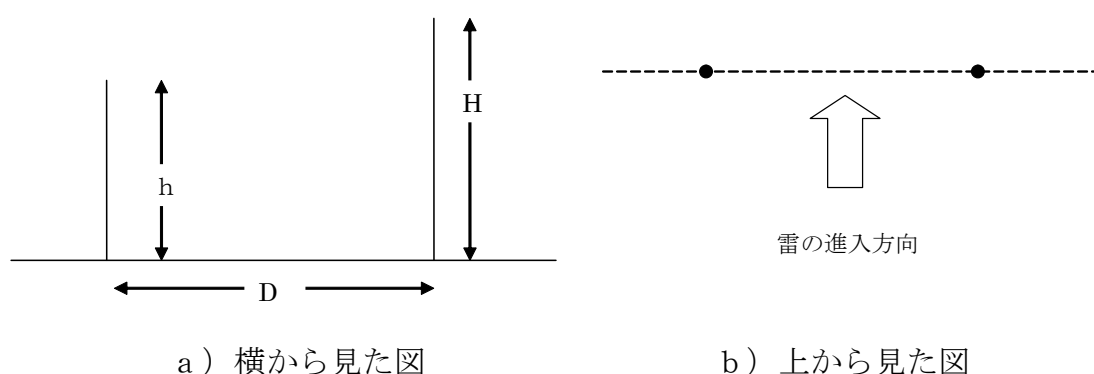


図 2-6 二つの構造物がある場合の雷撃率計算のモデル配置

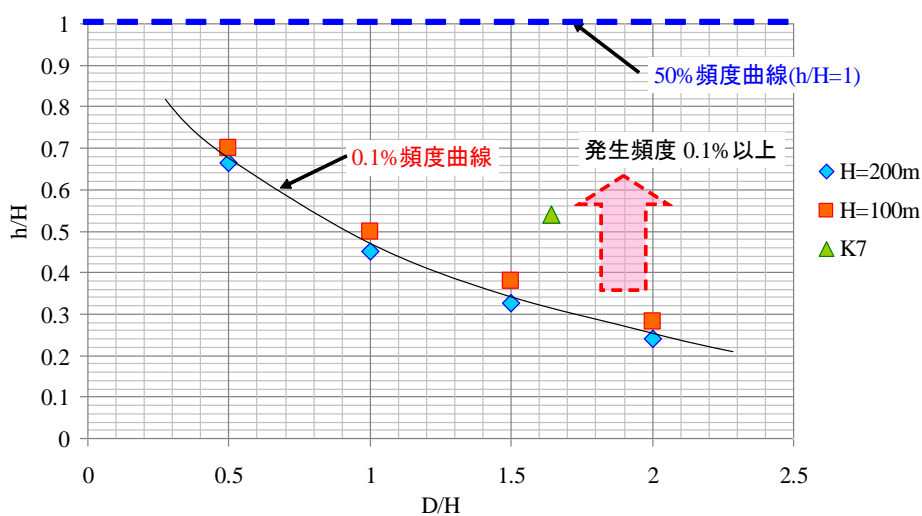


図 2-7 冬季雷に対する低建造物の雷撃比率が 0.1%となる低構造物高さ(計算値)と 7 号炉建屋に対する h/H と D/H の値

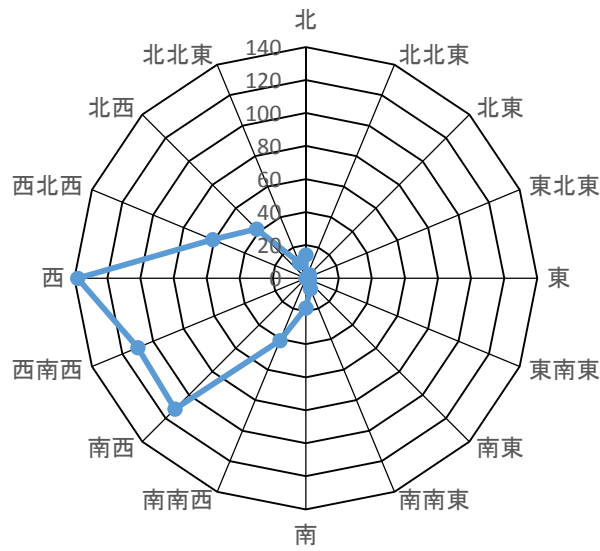


図 2-8 構内雷観測結果（落雷時の風向分布（単位：回））

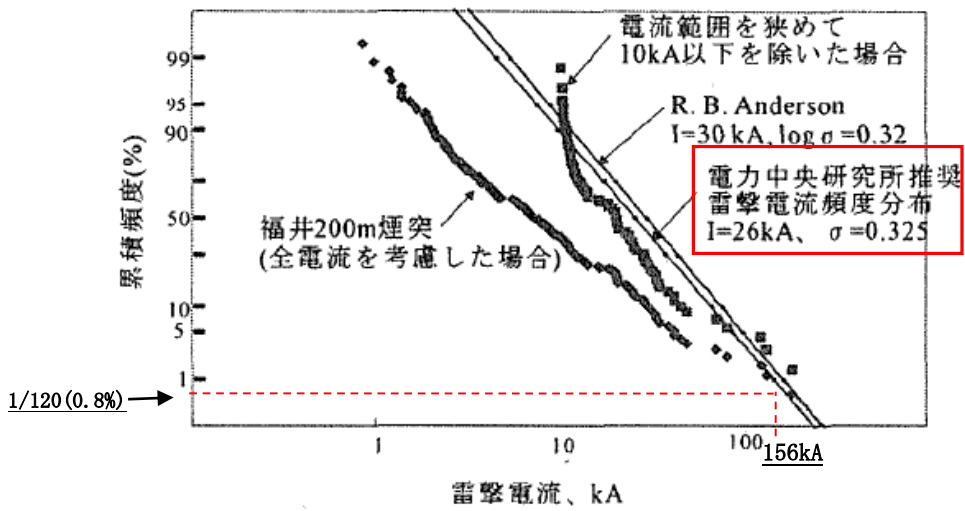


図 2-9 耐雷設計で用いる雷撃電流頻度分布

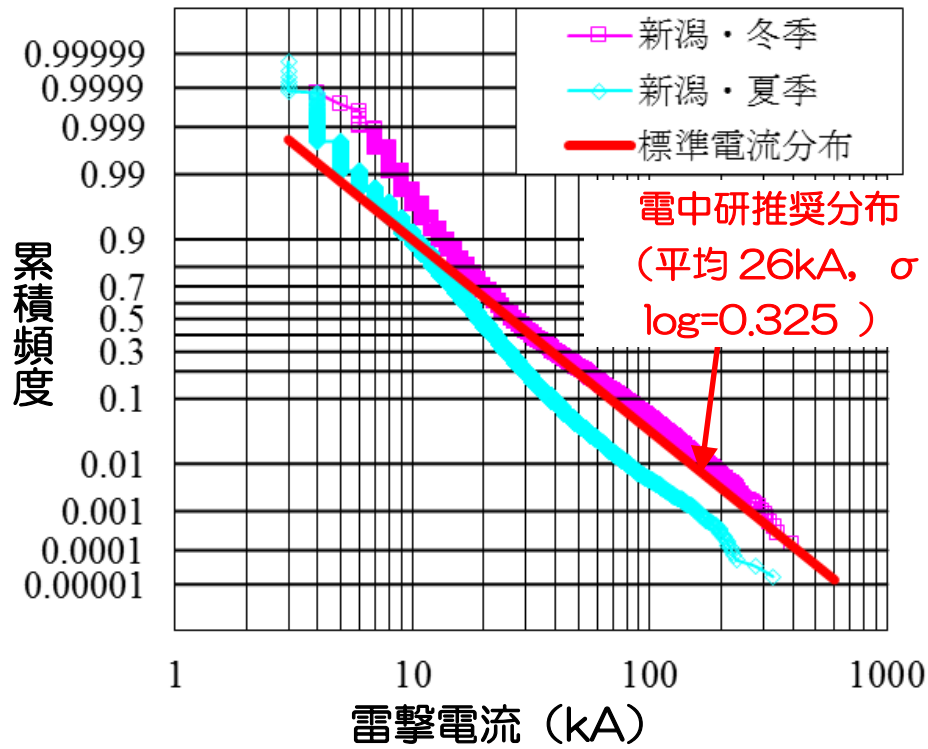


図 2-10 耐雷設計の電流分布と新潟県における落雷位置標定システム (IMPACT) 観測の電流分布

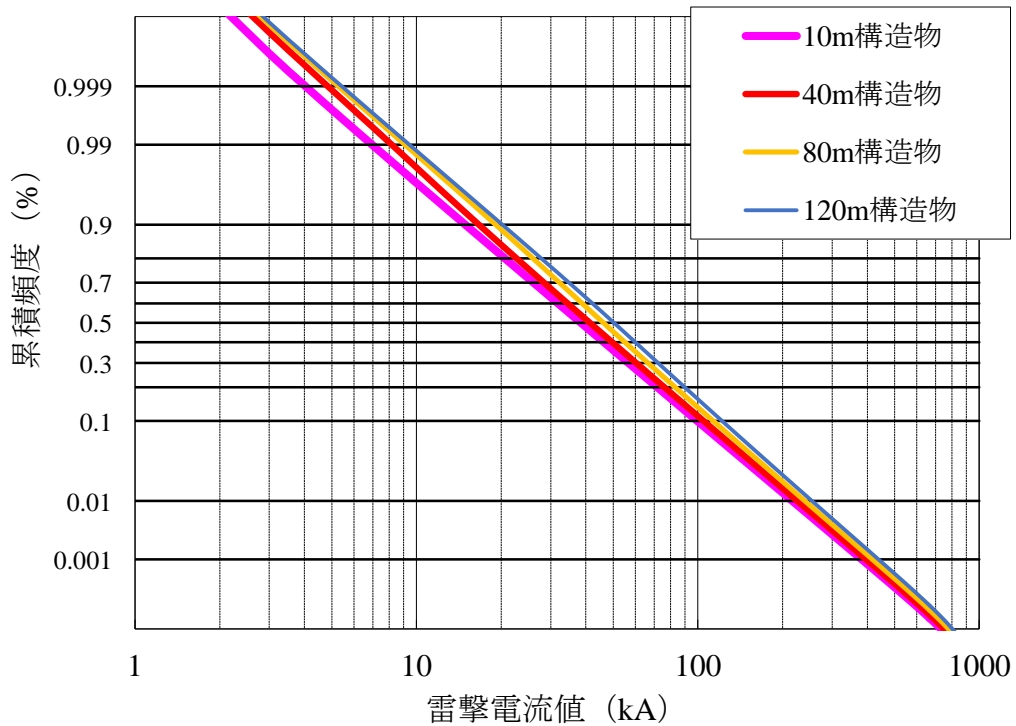


図 2-11 各構造物高さでの雷撃電流頻度分布

1.3. 観測結果との整合

1996年11月から2005年2月までの8年4ヶ月間の雷観測によれば、7号炉排気筒への雷撃は2件である。年間雷撃数にすると、7号炉排気筒への雷撃は0.24件/年となる。この雷撃にはリターンストロークに至らない上向きリーダが多く含まれると考えられる。一方、冬季雷の雷撃計算では上向きリーダが雷雲電荷にまで達する雷撃を対象としており、観測結果と計算結果を比較するためにはリターンストロークを伴う上向きリーダの雷撃を観測結果から抽出する必要がある。別紙1の中で推定したように全データのうち5%程度がリターンストロークを伴う雷撃とすれば、7号炉排気筒では0.012件/年(0.24件/年×5%)となる。

一方、今回の評価によると、7号炉建屋への雷撃は120件/10⁴年より0.012件/年である。観測結果と計算結果の雷撃頻度を比較すると、両者に大きな差異は無く、いくつかの仮定のもと発生頻度が非常に低い領域での評価としては妥当な結果と考えられる。

避雷鉄塔での観測結果(別紙1)によると200kAを超える電流値が2件確認されているが、6,7号炉排気筒は、避雷鉄塔に加え5号炉排気筒の遮へいの効果を受けているため、6,7号炉の想定雷撃電流値は、避雷鉄塔での観測結果の最大値よりも小さいものとなる。

2. まとめ

7号炉排気筒への冬季雷の想定最大電流値の計算結果から、再現期間10⁴年における想定最大雷撃電流については、156kAとなった。また、過去の観測結果との比較から、本評価結果については妥当な結果となることを確認した。

(参考1) 夏季雷の考慮について

本評価では、柏崎刈羽原子力発電所で支配的である冬季雷を対象とした評価を実施している。図1-1に示される通り、落雷が4月から10月の占める割合は5.3%に過ぎないことから、冬季雷の特徴を踏まえた雷撃モデルにおける建屋排気塔への落雷頻度を算出し、通年の落雷件数における想定雷撃電流値を評価している。

図2-10に示した、落雷位置評定システムにより観測された新潟地域における夏季と冬季の雷撃電流発生頻度分布にて、夏季と冬季の雷撃電流を比較すると、平均値は数kA程度の差であり、耐雷設計において標準的に用いられている雷撃電流分布で代表できると考えられる。

参考までに夏季と冬季の雷を区別して、それぞれの落雷頻度を算出し、その合

計から 10^4 年に想定される雷撃電流を評価した。なお、雷撃電流頻度分布は、夏季と冬季ともに電中研推奨の雷撃電流頻度分布で代表する。7号炉建屋排気筒に想定される雷撃電流値は 160kA と算出され、冬季雷を主眼に置いた評価結果 156kA をわずかに上回るが、設計基準電流値 200kA 以下の値である。

(1) 夏季雷の評価について

冬季雷では、上向きリーダに起因することから、雷雲が近づいてきて構造物表面の電界がある臨界値を越えたときに上向きリーダが発生し、そのリーダが雷雲まで進展して構造物への雷撃が生じるモデルを考えている。

一方、夏季雷では下向きリーダに起因することから、下向きリーダが雷雲から進展し、構造物近辺に接近すると雷撃が生じるモデルとして、避雷設備の保護範囲として、広く一般に用いられる電気幾何学モデルを用いた評価を行う。

電気幾何学モデルでは、建物および大地に対して雷撃電流値毎に雷撃距離（吸引半径）を計算する。この雷撃距離によって描かれる面積内に落雷する頻度から落雷件数を算出する。落雷件数の計算においては、先の冬季雷の検討と同様に、評価対象外の建物へ落雷する可能性を除外して保守的に評価する。また、この落雷件数の逆数から雷撃確率を算出して、雷撃電流頻度分布に基づき 10^4 年に想定される雷撃電流値を評価する。

(2) 電気幾何学モデルの概念

雷撃距離は次節の式 2-1 に示す通り、雷電流の大きさに伴って長くなる特性がある。電気幾何学モデルは雷電流に応じた雷撃距離の概念が導入されており、保護範囲を定量的に評価できる。

図 2-12 に示すように雷雲から下向きリーダが進展し、構造物の雷撃距離によって与えられる Exposed surface に達すると構造物に落雷する。この Exposed surface が構造物の捕集範囲を表す。落雷の進入角度を仮定すると、大地への落雷面積を算出することができ、大地雷撃密度 [件/km²/年] を乗じることで落雷頻度 [件/年] を算定することができる。

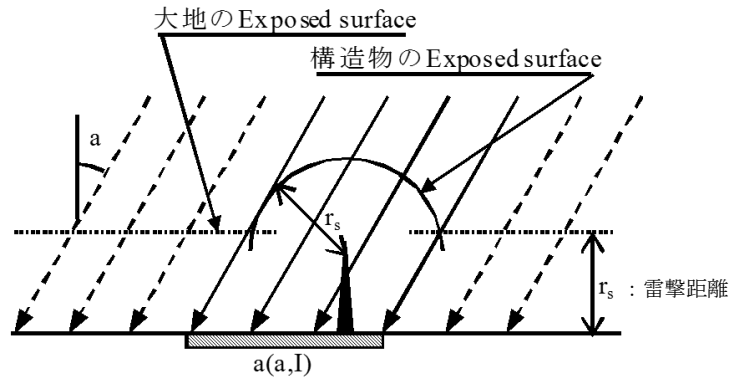


図 2-12 電気幾何学モデルによる捕集範囲

(3) 7号炉建屋排気筒の落雷頻度の評価条件

6, 7号炉原子炉建屋の高さや排気筒との位置関係を見ると, 7号炉建屋のほう
が5号炉排気筒と避雷鉄塔による遮蔽から露出している。7号炉建屋排気筒の高
さは86.5mであり, 5号炉排気筒の高さは160m, 大湊側避雷鉄塔は154mである。
そこで, 評価対象を7号炉建屋排気筒とし, 遮蔽物として5号炉排気筒と大湊側
避雷鉄塔を考慮した。

雷撃電流に対する雷撃距離の関係式としては, JIS A 4201-2003「建築物等の
雷保護」で使用されている次式を採用した。

$$r = 10 \times I^{0.65} \quad (2-1)$$

雷進入角度については, 鉛直方向から進入するとする。雷撃電流頻度分布につ
いては, 電力設備の耐雷設計において標準的に用いられている電力中央研究所の
推奨する分布を使用する。なお, 図 2-13 に示されるように, 他の雷撃電流分布
を適用しても大きな差異は無いと考えられる。

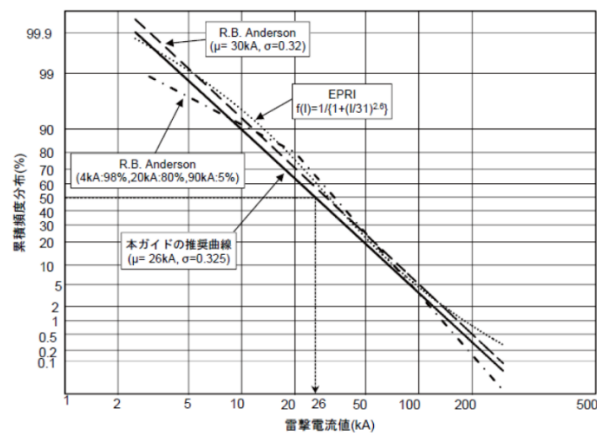


図 2-13 各種雷撃電流累積頻度分布

(電中研報告 H06 発電所及び地中送電線の耐雷設計ガイド)

排気筒の雷遮へい効果は詳細には3次元で評価するが、ここでは2次元(断面)モデルで代表する。7号炉建屋排気筒と5号炉排気筒の断面図を図2-14に示す。図には5号炉排気筒のみを示したが、大湊側の避雷鉄塔による遮蔽の効果も考慮して落雷頻度を評価する。隣接する6号炉建屋による遮蔽効果も期待されるが、保守的な評価となるよう6号炉建屋排気筒による遮蔽を考慮していない。

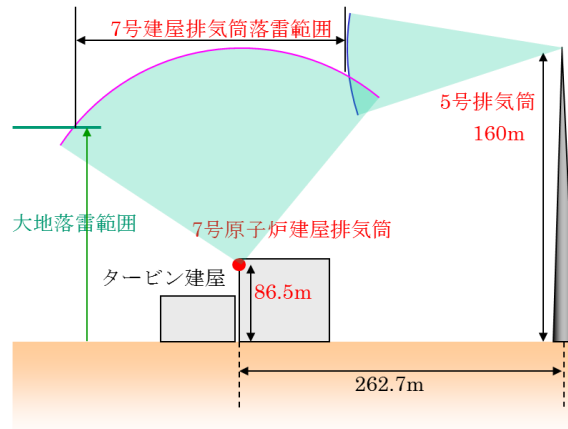


図 2-14 落雷頻度評価モデル (断面図)

電気幾何学モデルによる7号炉建屋排気筒の雷捕集範囲(落雷範囲, 平面図)を図2-15に示す。7号炉建屋排気筒への落雷面積は、大地の雷捕集と、5号炉排気筒による遮へい(青円弧), 並びに避雷鉄塔による遮へい(赤線)の影響を受け、重なり合った緑色の網掛けで示した円の一部範囲で与えられる。

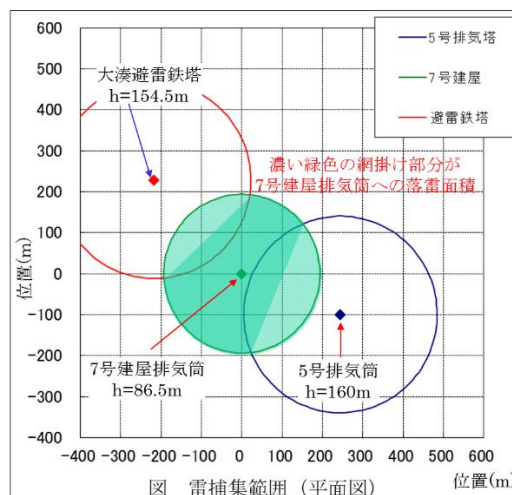


図 2-15 落雷頻度評価モデル (断面図)

(4) 落雷頻度の評価結果

雷撃距離に応じた落雷面積を算出する。雷撃距離は(2-1)式で表される雷撃電流の関数であり、落雷面積は雷撃電流波高値の関数となる。そこで、雷撃電流値に対する落雷面積を図 2-16 に示す。

折れ線の条件は、以下の通り

- 0～27 kA : 遮へい無し,
- 28～60kA : 大地の遮へい
- 61～90kA : +5 号炉排気筒の遮へい,
- 91～400kA : +避雷鉄塔の遮へい

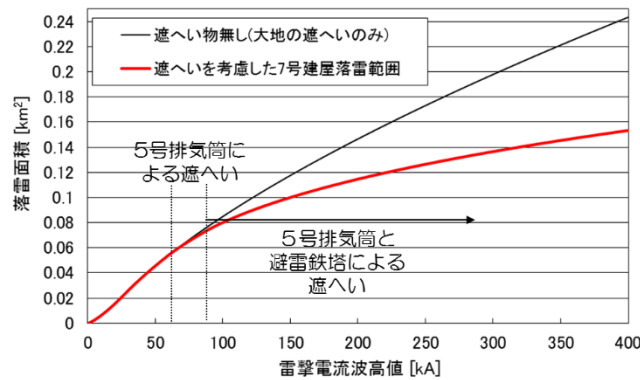


図 2-16 7 号炉建屋排気筒への想定雷撃の落雷面積

図 2-17 には落雷頻度の算出方法を図示する。まず、落雷面積に大地雷撃密度を乗じると年数当たりの“落雷件数”となる。ここに雷撃距離に対応する雷撃電流の“発生確率密度”を掛けて、400kA から降べきに累積頻度を求めることにより、7 号炉建屋排気筒の落雷頻度は 0.031[件/年]と評価された。

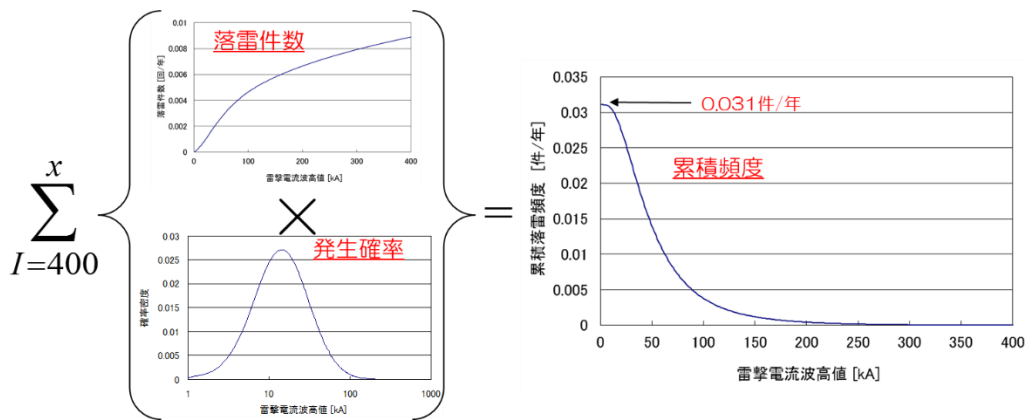


図 2-17 7 号炉建屋排気筒の想定雷撃電流に対する落雷頻度

(5) 夏季と冬季を個別に考慮した場合の想定雷撃電流値

上記の通り，夏季を対象とした落雷頻度は0.031[件/年]であり，夏季の落雷発生割合5.3%と再現期間 10^4 年を乗じると，夏季の落雷件数は，

$$0.031 \times 0.053 \times 10^4 = 16.4 \text{ [件]}$$

となる。

一方，1.2.で実施した冬季雷評価では，年間の雷をすべて冬季雷とした結果，再現期間 10^4 年での7号機への落雷は120[件]となった。したがって，冬季のみを対象とした落雷件数とするためには，冬季の落雷発生割合94.7%を乗じて

$$120 \times 0.947 = 113.5 \text{ [件]}$$

となる。

通年では， $16.4 + 113.5 = 129.9$ [件]の落雷となり，対応する想定雷撃電流値を雷撃電流発生頻度分布から求めると，160kAと評価される。

この結果は，先の検討結果である156kAをわずかに上回るが，設計基準電流値200kA以下の値である。

参考文献

- (1) 相原 (1994) . 冬季雷に対する雷撃様相ならびに雷しゃへい理論の検討ーモデル実験ならびに放電シミュレーションによる検討ー 電力中央研究所報告, No. T930063
- (2) T. Shindo ,Y. Aihara and T. Suzuki (1990) . Model experiment of upward leaders - Shielding effects of tall object - IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.2, pp.716-723

建屋内重要設備の雷リスク評価

1. 評価概要

設備の落雷に対する耐力の定量的な評価方法については、既往の文献等や最新の知見を踏まえ可能な限り現実的かつ網羅的な評価を実施する。

2. 雷サージ評価対象設備

原子炉建屋直上の排気筒へ落雷し、大地に安全に雷電流が逃された場合でも、大地電位上昇により接地系間に生じる電位差や、雷電流の拡散による誘導電流により制御ケーブルに生じる雷サージによって、機器が絶縁破壊に至る可能性が有る。そこで、建屋内機器に発生する雷サージ電圧により、建屋内部の電源盤、制御盤などの重要設備が損傷するリスクを評価する。

3. 建屋内重要設備の雷リスク評価

3.1 評価方針

3.1.1 想定する落雷

想定する落雷は、設計基準として設定した、原子炉建屋頂部排気筒への 200kA の雷撃電流とする。

3.1.2 評価方法

落雷時に電気・計装設備に加わる雷サージ電圧を推定する際に、過去に 7 号炉において実施した雷インパルス試験の結果を使用する。

雷インパルス試験では、雷電流波形を模擬した電流を原子炉建屋と一体化した排気筒に雷インパルス発生装置（以下 IG）を用いて印加し、接地網電位上昇、計装制御回路の過電圧の測定を行った。図 3-1 に柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉エリアの構内配置、IG 設置位置のイメージ及び、試験に用いた雷インパルスの発生回路図を示す。印加した雷インパルス電流は正極製で、波頭長 1.6~2.1 μ s、波尾長 67~71 μ s の波形である。6、7 号炉については、建屋と排気筒が一体化しており、建屋への落雷は排気筒によって全て遮へいされる位置関係にある。6 号炉については、引き下げ導体は設置されておらず、排気筒接地は建屋接地に接続されている（図 3-2）。7 号炉については排気筒接地の引き下げ導体（排気筒から原子炉建屋南側外壁部に接続された約 100 本の避雷銅線）が建屋南側に設置されている（図 3-3）。雷イ

ンパルス試験結果から引下げ導体の有無により建屋内設備の誘導電圧に影響を及ぼすことが確認されている。従って、本評価においては、雷インパルス試験結果の内、6号炉については「引下げ導体無し」、7号炉については「引下げ導体有り」の結果を用いる。

表 3-1, 3-2 に雷インパルス試験および、200kA 落雷時の換算値を示す。雷サージ電圧の換算値は雷インパルス試験の結果を保守的に比例の関係にあるとして外挿し算出する。この結果と、機器の雷サージ耐電圧値を比較し落雷による影響がないことを確認する。

なお、落雷による施設への影響として、雷サージ以外にもノイズの影響が考えられるが、ノイズにより設備自体が損傷することは無く、安全上重要な設備の機能は維持されることから本評価対象から除外した。

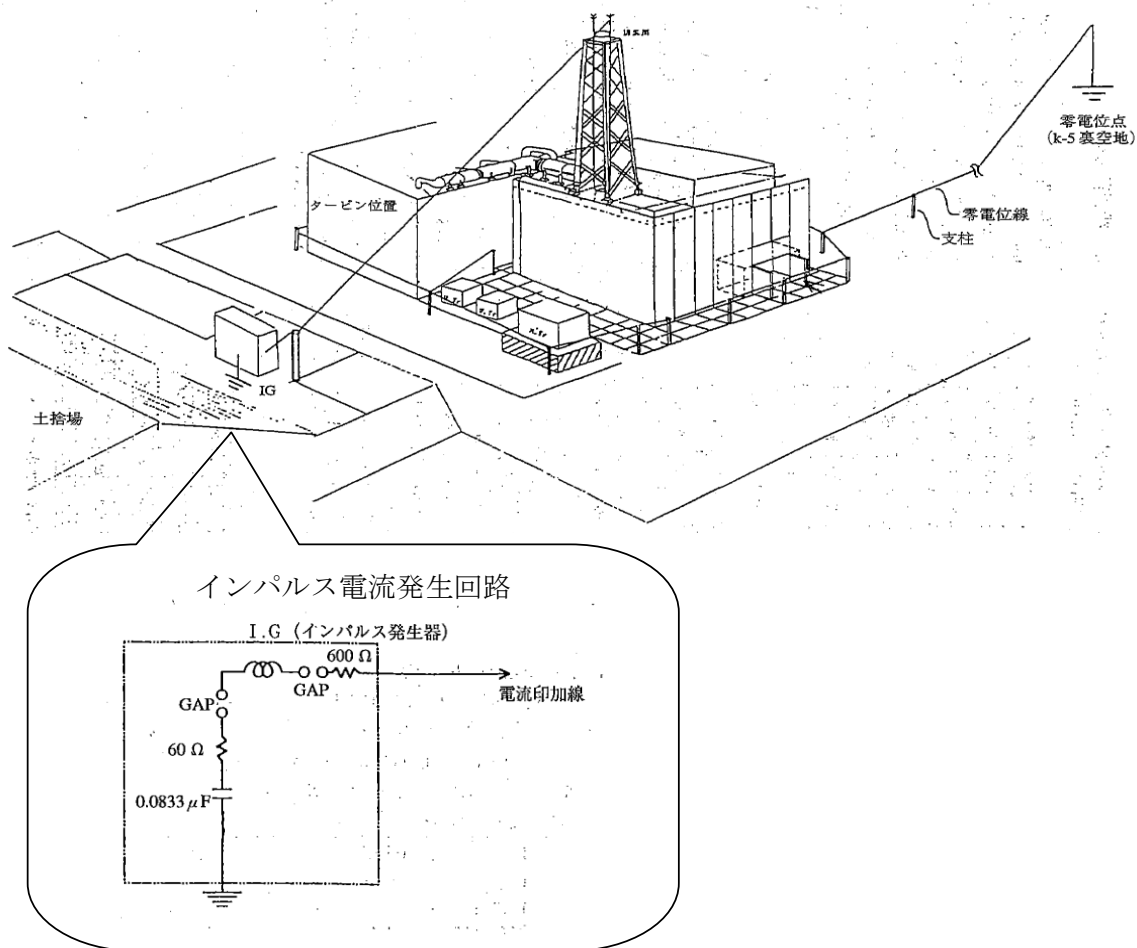


図 3-1 雷インパルス試験

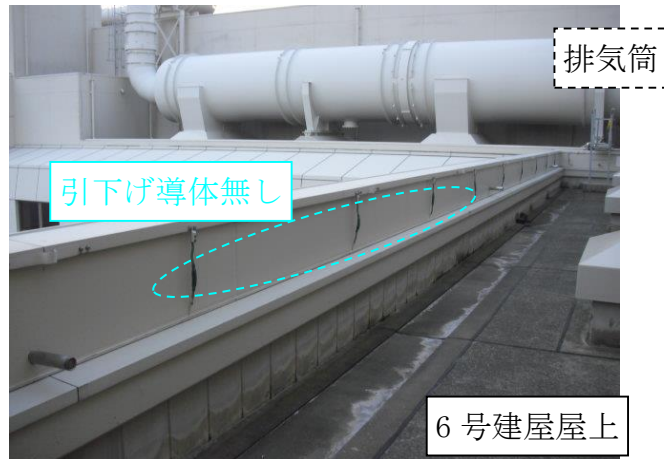


図 3-2 排気筒引下げ導体無し (6号炉)

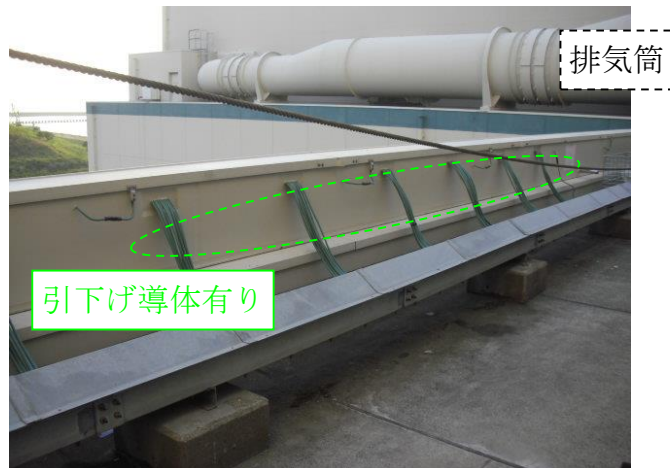


図 3-3 排気筒引下げ導体有り (7号炉)

表 3-1 雷インパルス測定試験結果 6号炉

発点-着点	ケーブル 種類	誘導電圧測定値(V) (() 内は印加電流 (A))		200kA 落雷時の誘導電 圧(V)	
		発点側	着点側	発点側	着点側
①R/B(FMCRD)-C/B	計装	0.6 (900)	1.06 (888)	133.3	238.7
②R/B(4F 東側)-T/B	計装	3.22 (908)	0.012 (884)	709.3	2.7
③R/B(B1F)-T/B	制御	0.84 (900)	0.042 (900)	186.7	9.3
④R/B(2F)-R/B(3F)	計装	0.1 (888)	0.24 (896)	22.5	53.6
⑤R/B(FMCRD)-C/B	制御	4.24 (872)	5.0 (904)	972.5	1106.2

表 3-2 雷インパルス測定試験結果 7号炉

発点-着点	ケーブル 種類	誘導電圧測定値(V) (() 内は印加電流 (A))		200kA 落雷時の誘導電 圧(V)	
		発点側	着点側	発点側	着点側
①R/B(FMCRD)-C/B	計装	1.1 (868)	0.34 (872)	253.5	78.0
②R/B(4F 東側)-T/B	計装	5.04 (876)	0.32 (868)	1150.7	73.7
③R/B(B1F)-T/B	制御	1.04 (904)	1.4 (868)	230.1	322.6
④R/B(2F)-R/B(3F)	計装	0.12 (864)	0.66 (872)	27.8	151.4
⑤R/B(FMCRD)-C/B	制御	4.32 (872)	2.8 (852)	990.8	657.3

3.1.3 雷サージ耐電圧値

(1) 電源盤・制御盤

JEC-0103(2005)「低圧制御回路試験電圧標準」⁽¹⁾において安全機能を有する設備で要求される電源盤・制御盤の耐電圧値 2000V～7000V を用いる。

(2) 計装設備

計装設備については、個別機器に対して耐電圧値を明確に定めた基準は無いが、JEC-0103 より電気所の主回路に地絡事故が発生した場合の商用周波数過電圧に対し、実力値 1000V～1500V を有していることから、耐電圧値としても 1000V を採用する。

3.2 評価結果

3.2.1 影響評価 (6号炉)

(1) 電源盤・制御盤

200kA 落雷時の雷サージ電圧として、表 3-1 の最大値である 1106.2V を用いる。

3.1.3 より電源盤・制御盤の耐電圧値は 2000V～7000V であるため、安全機能が損なわれることはない。

(2) 計装設備

計装設備について、R/B4F に設置された設備に関しては、雷サージ電圧値として表 3-1 から R/B(4F 東側)～T/B 間の電位上昇値 709.3V を用いた場合でも、耐電圧値 1000V を下回り、設備への影響はない。

R/B4F 以外に設置されている計測制御設備について最大の電位上昇が見られたのは R/BM4F に設置してある FMCRD 制御盤～C/B (中操) 間を融通している値であるが、この時の値は 238.7V であり機器の損傷には至らない。(表 3-3)

表 3-3 評価結果 (6 号炉)

評価対象設備		雷サージ (V)	雷サージ 耐電圧(V)	評価
電源盤・制御 盤	各建屋内・ 各建屋間	1106.2	2000～	影響なし
計装設備	R/B 4F 東側～ 各建屋	709.3	1000～	影響なし
	R/B 4F 東側～C/B	709.3	1000～	影響なし
	R/B(4F 東側除く) 及び各建屋内～ R/B(4F 東側除く) 及び各建屋内	238.7	1000～	影響なし

3.2.2 影響評価 (7 号炉)

(1) 電源盤・制御盤

200kA 落雷時の雷サージ電圧として、表 3-2 の最大値である 1150.7V を用いる。

3.1.3 より電源盤・制御盤の耐電圧値は 2000V～7000V であるため、安全機能が損なわれることはない。

(2) 計装設備

R/B 4F 東側に設置の評価対象機器は R/A 外気差圧発信器と燃料取替エリア放射線モニタ (B), (D) である。R/B～T/B を融通する R/A 外気差圧発信器に対しては、1150.7V を 200kA 落雷時の雷サージ電圧として用いる。当該機器にはアレスタ (耐電圧値: 15kV) が内蔵されており、機器に影響を及ぼすことは無い。また、放射線モニタは R/B～C/B 間を融通するケーブルであることから、R/B(FMCRD)～C/B の値 253.5V を用いる。3.1.3 より計装設備の耐電圧値は 1000V であるため、安全機能が損なわれることはない。

R/B 4F 東側を除くエリアに設置されている計装設備については、R/B(FMCRD)～C/B の値 253.5V を 200kA 落雷時の雷サージ電圧として用いる。3.1.3 より計装設備の耐電圧値は 1000V であるため、安全機能が損なわれることはない。(表 3-4)

表 3-4 評価結果 (7号炉)

評価対象設備		雷サージ (V)	雷サージ 耐電圧(V)	評価
電源盤・制御 盤	各建屋内・ 各建屋間	1150.7	2000～	影響なし
計装設備	R/B 4F 東側～T/B	1150.7	15000 (差圧発信 器)	影響なし
	R/B 4F 東側～C/B	253.5	1000～	影響なし
	R/B(4F 東側除く) 及び各建屋内～ R/B(4F 東側除く) 及び各建屋内	253.5	1000～	影響なし

3.3. まとめ

以上の結果から、設計基準雷撃電流値 200kA の落雷に対して、柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉における安全施設の機能が損なわれないことを確認した。

参考文献

- (1) JEC-0103(2005) 低圧制御回路試験電圧標準
- (2) 共同研究報告書 「排気筒を一体化したプラントにおける耐雷設計妥当性確認試験」平成9年度最終報告書 (平成9年9月)

六ヶ所再処理施設における落雷事象について

1. はじめに

日本原燃株式会社六ヶ所再処理施設において、平成 27 年 8 月に発生した落雷に起因すると考えられる設備故障に関連し、柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉における耐雷設計について述べる。

なお、事象の内容については「再処理施設 分離建屋における安全上重要な機器の故障について」（平成 27 年 12 月 7 日、日本原燃株式会社）による。

2. 事象

六ヶ所再処理施設において、「高レベル廃液供給槽セル漏えい液受皿の漏えい液受血液位計」（安全上重要な機器）の B 系の異常を示す警報の発報および A 系の指示値が表示されない等の事象が発生した。調査の結果、安全上重要な機器について 17 機器の故障が見られた。これらの機器の故障は、要因分析の結果、落雷によるものである可能性が高いとしている。

3. 再処理施設における推定原因及び対策

本事象の推定原因としては、主排気筒への落雷による雷撃電流が、構内接地網に伝搬する過程で、信号ケーブルに電圧を誘起し、この誘導電圧により計器を損傷させた。また、地表面近くにトレンチ等の構造物が埋設されている再処理施設特有の構造が影響したと推定している。

対策として、建屋間を跨るケーブルへの雷サージによる影響を防止することを目的に保安器を設置している。

4. 柏崎刈羽原子力発電所における耐雷設計

安全保護回路のケーブルに、建屋（原子炉建屋、コントロール建屋、タービン建屋）間を跨るケーブルものがあるものの、各建屋は距離的に近接しており、六ヶ所再処理施設のように広範な敷地に点在した建屋間をトレンチ内ケーブルで結ぶ構造ではないこと、電氣的に同じ接地網に接続していることから、トレンチ内ケーブルの安全保護回路の損傷による影響は無い。

また、軽油タンク・燃料移送系など安全上重要な屋外回路については、保安器を設置する対策を取っている。

地滑り影響評価について

1. 基本方針

安全施設のうち外部事象防護対象施設は斜面からの離隔距離を確保し地滑りのおそれがない位置に設置することにより安全機能を損なわない設計とする。

また、上記以外の安全施設については、斜面からの離隔距離を確保し地滑りのおそれがない位置に設置すること、若しくは、地滑りによる損傷を考慮し安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせた設計とする。

2. 周辺斜面評価

6, 7号炉原子炉建屋, コントロール建屋, タービン建屋, 廃棄物処理建屋, 屋外設備である軽油タンク及び燃料移送ポンプのうち最も斜面に近い6号炉軽油タンクでも、近傍の斜面より80m以上の離隔距離を確保しており、万が一当該斜面に地滑りが生じた場合であっても、影響が及ぶことはない。(図1参照)

したがって、防護対象である安全施設のうち、外部事象防護対象施設に影響は無い。

3. 地滑り地形分布

地滑りについて、防災科学技術研究所が公開している地すべり地形分布図により、安全施設の安全機能に及ぼす影響について確認した。図2に示す地すべり地形分布図のとおり、発電所敷地内に地すべり地形があることは確認されず、防護対象である安全施設のうち、外部事象防護対象施設に影響は無い。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

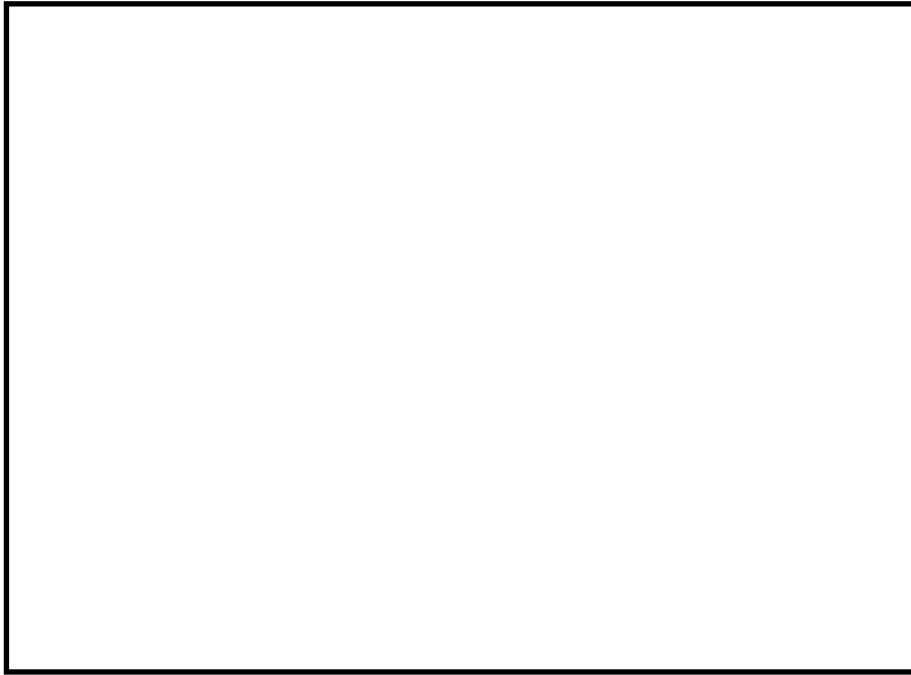


図 1 斜面との離隔距離

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

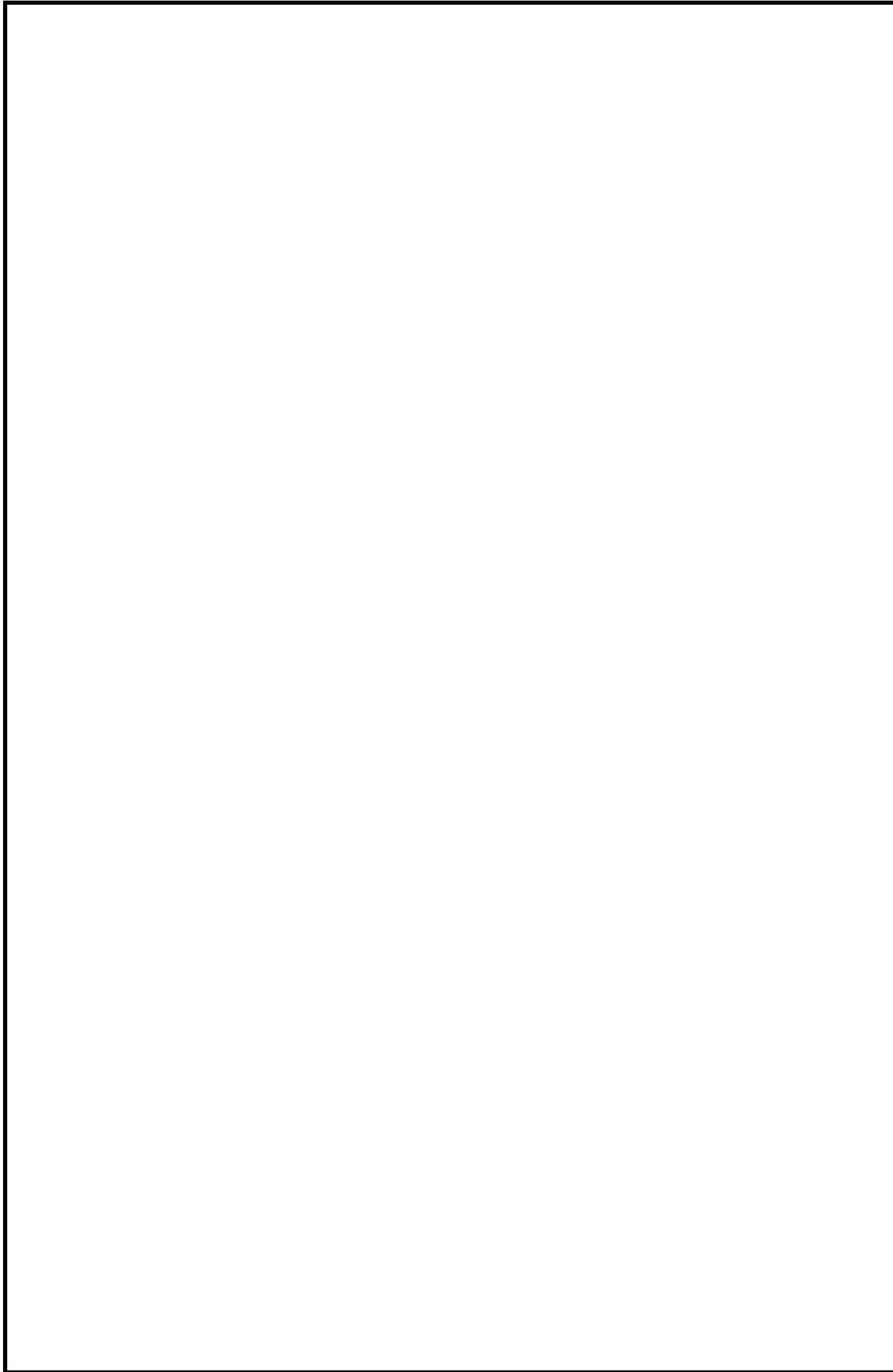


図2 地滑り地形分布図 (出典：独立行政法人 防災科学技術研究所)

生物学的事象影響評価について

1. 生物学的事象に対する考慮

生物学的事象として、海生生物であるクラゲ等の発生、陸上では小動物等の侵入を考慮する。

クラゲ等の発生に対して、表層のクラゲ等は防波堤内側に設けたカーテンウォールにより深層の海水を取水することにより影響を防止する。また、カーテンウォールを通過した塵芥による原子炉補機冷却系等への影響を防止するため、取水路に設置したトラベリングスクリーン等の除塵装置により塵芥を除去し、安全機能を損なわない設計とする。また、除塵装置を通過する貝等に対して、原子炉補機冷却系海水ポンプ出口に設置する海水ストレーナにより原子炉補機冷却海水系への影響を防止する設計とする。更に、定期的な開放点検、清掃が可能な設計とする。また、原子炉補機冷却系等に影響を与える場合には、運転手順により原子炉を安全に出力低下・停止できる運用としている。

小動物の侵入に対しては、屋内設備について建屋貫通部への止水処置等により、屋外設備について端子箱貫通部への止水処置等により侵入を防止する設計とする。また、侵入を仮定しても区分分離した安全機能が同時に機能喪失することはない。

以下に除塵装置の配置・構造及び運用について示す。

(1) 除塵装置の配置・構造

原子炉補機冷却系取水に混入する塵芥（クラゲ等）をバー回転式スクリーンおよびトラベリングスクリーンの網目で捕集し、スクリーンに付着した塵芥はポンプから供給される洗浄水により洗浄除去する。また、水路毎にバー回転式スクリーン前部とトラベリングスクリーン後部に水位検出器を設置し、水位・水位差の検出を行い、自動起動・停止ならびに監視を行う。また、スクリーンの状況については工業用カメラにおいても監視可能である。

図 1、図 2 に取水施設概要図、除塵装置概略図を示す。

(2) 海生生物来襲時の運用

除塵装置は、通常、自動起動・停止を行っている。スクリーン前後の水位差が 400mm 以上となった場合、除塵装置が自動起動し、塵芥を掻き揚げるとともにスクリーンの洗浄を行う。

スクリーンの閉塞等により水位差大警報が発信した場合、海水ポンプの運転状態を確認しながら除塵装置の手動操作等を行い、水位回復を図る。さらに、原子炉補機冷却系・循環水系に影響が及ぶ可能性がある場合には、循環水ポンプを順次停止（合わせて安全に原子炉の出力低下・停止）することにより、海生生物の取水路への流入軽減を図り水位を回復する手順を整備する。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。



図1 取水施設概要図 (7号炉の例)

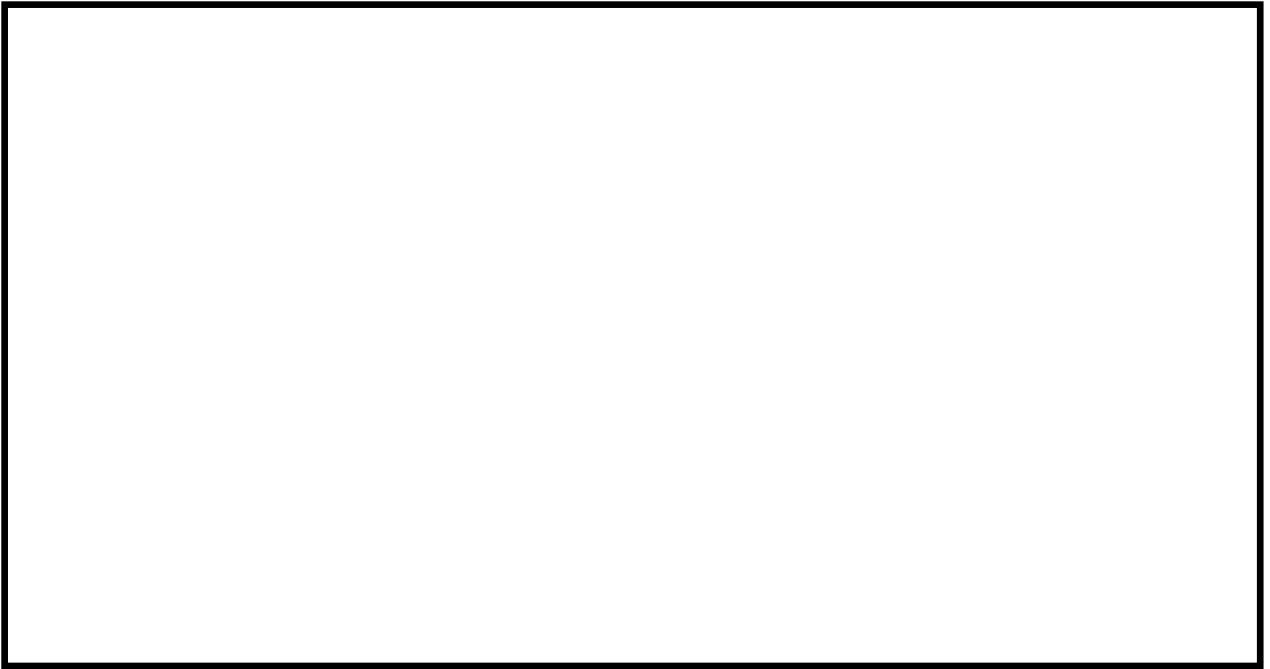


図2 除塵装置概略図 (7号炉の例)

有毒ガス影響評価について

1. 評価概要

有毒ガスの毒性が人に与える影響に着目し、中央制御室等（6/7号炉中央制御室、免震重要棟内緊急時対策所、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所）の居住性評価を実施する。有毒ガスの発生源から、以下(a)～(c)に大別し影響を評価する。

- (a) 原子力発電所敷地外からの影響
- (b) 原子力発電所敷地内の固定施設（屋外設備）からの影響
- (c) 原子力発電所敷地内の屋内設備からの影響

2. 原子力発電所敷地外からの影響

2.1 評価対象

敷地外からの有毒ガスの発生源は、石油化学コンビナート等の固定施設の流出事故、及びタンクローリーや海上を航海するケミカルタンカー等の可動施設の輸送事故が想定される。表1に、評価対象に選定した事故の種類を示す。

表1 評価対象事故（原子力発電所敷地外）

原子力発電所敷地外	固定施設	石油化学コンビナート等の固定施設の流出事故
	可動施設	陸上トラックの輸送事故
		海上船舶の輸送事故

2.2 敷地外固定施設の流出事故の影響

石油化学コンビナート等の固定施設については、石油コンビナート等災害防止法に基づき、災害の発生のおそれ及び災害による影響について科学的知見に基づく調査、予測及び評価や対策の実施が求められており、当該施設の敷地外へは影響がないことが確認されている。

また、柏崎刈羽原子力発電所の周辺の、石油化学コンビナート等の大規模な有毒物質を貯蔵する固定施設は、最も近いものでも30km以上離れているため影響を及ぼすことはない(図1)。



図1 柏崎刈羽原子力発電所周辺の石油化学コンビナート

注) 図の位置は、おおよその場所を表している

2.3 敷地外可動施設からの流出の影響

全国的に生産量および輸送量が特に多く、専用の大型輸送容器が使用されている毒性物質の中で、特に毒性の強い物質として塩素（輸送時の性状は液化塩素）を代表として想定する。塩素専用の大型輸送容器による輸送は、陸上輸送ではタンクローリーや鉄道のタンク貨車、海上輸送では塩素を専用でばら積み輸送するケミカルタンカーにて行われる。

液化塩素ガスを積載するタンクローリーは、高圧ガス保安法や、毒物及び劇物取締法によって容器の設計、製造、取扱いの規制を受ける。事故等の衝撃により弁等の突出部が破損しガスが漏えいすることを防ぐための保護枠の設置や、ガス容器が二重構造であることから信頼性が高く、交通事故等が発生した

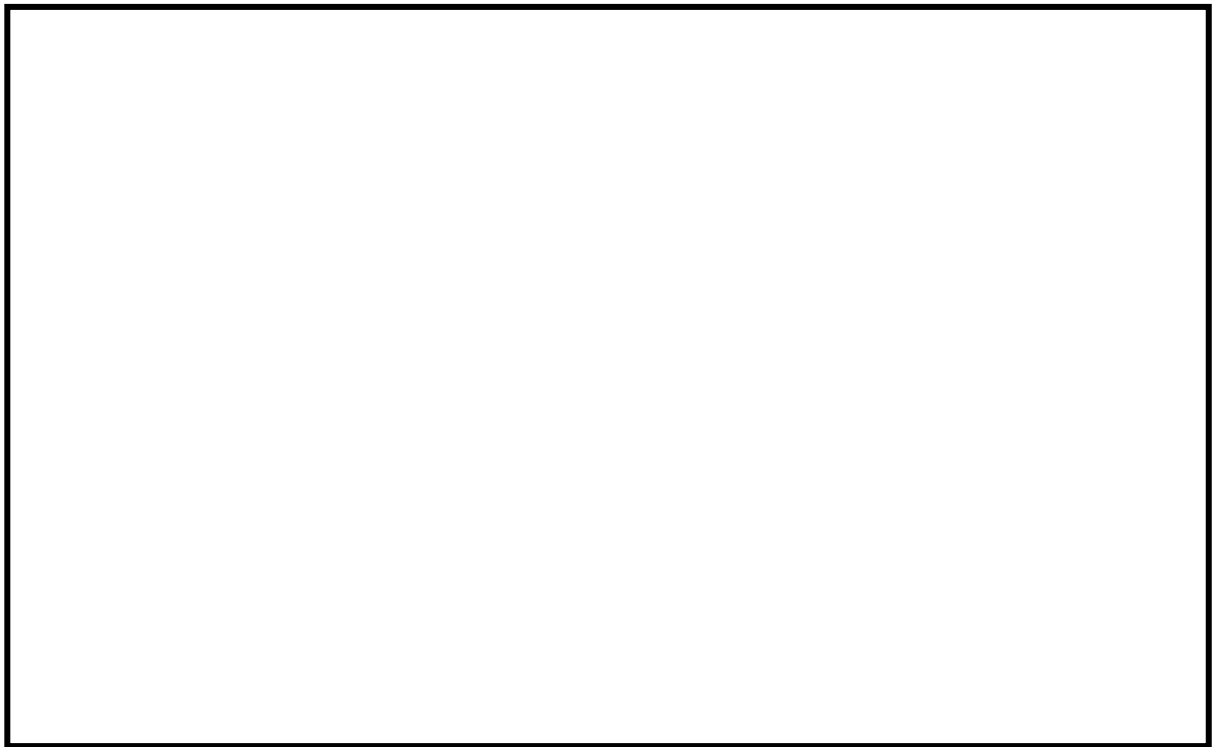
場合であっても流出に至りにくい。また、万一流出に至った場合の対応に必要な、中和剤（消石灰、苛性ソーダ）や呼吸器、防護具などを積載している。このため、タンクローリーの輸送事故による中央制御室等への影響はない。なお、主要な道路としては、敷地境界付近に国道352号線があり、中央制御室等から最短距離は約420mである（図2）。

本発電所に近い鉄道路線には東日本旅客鉄道株式会社越後線及び信越本線があるが、越後線については貨物列車の運行がなく、信越本線については約8.6km程度の距離がある（図3）。このため、有毒ガスを積載した鉄道車両の事故等による有毒ガスの中央制御室等への影響はない。また、タンク貨車についても高圧ガス保安法や、毒物及び劇物取締法によりタンクローリーと同様の規制を受けており流出に至りにくい構造である。

航路に関して、HNS（Hazardous and Noxious Substances：有害・危険物質）輸送船舶について調査したところ、最も距離の近い航路は佐渡付近を航行するものであり、離隔距離は約30kmであることを確認した（図4）。したがって、航路上の船舶の輸送事故による有毒ガスが中央制御室等に影響を与えることはない。

また、航路からの離隔距離があることから、漂流した船舶が発電所周辺まで流れてくる可能性は低い。さらに、漏えい時には自動で作動する緊急遮断弁や二重構造等による特殊な船体構造を有しており、万一船舶がプラント内に進入し、座礁、転覆した場合においても、積荷が漏えいすることは考えにくい。また流出が生じて中和剤（苛性ソーダ）を介してから海上に放出される構造となっている。このため、有毒ガスを積載した船舶の事故等による有毒ガスの中央制御室への影響はない。

以上より、敷地外可動施設からの有毒物質が大気に放出され中央制御室等に影響が及ぶことはない。



枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

図2 発電所敷地周辺図（幹線道路）



図3 発電所敷地周辺図（鉄道路線）



図 4 発電所敷地周辺図（船舶航路）

3 発電所敷地内の固定施設（屋外設備）からの影響

3.1 評価の概要

敷地内の建屋外に設置されている有毒物質を貯蔵する容器が損傷することによる有毒ガスの影響を評価する。判断基準としては IDLH^{*}に加え、窒息性ガスについても考慮し、酸素濃度が許容濃度限界を下回らないことを基準とする。

※ IDLH…急性の毒性限界濃度（30分曝露によって生命及び健康に対する即時の危険な影響を与える曝露レベルの濃度限度値）

3.2 評価対象物質及び固定施設

柏崎刈羽原子力発電所の屋外設備に貯蔵されている化学物質について、米国立労働安全衛生研究所（NIOSH）による IDLH の一覧表を参考に調査したところ、塩化水素、過酸化水素、水加ヒドラジン、6 フッ化硫黄などの物質が貯蔵されている（表 2、3）。IDLH の低さと蒸発のしやすさの観点から比較すると最も評価が厳しい物質は塩化水素であるため（表 2）、当該物質の水溶液である塩酸が貯蔵されている荒浜側水処理建屋を評価の対象とする。

塩化水素以外の有毒ガスについては、個別設備間の距離を踏まえても、以下の理由から塩化水素に比べ中央制御室等の居住性の影響は小さい。

- ・炭酸ガスは、最短の離隔距離は 112m（5号機屋外ボンベ室－5号炉原子炉建屋内緊急時対策所間）と比較的接近しているものの、各号機ボンベ建屋、No. 1～4 ボンベ室に貯蔵されている各ボンベの容量は 30kg と小さく、また IDLH 値は 40000 と塩化水素（IDLH：50）に比べ非常に大きいことから、塩化水素に比べ影響は小さい。
- ・希硫酸は、IDLH の値が 4 と小さいが、不揮発性であることから中央制御室等の居住性に影響しない。なお、最短の離隔距離は 77m（大湊側補助ボイラー－5号炉原子炉建屋内緊急時対策所間）である。
- ・水加ヒドラジンは 20kg（濃度 60%）、0.7m³（濃度 1%）と貯蔵量が小さく、また沸点が 114℃と塩化水素水溶液（58℃）より高く揮発性も低いと考えられることから、中央制御室等の居住性に与える影響は塩化水素に比べ小さいと考えられる。なお、最短の離隔距離は 77m（大湊側補助ボイラー－5号炉原子炉建屋内緊急時対策所間）である。
- ・過酸化水素は、最短の離隔距離が 571m（2号機循環水建屋－免震重要棟内緊急時対策所間）と比較的接近しているものの、IDLH 値が 75 と塩化水素（IDLH：50）より高く、また沸点が 150℃と塩化水素水溶液（58℃）より高く揮発性が低いと考えられることから、塩化水素に比べ影響は小さい。

- ・6 フッ化硫黄は、IDLHは設定がなされておらず、有害性が極めて小さいことから、影響はない。なお、最短の離隔距離は337m（高圧開閉所－免震重要棟内緊急時対策所間）

また、窒息性を有するガスとしては、敷地内での貯蔵量が多く、影響が大きいと考えられることから、原子炉格納容器内注入などに用いられる液化窒素貯槽を対象とする。窒素が漏えいし外気取入口に侵入した場合、酸素との置換により酸欠状態になることが想定されるため、仮に全量漏えいした場合にガスが中央制御室等に影響を及ぼすか否かを評価する。

表4に評価対象物質及び施設名を、図5に敷地内の配置図を示す。

表2 発電所敷地内有毒物質のIDLH及び沸点

化学物質名	IDLH[ppm]	沸点[°C]
炭酸ガス	40000	-78.5（昇華点）
硫酸	4	340
水加ヒドラジン	50	114
塩化水素（35%水溶液）	50	58
過酸化水素	75	150
6 フッ化硫黄	1000(TLV-TWA 値※)	-63.8

※TLV-TWA（Threshold Limit Values-Time Weighted Average）値

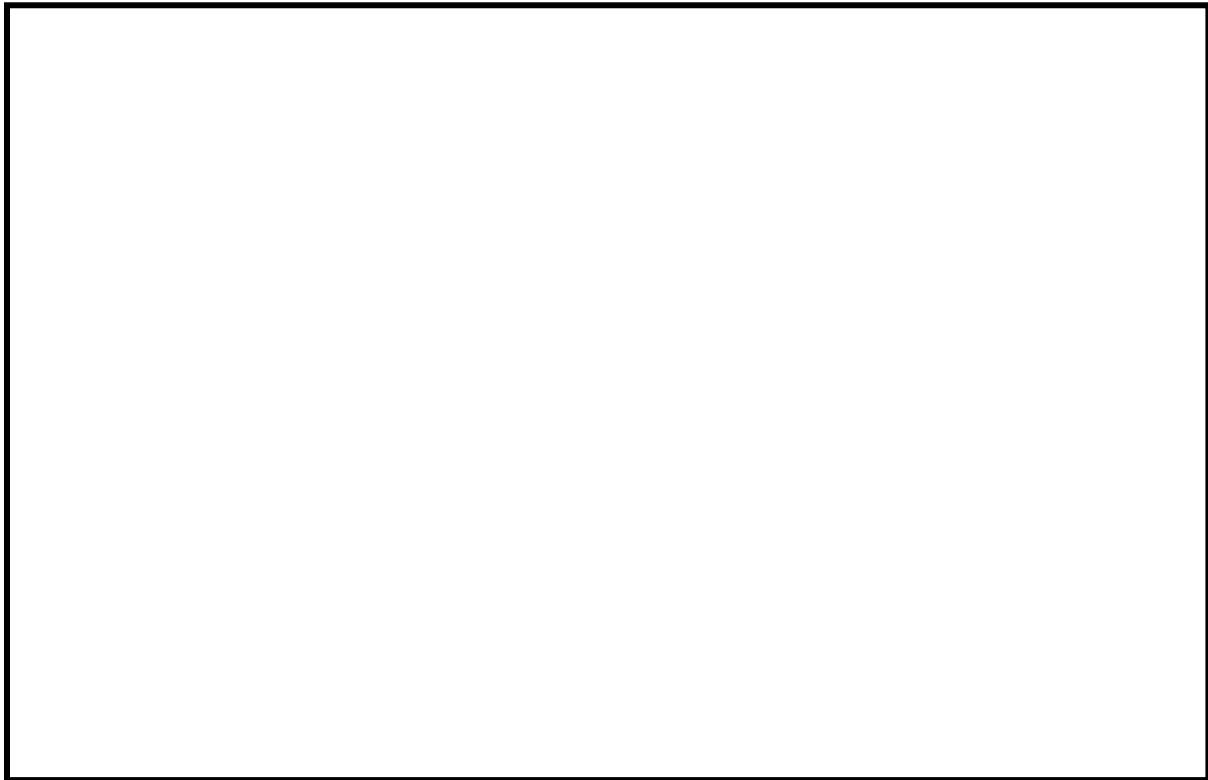
ACGIH（米国産業衛生専門家会議）にて定められた値で、毎日繰り返し曝露したときほとんどの労働者に悪影響がみられないような大気中の物質濃度の時間加重平均値で、通常、労働時間が8時間／日及び40時間／週での値。

表3 発電所敷地内の有毒物質

名称	内容物	容量	離隔距離		
			6/7号炉 中央制御 室	免震重要 棟内緊急 時対策所	5号炉原 子炉建屋 内緊急時 対策所
1号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	—	499m	—
2号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	—	—	—
3号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	—	—	—
4号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	—	—	—
5号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	—	—	112m
6号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	149m	—	—
7号機屋外 ボンベ室	炭酸ガス	30kg×16	—	—	—
No.1～4ボ ンベ室	炭酸ガス	30kg, 45kg ボンベ 計 2,525kg	1451m	222m	1707m
荒浜側補助 ボイラー	希硫酸	0.417m ³	1610m	320m	1860m
大湊側補助 ボイラー	希硫酸	0.304m ³	255m	1993m	77m
大湊側補助 ボイラー	水加ヒドラ ジン	20kg(60%) 0.7m ³ (1%)	255m	1993m	77m
水処理建屋	塩化水素 (塩酸)	5.9m ³	1583m	203m	1791m
1号機 循環水建屋	過酸化水素	0.6m ³	1538m	595m	1817m
2号機 循環水建屋	過酸化水素	0.6m ³	1336m	571m	1591m
高圧開閉所	6フッ化硫 黄	62m ³ (500kV GIS)	1099m	337m	1471m

表 4 評価対象物質及び固定施設名

号炉	対象設備名
6, 7 号炉	塩化水素（荒浜側水処理建屋）
	液化窒素ガス（液化窒素タンク）



枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

図5 敷地内固定施設（屋外設備）の配置図

3.3 評価方法

3.3.1 有毒ガス影響評価（塩化水素）

3.3.1.1 評価の概要

影響評価については次の(1)～(3)を考慮し、貯蔵施設から放出された有毒ガスの中央制御室外気取入口における濃度（IDLH）を評価する。概要について図6に示す。

(1) 貯蔵施設から流出した有毒物質の大気への放出率

敷地内の固定施設は一定水準の強度を確保して設計されていることから、現実的には損傷容器の損傷孔サイズはそれほど大きいものではなく、有毒物質水溶液の液溜りが広がるには時間を要するものと考えられる。しかし、本評価においては、保守的に貯蔵施設から流出した有毒物質水溶液の液溜

まりが瞬時に堰底面全体に広がった状態を想定して評価を行う。

液溜りから大気中への有毒物質の放出率は、有毒物質水溶液の液溜りが堰底面積全面に広がった状態で、液溜りからの蒸発、および堰内での上方への濃度拡散が最終的な定常状態にあるとして、拡散方程式に基づき評価する。

(2) 大気へ放出した有毒物質の大気拡散

有毒物質の濃度評価に用いる相対濃度 (x/Q) は、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」の大気拡散の評価にしたがい、年間について小さい方から順に並べた累積出現頻度 97%に当たる値を用いた。

(3) 中央制御室等における有毒物質の濃度評価について

中央制御室等における濃度については、有毒物質の大気への放出率および大気拡散の評価により、中央制御室等外気取入口における有毒物質の最大濃度を評価し、判断基準と比較する。

3.3.1.2 大気放出率の算出方法

堰内での拡散による濃度分布は次式の拡散方程式を用いて計算できる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) + q$$

ここで、

$$q = Q/(Adz) \quad \text{但し、} \quad q = 0 \quad \text{for } z \neq 0$$

C : 濃度 [kg/m³]

w : 上向きの流れ [m/s]

D : 分子拡散係数 [m²/s]

z : 液面からの高さ [m]

q : 蒸発による付加項 [s⁻¹]

Q : 蒸発流量 [m³/s]

A : 液溜り面積 [m²]

定常状態では堰上端部付近での有毒ガスの濃度勾配に応じて単位時間あたり大気へ放出されることになるため、次式にて大気放出率を計算できる。

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial z} A$$

F : 堰上端部からの大気放出率 [kg/s]

D : 分子拡散係数 [m²/s]

C : 濃度 [kg/m³]

z : 液面からの高さ [m]

A : 液溜り面積[m²]

また定常状態において堰上端部で濃度ゼロとなる濃度勾配は、液面からの高さに比例して減少する。

そこで評価においては、液溜りが堰底面全面に広がった状態で、水溶液面直上での濃度が保守的に有毒ガスの飽和蒸気圧に相当する濃度であるとして、液溜りからの蒸発が定常状態になったときの大気放出率を以下のように計算する。

$$F = D \frac{C_{Ps}}{z_0} A_0$$

$$C_{Ps} = \frac{MP_s}{1000RT}$$

F : 堰上端部からの大気放出率[kg/s]

D : 分子拡散係数[m²/s]

C_{Ps} : 水溶液面直上での濃度[kg/m³]

z_0 : 堰高さ[m]

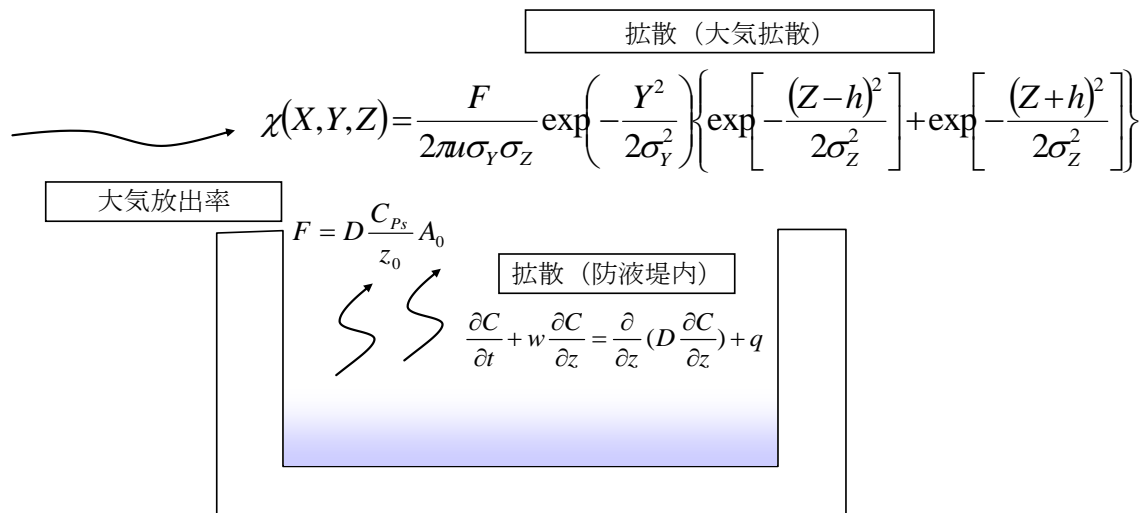
A_0 : 堰底面積[m²]

M : 分子量[g/mol]

P_s : 飽和蒸気圧[Pa]

R : 気体定数[8.314 m² kg/(s² K mol)]

T : 絶対温度[303 K]



$\chi(X, Y, Z)$: 評価点 (X, Y, Z) の有毒ガスの濃度 (kg/m³)
 u : 風速 (m/s)
 σ_Y : y 方向 (水平方向) の濃度の拡がりのパラメータ (m)
 σ_Z : z 方向 (鉛直方向) の濃度の拡がりのパラメータ (m)
 h : 発生源の地上からの高さ (m)

図6 有毒ガス大気放出の考え方

3.3.1.3 評価条件

放出率の評価条件を表5, 大気拡散評価の条件を表6に示す。

表5 放出率評価条件 (塩化水素)

評価点	6/7号炉 中央制御室	免震重要棟内 緊急時対策所	5号炉 原子炉建屋内 緊急時対策所
離隔距離 [m]	1583	203	1791
塩酸タンク貯蔵量 [m ³]	5.9		
判断基準 (IDLH) : 塩化水素濃度 [ppm]	50		

表6 大気拡散条件（塩化水素）（1/2）

項目	評価条件	選定理由
大気拡散評価モデル	ガウスプルームモデル	審査ガイド ^{*1} に示されたとおり設定
気象データ	柏崎刈羽原子力発電所における1年間の気象データ(1985年10月～1986年9月)	建屋影響を受ける大気拡散評価を行うため保守的に地上風(地上約10m)の気象データを使用 審査ガイドに示された通り、発電所において観測された1年間の気象データを使用
実効放出継続時間	1時間	保守的に1時間と設定
放出源及び放出源高さ	放出源：水処理建屋 放出高さ：地上0m	審査ガイドに示されたとおり設定 ただし、放出エネルギーによる影響は未考慮
累積出現頻度	小さい方から累積して97% (6/7号炉中央制御室及び5号炉原子炉建屋内緊急時対策所に関しては、97%以下の値が出ないことから、98.09%値)	審査ガイドに示されたとおり設定
建屋巻き込み	考慮する	放出点から近距離の建屋の影響を受けるため、建屋による巻き込み現象を考慮
巻き込みを生じる代表建屋	水処理建屋	放出源であり、巻き込みの影響が最も大きい建屋として設定
濃度の評価点	6/7号炉中央制御室, 免震重要棟内緊急時対策所, 5号炉内緊急時対策所	審査ガイドに示されたとおり設定
着目方位	6/7号炉中央制御室： 1方位(SSW) 免震重要棟内緊急時対策所： 2方位(NNW, N) 5号炉原子炉建屋内 緊急時対策所： 1方位(SSW)	審査ガイドに示された評価方法に基づき設定

表6 大気拡散条件（塩化水素）（2/2）

項目	評価条件	選定理由
建屋投影面積	283m ²	審査ガイドに示されたとおり設定 風向に垂直な投影面積のうち最も小さいもの
形状係数	1/2	内規 ^{※2} に示された通り設定

※1：実用発電用原子炉に係る重大事故時の制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価に関する審査ガイド

※2：原子力発電所中央制御室の居住性に係る被ばく評価手法について（内規）

3.3.1.4 評価結果

漏えいした塩化水素の中央制御室等外気取入口における濃度の評価結果を表7に示す。結果より、有毒ガスの濃度がIDLH以下であり問題ないことを確認した。

表7 中央制御室等外気取入口における有毒物質濃度（塩化水素）

評価点	6/7号炉 中央制御室	免震重要棟内 緊急時対策所	5号炉 原子炉建屋内 緊急時対策所
塩酸タンク貯蔵量[m ³]	5.9		
大気放出率[g/s]	1.54		
離隔距離[m]	1583	203	1791
相対濃度[s/m ³]	6.90×10^{-7}	5.40×10^{-4}	6.10×10^{-7}
外気取入口濃度[ppm]	7.23×10^{-4}	0.566	6.39×10^{-4}
判断基準(IDLH)： 塩化水素濃度[ppm]	50		
評価結果	影響なし	影響なし	影響なし

3.3.2 有毒ガス影響評価（液化窒素）

3.3.2.1 評価概要

空气中濃度の計算には、以下の考え方で行う。

$$K_n = K_0 + M/V$$

K_n ：室内ガス濃度[Vol%]

K_0 ：外気中のガス濃度[Vol%]

M ：ガス放出量[m³]

V ：空間体積[m³]

酸素欠乏等防止規則によると、酸素欠乏の定義を「空気中の酸素濃度が18%未満の状態」としており、この値を下回ると吐き気やめまい、呼吸困難等の症状が現れることから、空気中のアルゴン等の組成1%を考慮し、居住空間内での窒素濃度限界を81Vol%とする。

また、初期状態における外気中の窒素ガス濃度を78Vol%とする。評価の前提条件として、対象とする設備の窒素ガス放出量から窒素限界濃度に至る体積及びガス放出源からの距離を算出し、それが外気取入口までの離隔距離未満であることを確認する。

また、液化窒素ガスの場合、常温大気中に放出された窒素は急速に沸騰、膨張し、それに伴い体積も数百倍程度に増加する。また、空気中に元々約78%存在する窒素に対しては、蒸発により屋外で濃度差無く均一に拡散する挙動を示すことから、本評価においては、窒素ガスが半球状に一様に膨張すると仮定した。

液化窒素タンクは、1号炉原子炉建屋近傍と5号炉原子炉建屋近傍に設置している。貯蔵量は1号炉側が109m³、5号炉側は108m³であるため、両者を包絡する条件として109m³を設定する。評価条件を表8に示す。

3.3.2.2 評価結果

評価結果を表9、酸欠雰囲気となる範囲を図7に示す。6号炉及び7号炉に最も近い5号炉液化窒素貯槽から液化窒素全量が漏えいした場合、窒素の体積は $7.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ となる。これが気体のフラッシュにより瞬時全量揮発したモデルとして半球上の領域に均一に拡散したと仮定すると、酸欠雰囲気（酸素分圧18%以下）となる領域半径は約107mとなる。ここで液化窒素タンクから6/7号炉中央制御室までの離隔距離は約170mあり、外気取入口付近において酸欠雰囲気以上に至る程の窒素を中央制御室へと取り込むことはない。また、大気中を拡散する間に更なる希釈効果にも期待できることから、中央制御室への影響はない。

なお、本モデルでは無風の状態を想定している。風が吹いている場合を想定しても、風により拡散が促進され窒息雰囲気の体積はより小さくなること、仮に中央制御室の空調ルーバに到達した場合であっても窒息雰囲気は風により流されることから、中央制御室の空調バウンダリ内が窒息濃度となるほど長時間中央制御室前面に留まる事はなく、中央制御室への影響はない。

免震重要棟内緊急時対策所についても離隔距離が確保されることから影響はない。

なお、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所については、離隔距離（5号炉液化窒素貯槽）が危険距離を下回ることから、次項にて、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所の窒素濃度について詳細に評価を行う。

表8 評価条件（液化窒素）

項目	数値
K_n : 室内ガス濃度限界値[Vol%]	81
K_o : 外気中のガス濃度[Vol%]	78
液化窒素タンク貯蔵量[m ³]	109

表9 評価結果（液化窒素）

評価点	6/7号炉 中央制御室	免震重要棟内 緊急時対策所	5号炉 原子炉建屋内 緊急時対策所
M : ガス放出量 [m ³] (25°C, 1atm)	7.7×10^4		
危険距離 [m]	107		
離隔距離（1号炉 液化窒素貯槽） [m]	1511	330	1770
離隔距離（5号炉 液化窒素貯槽） [m]	170	1904	100
評価結果	影響なし	影響なし	次項にて 詳細評価

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

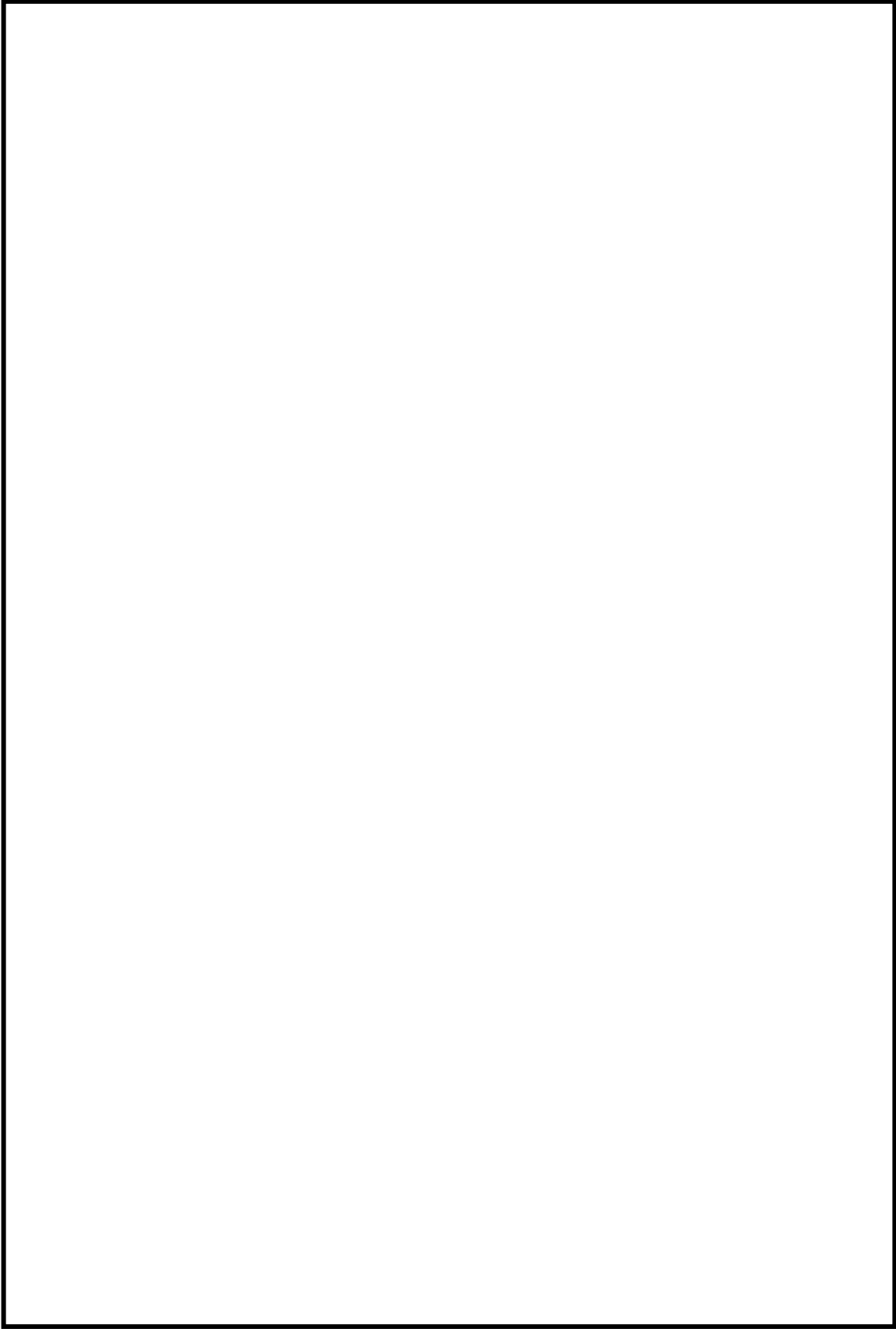


図7 評価結果（液化窒素）

3.3.2.3 大気拡散を考慮した評価

3.3.2.2 においては、6/7号中央制御室に窒素ガスが酸欠濃度で到達しないということを評価した。図7のように危険範囲が1号炉、5号炉に接近していることから、1号炉及び5号炉また6/7号炉の中央制御室の窒素ガス濃度について詳細に評価を行った。以下(1)～(3)に評価概要を示す。

(1) 液化窒素貯槽から流出した窒素ガスの大気への放出率

液化窒素貯槽に接続されている液相配管に設置された安全弁(25A)の開固着を想定する。有毒ガスの流出速度を算出する流出面積としては、保守的に最大径の配管から80Aとし、またフラッシュ率(瞬時気化率)を保守的に1と設定し、漏えいした液化窒素は瞬時に気化するとした。有毒ガスの流出速度は「石油コンビナートの防災アセスメント指針」(消防庁特殊災害室,平成25年3月)に示される液体流出の式において、 m^3/s から kg/s への換算のため液密度を乗じた下式であらわされる。

$$Q_L = c\rho S \sqrt{2gh + \frac{2(p - p_0)}{\rho}}$$

Q_L : 有毒ガス流出速度 [kg/s]

c : 流出係数 [-]

ρ : 有毒物質密度 [kg/m^3]

S : 流出面積 [m^2]

g : 重力加速度 [m/s^2]

h : 水位 [m]

p_0 : 大気圧 [Pa]

p : 容器内圧力 [Pa]

(2) 大気へ放出した有毒物質の大気拡散

有毒物質の濃度評価に用いる相対濃度(χ/Q)は、3.3.1と同様に「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」の大気拡散の評価にしたがい、年間について小さい方から順に並べた累積出現頻度97%に当たる値を用いた。

(3) 中央制御室における有毒物質の濃度評価について

中央制御室の外側の有毒物質の濃度は、大気への放出率および大気拡散の評価により、中央制御室等外気取入口における有毒物質の最大濃度を評価した。また中央制御室等の内側の有毒物質の濃度の評価には、中央制御室の換気率0.5回/hを考慮し最大濃度を評価した。

評価条件を表10に、評価結果を表11に示す。室外および室内濃度の最大

値は、いずれも 1 号炉中央制御室であり、室外では 81.6[Vol%]と判定基準の 81[Vol%]を上回るものの、室内濃度は 78.3[Vol%]であり、判定基準を下回る。以上から、液化窒素貯槽からの漏えいによる 1 号炉、5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所、6/7 号炉中央制御室への影響はない。

表 10 大気拡散条件（液化窒素）（1/2）

項目	評価条件	選定理由
大気拡散評価モデル	ガウスプルームモデル	審査ガイド ^{*1} に示されたとおり設定
気象データ	柏崎刈羽原子力発電所における1年間の気象データ(1985年10月～1986年9月)	建屋影響を受ける大気拡散評価を行うため保守的に地上風(地上約10m)の気象データを使用 審査ガイドに示された通り、発電所において観測された1年間の気象データを使用
実効放出継続時間	1時間	保守的に1時間と設定
放出源及び放出源高さ	放出源：1号炉液化窒素貯槽 5号炉液化窒素貯槽 放出高さ：地上0m	審査ガイドに示されたとおり設定 ただし、放出エネルギーによる影響は未考慮
累積出現頻度	小さい方から累積して97%	審査ガイドに示されたとおり設定
建屋巻き込み	考慮する	放出点から近距離の建屋の影響を受けるため、建屋による巻き込み現象を考慮
巻き込みを生じる代表建屋	原子炉建屋	放出源であり、巻き込みの影響が最も大きい建屋として設定
濃度の評価点	6/7号炉中央制御室, 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所, 1号炉中央制御室	審査ガイドに示されたとおり設定
着目方位	5号炉液化窒素貯槽 →6/7号炉中央制御室： 3方位(N, NNE, NE) 5号炉液化窒素貯槽 →5号炉原子炉建屋内緊急時対策所： 9方位(E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W) 1号炉液化窒素貯槽 →1号炉中央制御室： 9方位(NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW)	審査ガイドに示された評価方法に基づき設定

表 10 大気拡散条件（液化窒素）（2/2）

項目	評価条件	選定理由
建屋投影面積	1号炉原子炉建屋：2096m ² 5号炉原子炉建屋：2574m ²	審査ガイドに示されたとおり設定 風向に垂直な投影面積のうち最も小さいもの
形状係数	1/2	内規 ^{※2} に示された通り設定

※1：実用発電用原子炉に係る重大事故時の制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価に関する審査ガイド

※2：原子力発電所中央制御室の居住性に係る被ばく評価手法について（内規）

表 11 中央制御室等外気取入口における有毒物質濃度（液化窒素）

放出点	5号炉液化窒素貯槽		1号炉液化窒素貯槽
評価点	6/7号炉 中央制御室	5号炉 原子炉建屋内緊急時対策所	1号炉 中央制御室
貯蔵量[m ³]	109		
大気放出率[kg/s]	129.2		
離隔距離[m]	167	100	86
相対濃度[s/m ²]	3.3×10^{-4}	1.4×10^{-3}	1.7×10^{-3}
外気取込口濃度[Vol%]	78.8	81.0	81.6
室内最大濃度[Vol%]	78.1	78.3	78.3
判断基準(IDLH)： 窒素ガス濃度[Vol%]	81		
評価結果	影響なし	影響なし	影響なし

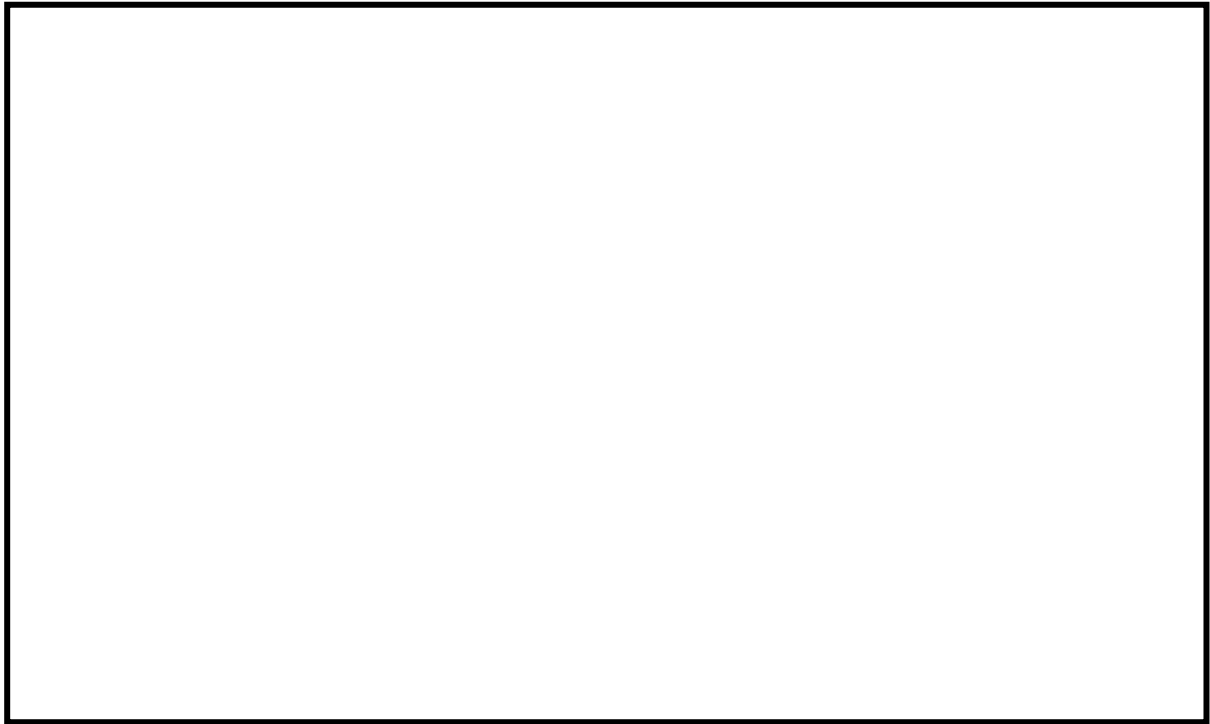
4 発電所敷地内の屋内設備からの影響

原子力発電所の建屋内で貯蔵している有毒物質については、SRV駆動用窒素及び消火用二酸化炭素や、バッテリーに内蔵された硫酸、廃液中和処理用の硫酸や苛性ソーダ（水酸化ナトリウム）等が挙げられる。

屋内貯蔵施設については、屋外設備と異なり外的衝撃力により損傷が想定しにくく、さらに国内の法規に従い貯蔵・管理されるとともに、万一漏えいが生じた場合でも各建屋の換気空調系により十分に換気希釈されるため、建屋外の固定施設からの流出事故に包含されるものとして、対象から除外する。

また、分析等に使用する試薬については、その種類は多いものの、使用場所が限定されておりかつ適切に保管、換気されていること、貯蔵量、使用量が少ないことから、中央制御室への影響は無い。

図8には、コントロール建屋バッテリー室内の硫酸と中央制御室との位置関係を示す。



枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

図8 発電所敷地内（屋内設備）の有毒物質と中央制御室の位置関係

船舶の衝突影響評価について

1. 基本方針

最も距離の近い航路でも発電所より 30km の離隔距離があり、航路を通行する船舶の衝突により、安全施設が安全機能を損なうことはない。

小型船舶が発電所近傍で漂流した場合でも、敷地前面の防波堤等に衝突して止まることから取水性に影響は無い。カーテン・ウォール前面に小型船舶が到達した場合であっても、取水はカーテン・ウォール(水深 8m) 下端から深層取水しているため、浮遊する小型船舶により、取水機能が損なわれるような閉塞は生じない設計とする。

船舶の座礁により重油流出事故が発生した場合に、カーテン・ウォールにより深層より取水することにより、復水器及び補機冷却用水の取水性に影響が及ばない設計とする。また、必要に応じてオイルフェンスを設置する措置を講じる。

なお、津波発生時の漂流船舶による影響については、第 5 条（津波による損傷の防止）において取り扱う。

2. 敷地前面の航路について

最も距離の近い航路でも発電所より 30km の離隔距離があり、航路を通行する船舶が漂流した場合であっても、敷地に到達することはなく、安全施設が安全機能を損なうことはない。（図 1 参照）

3. 小型船舶等の衝突による影響

航路外の船舶として、発電所周辺の船舶の影響評価を実施する。評価対象の船舶としては、第 5 条（津波による損傷の防止）において抽出した船舶とする。

第 5 条（津波による損傷の防止）では、漂流物の影響評価において、発電所の周辺の漂流物となる可能性のある施設・設備等の抽出を行っており、構内（港湾内）の船舶として、燃料等輸送船、浚渫船、土運船、作業船を、構外（港湾外）の船舶として漁船、プレジャーボート、巡視船を抽出している。

構内の船舶、及び、構外の船舶のうち巡視船については、異常気象、海象時、荒天が予測される場合には、必要に応じて、入港の中止・離岸等の措置を取ることとしていることから、漂流船舶とはならないと評価する。

構外の船舶のうち漁船、プレジャーボートについては、荒天等により漂流に至るような場合であっても、投錨等の対応を取ることが可能と考えられる。保守的に、漁船、プレジャーボートとして小型船舶の漂流を仮定した場合であっても、小型船舶は防波堤等に衝突し止まることで、取水口に到達することはない。（図 2 参照）また、カーテン・ウォール前面に小型船舶が到達した場合であっても、取水はカーテン・ウォール(水深 8m) 下端から深層取水しているため、取水への影響はない。（図 3 参照）

4. 重油の流出による影響

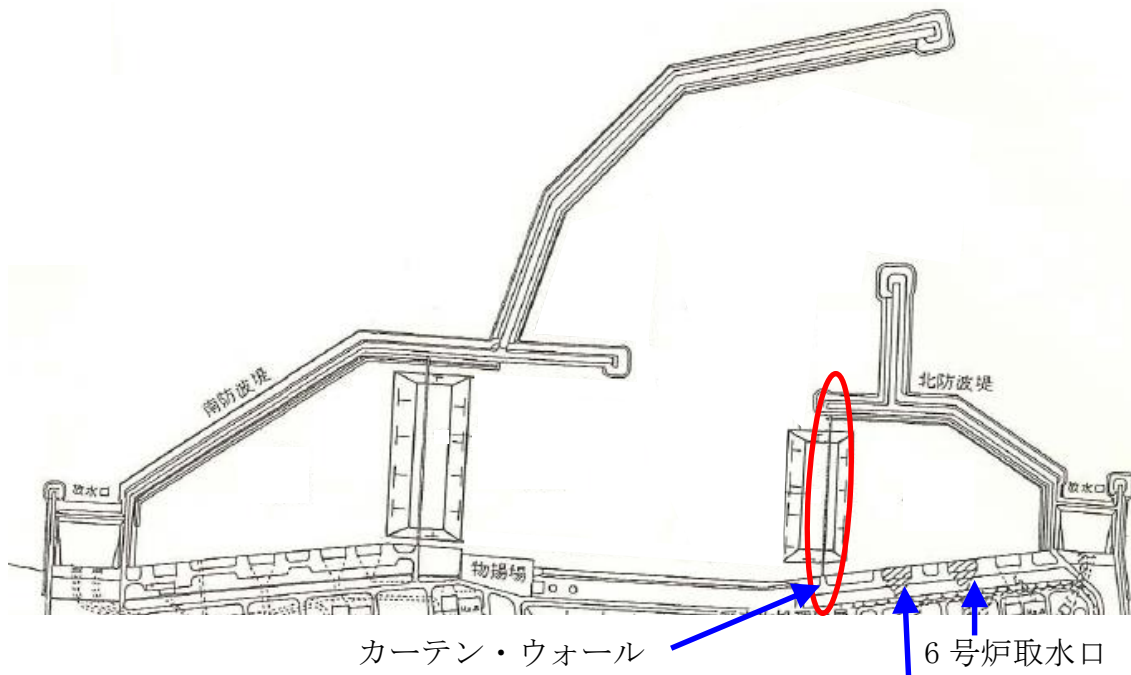
船舶の座礁により重油流出事故が発生した場合に、カーテン・ウォールにより深層から取水することにより、復水器及び補機冷却用水の取水性に影響が及ばない設計とする。

また、必要に応じてオイルフェンスを設置する措置を講じる。なお、外部火災影響評価では、漂流船舶の重油漏えいに対する検討として、発電所から離隔距離約 30km の主要航路上の船舶から漏えいした重油がサイト前面の海域に到達する時間を、過去のタンカーの大規模流出事故から 24 時間程度と推定し、これに対し情報入手からオイルフェンス設置までの所要時間が 11 時間程度であるため、重油が到達するまでにオイルフェンスの展開が可能であるとしている。

(「6 条 別添 4-1 添付資料 5 漂流船舶の二次的影響について」参照)



図 1 敷地周辺の航路



カーテン・ウォール 6号炉取水口

7号炉取水口

図2 防波堤，カーテン・ウォール配置

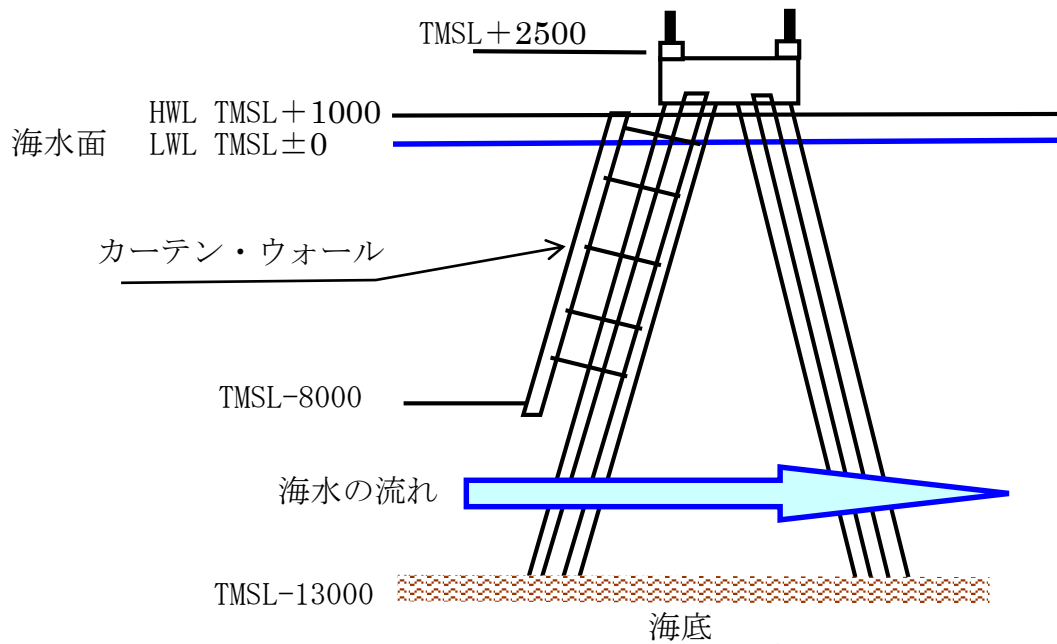


図3 カーテン・ウォール概要図

電磁的障害影響評価について

1. 基本方針

安全保護系は、電磁的障害による擾乱に対して、制御盤へ入線する電源受電部にラインフィルタや絶縁回路を設置、外部からの信号入出力部にラインフィルタや絶縁回路を設置、通信ラインにおける光ケーブルの適用等により、影響を受けない設計としている。

2. サージ・ノイズ、電磁波に対する具体策

電磁的障害には、サージ・ノイズや電磁波の侵入があり、これらは低電圧の計測制御回路に対して影響を及ぼす恐れがあるため、計測制御回路を構成する安全保護系制御盤およびケーブルは、フィルタや絶縁回路の設置によりサージ・ノイズの侵入を防止するとともに、鋼製筐体や金属シールド付ケーブルの適用により電磁波の侵入を防止している。（図 1 参照）

計測制御回路を構成する制御盤およびケーブルは原則として以下の設計としている。

(1) サージ・ノイズ対策

a. 電源回路

制御盤へ入線する電源受電部にサージ・ノイズ対策としてフィルタを設置し、外部からのサージ・ノイズの侵入を防止する設計としている。

b. 信号回路

電磁的影響を受けやすい起動領域モニタおよび出力平均モニタについては、サージ・ノイズ対策として必要に応じてフィルタを使用し、外部からのサージ・ノイズの侵入による影響を防止する設計としている。

(2) 電磁波対策

a. 筐体

制御盤の制御部、演算部は鋼製の筐体に格納し、筐体は接地することで電磁波の侵入を防止する設計としている。

b. ケーブル

ケーブルは必要により金属のシールド付ケーブルを使用し、金属シールドは接地して電磁波の侵入を防止する設計としている。

3. 電磁波等の発生源に対する対策

電源ケーブルは信号ケーブルとは別のトレイ・ダクトに敷設し、信号ケーブルはシールド付ケーブルを使用して接地することで計装回路への電磁的影響を防止している。

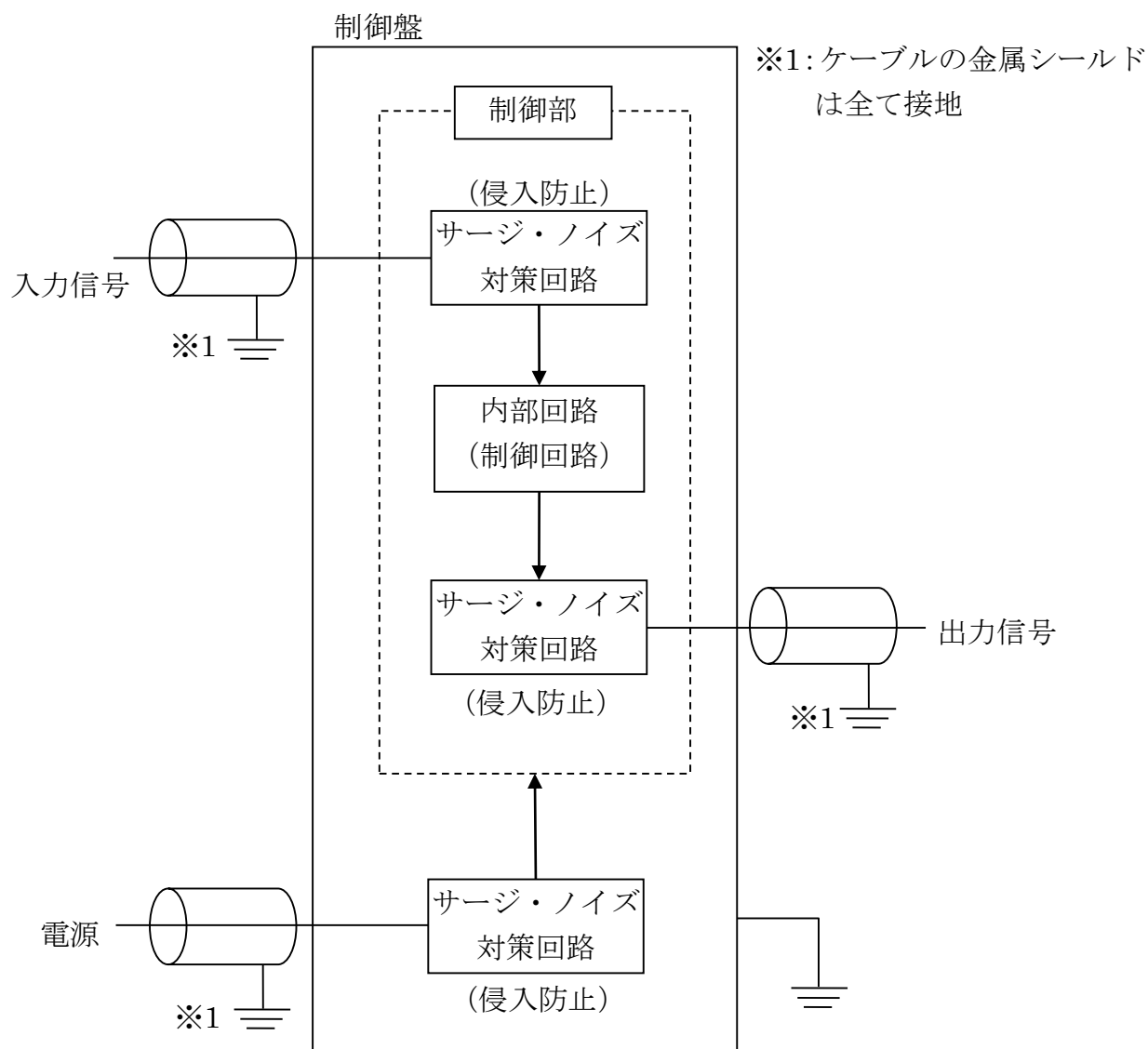


図 1 電磁的障害対策の例

積雪・火山灰堆積状態での地震発生時の影響評価について

1. 評価内容

自然現象の重畳評価において抽出された組合せ「雪・火山灰が堆積している状態での地震発生」についての評価を実施した。自然現象の重畳評価においては主事象（設計基準規模）×副事象（年超過発生確率 10^{-2} 規模）を想定することを基本としていることから、表 1 に示す 8 パターンを考慮した。

これらの組み合わせのうち、荷重の大きさ等の観点で代表性のある、主事象：地震、副事象：積雪の組み合わせ、及び主事象：火山灰、副事象：地震（ベース負荷：積雪）の 2 通りの評価を実施するものとする。代表性の判断の際の基準については表 2 に示す。

表 1 重畳評価ケース

No.	主事象 (設計基準規模)	副事象 (10^{-2} 規模)	ベース負荷 (平均規模)	備考
1	地震(Ss 等)	積雪(115.4cm)	—	—
2	地震(Ss 等)	火山灰(3.5cm)	積雪(31.1cm)	No.1 に包絡
3	風(40.1m/s)	火山灰(3.5cm)	積雪(31.1cm)	No.1 に包絡
4	風(40.1m/s)	積雪(115.4cm)	—	No.1 に包絡
5	火山灰(35.0cm)	地震(10^{-2} 相当地震動)	積雪(31.1cm)	—
6	積雪(167.0cm)	地震(10^{-2} 相当地震動)	—	No.5 に包絡
7	火山灰(35.0cm)	風(27.9m/s)	積雪(31.1cm)	No.5 に包絡
8	積雪(167.0cm)	風(27.9m/s)	—	No.5 に包絡

※ 除雪に期待できる施設は積雪荷重について除雪能力を考慮した値とする。

※ 火山灰については、確率論的評価を実施していないことから、副事象として考慮する場合は、設計基準規模として設定している噴火規模（VEI5）から 1 段階噴火規模を下げた VEI4 相当を考慮する。

表 2 水平荷重・堆積荷重の比較

a. 水平荷重

		せん断力(kN) (K6 R/B 躯体 38.2(m) - 49.7(m))	判定
比較 a-1	設計用地震力	43.35×10^3	地震 > 風
	風 (40.1m/s)	2.65×10^3	
比較 a-2	地震 (10^{-2} 相当地震動)	9.7×10^3	地震 > 風
	風 (27.9m/s)	1.29×10^3	

b. 堆積荷重

		堆積荷重 (N/m ²)	判定
比較 b-1	積雪(115.4cm)	3,393	積雪(115.4cm) > 火山灰(3.5cm) + 積雪(31.1cm)
	火山灰(3.5cm) + 積雪(31.1cm)	1,429	
比較 b-2	積雪(167.0cm)	4,910	積雪(167.0cm) < 火山灰(35.0cm) + 積雪(31.1cm)
	火山灰(35.0cm) + 積雪(31.1cm)	6,060	

2. 評価対象施設について

評価対象施設の抽出フローを図 1 に示す。地震の防護対象が耐震重要度分類 S,B,C クラス、積雪の防護対象が安全重要度クラス 1, 2, 3 であることから、地震と積雪・火山灰の重畳については、その両方に含まれる設備を評価対象とする。

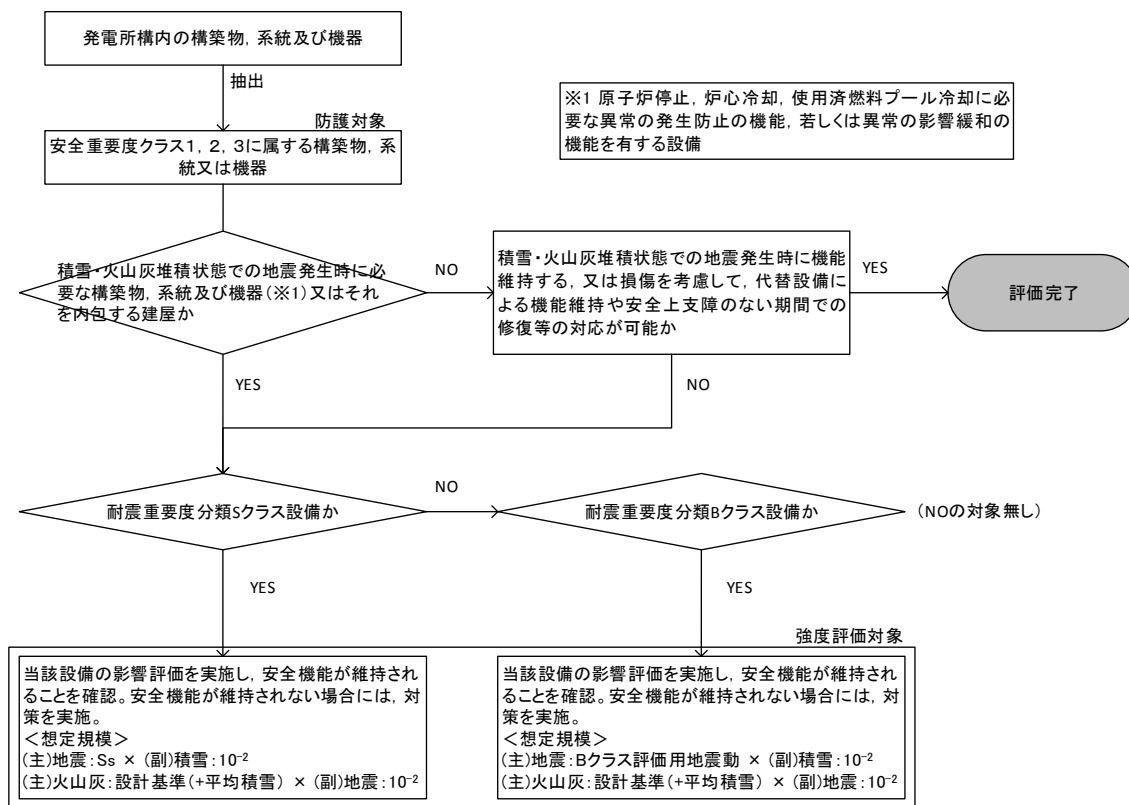


図 1 評価対象施設の考え方

3. 安全施設の健全性評価結果

抽出された各評価対象施設の直上付近の屋根等の健全性について確認した。屋根強度評価用の値は、除雪能力を考慮した値とする。

【主な評価対象施設】

建屋等	評価部位	評価対象施設	判定
R/B	R/B 屋根全体	使用済燃料プール等	○
C/B	C/B 屋根全体	中央制御室等	○
T/B	熱交換器エリア直上の屋根部分	非常用所内電源系，非常用所内電源系空調，原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	○
屋外	—	軽油タンク，非常用ディーゼル発電機燃料移送系	防護対策を実施

4. 重畳評価の保守性について

上記の副事象の規模の考え方（年超過発生頻度 10^{-2} 規模）については、Turkstra 規則における想定（平均的な値）よりもかなり保守的な設定としている。

年超過確率については、1年で特定の規模以上の事象が発生する確率となっていることから、例えば年超過確率 10^{-2} /年の規模（言い換えると100年に1回以上発生する確率が約63%の規模）は、平均的な規模（年に数回の規模）や年最大値の平均（おおよそ1年に1回の規模）よりも、一般的に大きくなると言える。

例として、本資料で対象としている地震と積雪の重畳について、同じくTurkstra 規則を参照している建築基準法における評価と比較したものを以下に示す。

表 3 組み合わせる積雪荷重について（建築基準法との比較）

	積雪の想定する規模	堆積積雪深
建築基準法 (建築物荷重指針・ 同解説(2004))	地震との組合せを考慮する場合（短期荷重）、 <u>平均的な積雪荷重</u> を想定し、建築基準法施行令第86条に規定する積雪荷重によって生ずる力の0.35倍	柏崎市 $130\text{cm} \times 0.35$ =45.5cm 刈羽村 $170\text{cm} \times 0.35$ =59.5cm
今回の重畳評価に採用する考え方	再現期間 100 年における最大値を想定	1 日当たり積雪量の年超過確率 10^{-2} の規模の値 84.3cm + 最深積雪量の平均値 31.1cm=115.4cm

※建築基準法では上記の通り、簡易式（短期積雪荷重の0.35倍）により算出しているが、そこでの想定規模の考え方に基づいて、経験データから冬季の平均的な積雪量を算出した場合、31.1cmとなる。

避雷鉄塔による遮蔽効果に期待しない場合の落雷影響評価について

1. 評価内容

避雷鉄塔による遮蔽効果に期待しない場合の落雷影響評価を実施した。単独事象としての落雷評価と異なる点は避雷鉄塔による遮蔽効果の有無のみであるため、雷撃電流値の算出方法や安全施設の健全性評価の手法等については添付資料 9（落雷影響評価）を参照。

また、自然現象の重畳評価においては主事象（設計基準規模）×副事象（年超過発生頻度 10^{-2} 規模）を考慮するため、落雷が主事象の場合と副事象の場合の 2 パターンを検討する必要があるが、以下の理由により落雷が主事象の場合のみを検討する。

- ・落雷が主事象の場合は、組み合わせ相手となる自然現象の規模は設計基準よりも小さい年超過発生頻度 10^{-2} の規模を考慮するが、その場合も避雷鉄塔による遮蔽効果に期待できない可能性がある。

2. 避雷鉄塔遮蔽効果による雷撃電流値への影響について

単独事象としての落雷評価時には、冬季雷のうち約 70%が避雷鉄塔に補足されるものとして評価している（添付資料 9 別紙 2「1.2. 雷撃頻度および最大電流の計算」参照）。今回、この割合を 0%（進入比率 $r=1.0$ ）と仮定し、雷撃電流値を算出した。評価結果を表 1 に示す。

表 1 避雷鉄塔の有無による雷撃電流値への影響評価結果

	避雷鉄塔	
	期待する場合	期待しない場合
年超過頻度 10^{-4} に相当する雷撃電流値 (kA)	156kA (設計基準雷撃電流値としては余裕を見て 200kA)	216kA

3. 安全施設の健全性影響評価結果

雷撃電流値 216kA に対する建屋内重要設備の機能健全性について確認した。単独事象としての落雷評価と同様に、雷サージ電圧が、安全機能を有する設備で要求される電源盤・制御盤及び計装設備の雷サージ耐電圧値を上回らないことを確認した結果を表 2 及び表 3 に示す。

表 2 評価結果 (6号炉)

評価対象設備		雷サージ(V)		雷サージ耐電圧(V)	評価
		200kA 換算値(V)	216kA 換算値(V)		
電源盤・制御盤	各建屋内・各建屋間	1106	1194.7	2000～	影響なし
計装設備	R/B 4F 東側～各建屋	709.3	766.0	1000～	影響なし
	R/B 4F 東側～C/B	709.3	766.0	1000～	影響なし
	R/B(4F 東側除く)及び各建屋内～R/B(4F 東側除く)及び各建屋内	238.7	257.8	1000～	影響なし

表 3 評価結果 (7号炉)

評価対象設備		雷サージ(V)		雷サージ耐電圧(V)	評価
		200kA 換算値	216kA 換算値		
電源盤・制御盤	各建屋内・各建屋間	1150.7	1242.7	2000～	影響なし
計装設備	R/B 4F 東側～T/B	1150.7	1242.7	15000 (差圧発信器)	影響なし
	R/B 4F 東側～C/B	253.5	273.7	1000～	影響なし
	R/B(4F 東側除く)及び各建屋内～R/B(4F 東側除く)及び各建屋内	253.5	273.7	1000～	影響なし

重畳の考え方について

1.1 検討対象

1.1.1 検討対象事象

検討対象とする外部事象は、文献より集約、整理した 83 事象（自然現象 55 事象、人為事象 28 事象）から類似事象・随伴事象の観点で設計上考慮すべき事象を整理した 62 事象（自然現象 42 事象及び人為事象 20 事象）に対して、地震、津波を加えた 64 事象とする。

1.1.2 単一の事象における評価基準の重畳検討への適合性

単一の自然現象/人為事象として一次評価で評価基準 A～D と判定された事象についても、重畳を考えた場合にはプラントの安全性に影響を及ぼす可能性があるため、検討対象の評価基準を見直す。単一の自然現象/人為事象で設定した評価基準及び重畳の検討への適用性について表 1 に示す。また、人為事象のうち、意図的事象については重畳の検討の対象外とする。基準 D については、対象事象のうち他事象との相関性（1.2.1 節で検討）が存在する場合に留意する。

表 1 評価基準の重畳検討への適用性

評価基準	重畳への適用性検討
<u>基準 A</u> プラントに影響を与えるほど接近した場所で発生しない。	○：発生しない事象については重畳検討においても考慮する必要がない。
<u>基準 B</u> ハザードの進展・襲来が遅く、事前にそのリスクを予知・検知し、ハザードを排除できる。	×：他の現象の影響により進展・襲来が早くなる可能性がないか、また予知・検知・排除が困難な状況とならないか検討する。
<u>基準 C</u> プラント設計上、考慮された事象と比べて、設備等への影響度が同等もしくはそれ以下、または、プラントの安全性が損なわれない。	×：影響度が他事象以下であっても、重畳を考慮する場合には他事象にその影響度が上乘せられるため、検討する必要がある。
<u>基準 D</u> 影響が他の事象に包絡される。	△：基本的には包絡される他事象において検討するが、他事象との相関性や新たな影響モードの発生については適切に考慮する。

基準 A

自然 [雪崩]、[結氷板]、[流水]、[氷壁]、[砂嵐]、[洪水]、[池・河川の水位低下]、[河川の迂回]、
[干ばつ]、[隕石]、[衛星の落下]、[土石流]
人為 [航空機落下]、[ダムの崩壊]、[パイプライン事故]、[タービンミサイル]、[油の流出]

基準 D

自然[ひょう、あられ]

→衝突影響について、[竜巻]にて評価。

[氷嵐]、[雨水]、[みぞれ]、[氷晶]

→堆積荷重の影響については[積雪]や[火山]に包絡される。閉塞（空調）の影響については[積雪]に包絡される。

[極限的な圧力(気圧高/気圧低)]

→気圧差による影響については[竜巻]に包絡される。

[高潮], [波浪], [風津波], [静振]

→高潮（風津波）は耐津波設計において考慮されている。波浪，静振の影響は一時的であるため，防潮堤の設計津波に対する余裕や降水の影響評価で包絡できる。

[海水中の地滑り]

→第5条（津波による損傷の防止）において[津波]事象として考慮。

[地面隆起(相対的な水位低下)], [泥湧出]

→基礎地盤安定性において評価されている。地面隆起に伴い海水面が相対的に下降するが，潮位変化による取水への影響はない。影響モードについては，[地震]事象として考慮。

[地下水（多量/枯渇）]

→土壌に地下水が浸透することにより，地滑りや建屋への浸水が考えられるが，地滑りについては，[地滑り]にて考慮し，浸水については，[地下水による浸食]にて考慮。なお，地下水を水源とした設備はないことから，枯渇による影響はない。

人為[産業施設の事故], [輸送事故]

→[火災・爆発], [有毒ガス]において評価。

[油流出]

→[火災・爆発], [船舶の衝突]において評価。

1.1.3 重畳検討対象の抽出結果

抽出された，重畳の検討対象となる自然現象及び人為事象を以下の表 2 に示す。

表 2 重畳検討対象

No.	自然現象	No.	自然現象
1	地震	18	土の伸縮
2	津波	19	海岸浸食
3	降水	20	地下水による浸食
4	積雪	21	森林火災
5	霜，霜柱	22	生物学的事象
6	風（台風）	23	塩害，塩雲
7	竜巻	24	太陽フレア，磁気嵐
8	霧，靄		
9	高温		
10	低温（凍結）		
11	高温水（海水温高）		
12	低温水（海水温低）		
13	落雷		
14	火山		
15	地滑り		
16	海水中の地滑り		
17	土地の浸食，カルスト		

No.	人為事象
1	火災・爆発
2	有毒ガス
3	船舶の衝突
4	電磁的障害
5	サイト内外での掘削
6	内部溢水
7	重量物輸送
8	化学物質の放出による水質悪化

1.2 事象の特性の整理

1.2.1 相関性のある自然現象の特定

自然現象は、特定の現象が他の現象を誘発したり、同様の原因（低気温時に頻発等）を有したりするなどの因果関係を有し、同時期に発生する事象群が存在する。これらの相関性を持つ自然現象を特定する。相関性のある自然現象を抽出した結果を表 3 に示す。

表 3 相関性のある自然現象

相関タイプ	自然現象（※可能性のある最大の組み合わせ）
①低温系	[積雪], [雪崩], [霜, 霜柱], [低温], [低温水] ([氷嵐, 雨氷, みぞれ], [氷晶]) *1
②高温系	[高温], [高温水]
③風水害系	[降水], [風(台風)]または[竜巻]*2, [落雷], [地下水による浸食] ([高潮], [波浪], [風津波], [静振]) *3, [極限的な圧力(気圧高/気圧低)] *4, [地下水(多量/枯渇)]
④地震系(津波)	[地震], [津波] ([地面隆起(相対的な水位低下)], [海水中の地滑り]) *5
⑤地震系(火山)	[地震], [火山]*6

*1 [氷嵐, 雨氷, みぞれ], [氷晶]は、包絡されているとしている積雪と同じ相関タイプに分類されることから、最も影響が厳しい積雪で代表して考慮する。

*2 [風(台風含む)]と[竜巻]は、特定の箇所に同時に負荷がかからないため、どちらか一方のみを考慮する。

*3 [高潮], [波浪], [風津波], [静振]は、包絡されているとしている津波と異なり、台風等との相関性が存在する。ただし、規模の大きな事象を想定した場合も止水対策の設計余裕の範囲内であると考え、津波で代表して評価する。

*4 [極限的な圧力(気圧高/気圧低)]については、包絡されているとしている竜巻と同じ相関タイプに分類されることから、影響が厳しい竜巻で代表して考慮する。

*5 [地面隆起(相対的な水位低下)], [海水中の地滑り]については、それぞれ包絡されているとしている地震、津波と同じ相関タイプに分類されることから、地震と津波の影響評価の中で考慮する。

*6 火山性地震の場合の、火山と地震を想定する。

1.2.2 影響モードのタイプ分類

組み合わせを検討するに当たって、自然現象の影響モードを表 4 の 4 つのタイプに分類する (図 1 参照)。ただし、表 4 で分類されている自然現象は現象毎に大枠で分類したものであり、実際に詳細検討する際には各現象の影響モード毎に検討する (1.3.2 節)。

ここで生物学的事象については、海生生物(くらげ等)と齧歯類(ネズミ等)で影響タイプが異なるため、分けて考慮する。

表 4 影響モードのタイプ分類

影響タイプ	特性	現象
コンスタント型, 季節型	年間を通してプラントに影響を及ぼすような自然現象（ただし，常時負荷がかかっているわけではない）。もしくは特定の季節で恒常的な自然現象。	[降水], [風(台風)], [積雪], [霜, 霜柱], [霧, 靄], [高温], [低温(凍結)], [高温水(海水温高)], [低温水(海水温低)], [生物学的事象(くらげ等)], [地下水による浸食]
持続型	恒常的ではないが，影響が長期的に持続するような自然現象。影響持続時間が長ければ数週間に及ぶ可能性があるもの。	[火山]
瞬間型	瞬間的にしか起こらないような自然現象。影響持続時間が数秒程度（長くても数日程度）のもの。	[地震], [津波], [竜巻], [落雷], [地滑り], [海水中の地滑り], [森林火災], [生物学的事象(ネズミ等)], [太陽フレア, 磁気嵐]
緩慢型	事象進展が緩徐であり，発電所の運転に支障をきたすほどの短時間での事象進展がないと判断される自然現象。	[土地の浸食, カルスト], [土地の伸縮], [海岸浸食], [塩害, 塩雲]

※ 複数の型が該当する自然現象は，保守的な型を割り当てる。（上側が保守的）
 例えば風(台風)について，風圧力は瞬間型だが，作業性などの検討においては定常的な負荷が想定されるため，コンスタント型に分類

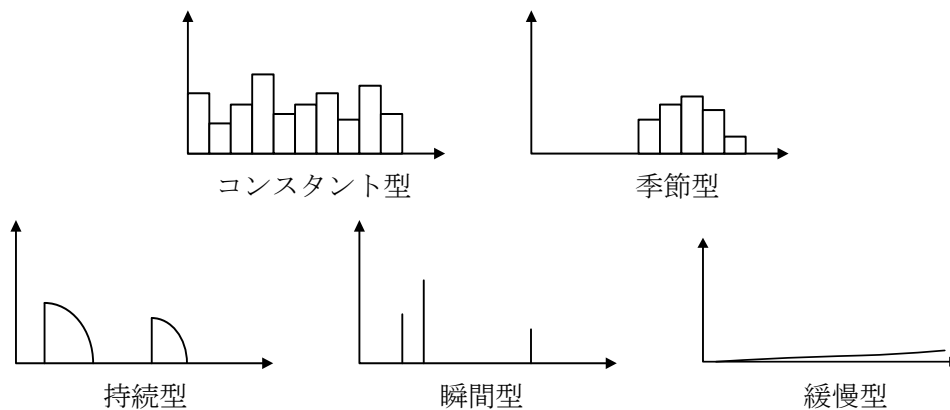


図 1 影響モード分類

1.3 重畳影響分類

1.3.1 重畳影響分類方針

自然現象の組み合わせについては、以下のような点で画一的な整理（検討除外基準の設定等）が難しいことから、1.1.3節で抽出された事象の全ての組み合わせに対して網羅的に検討を実施する。

- 例えば瞬間型同士の重畳については、同時に発生する可能性が極めて小さいことから基本的には重畳を考慮する必要はないが、影響モードや評価対象設備によっては影響持続時間が長くなることがあるため、個別に検討が必要となる。（例：竜巻の直接的な影響は瞬間型だが、竜巻により避雷鉄塔が壊れた場合には避雷鉄塔が修復されるまで影響が持続する。そのため、竜巻と落雷は両方とも瞬間型に分類されるが、重ね合わせを考慮する必要がある。）

また、組み合わせを考慮する事象数、規模、及び相関性をもつ自然現象への配慮について以下に示す。

1.3.1-1 事象数

影響が厳しい事象が重畳することは稀であることから、基本的には2つの事象が重畳した場合の影響を検討する。ただし、発生頻度が高い事象については、考慮する組み合わせに関係なく、ベースとして負荷がかかっている状況を想定する（図2参照）。例えば、地震と火山灰の組み合わせを考慮する場合も、ベース負荷として積雪や降水の影響についても考慮する。

ただし、1.2.1節で示した、相関性のある低温系、高温系、風水害系、地震系については、それぞれが同時に発生しているものとして考慮する。

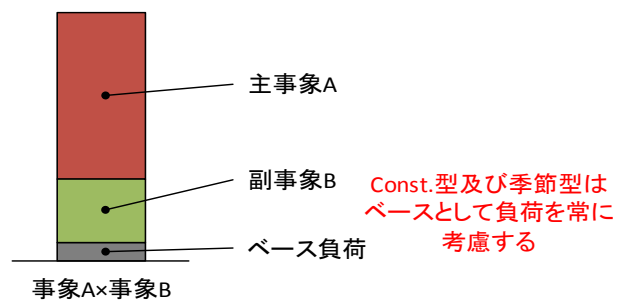


図2 ベース負荷の考え方

1.3.1-2 規模

組み合わせる事象の規模については、基本的には単純性・保守性のために、主事象として設計基準で想定している規模、副事象として年超過発生確率 10^{-2} （プラント寿命期間を考慮して設定）の規模の事象を想定する。ただし、随伴事象など相関性が高い事象の組み合わせについては、設計基準規模の事象同士が重畳することを考慮する。

上記の相関性が低い事象の組み合わせの規模の考え方については、Turkstra 規則よりも保守的な設定*としている。Turkstra 規則の考え方は、建築基準法や、土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」、国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」、ANSI(米国国家規格協会)等で採用されている。Turkstra 規則は主たる作用（主事象）の最大値と従たる作用（副事象）の任意時点の値の和として作用の組み合わせを考慮する。

※Turkstra 規則はもともと、従たる作用は平均的な値（例えば、地震×積雪を考慮する場合に、地震荷重を S_s とすると、積雪堆積荷重は平均積雪深）を想定しているため、年超過発生確率 10^{-2} の規模は保守側である（添付資料15「4. 重畳評価の保守性について」参照）。

1.3.1-3 相関性をもつ自然現象への配慮

1.3.1-1 節の通り、相関性をもつ自然現象は同時に発生することを想定し、相関性をもつ事象のセット+他事象の組み合わせを考慮する。

相関性をもつ事象のセット+他事象を検討するための前処理として、相関性をもつ事象のセット内で、単一事象時に想定している影響モード以外の新たな影響モードの有無、及び増長されるモードの有無を確認し、特別な配慮が必要か検討した結果を以下に示す。

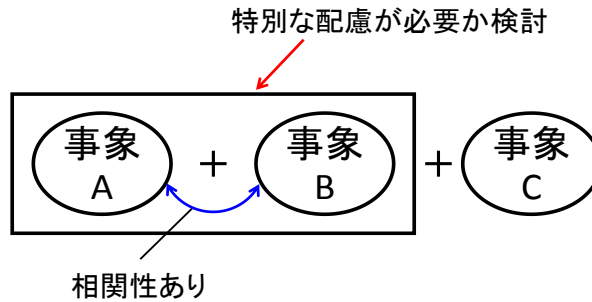


図 3 相関性をもつ自然現象への配慮

①低温系、②高温系

雪崩とひょう、あられは特定の箇所と同時に負荷がかからない。その他の事象については、それぞれが異なる影響モード（表 5 参照）であることから重畳した場合も影響が増長するような影響モードは存在せず、新たな影響モードについても起こりえない。

表 5 低温系、高温系の影響モード

自然現象		影響モード
低温系	[積雪]	堆積荷重
	[雪崩]	衝突荷重*
	[ひょう, あられ]	衝突荷重*
	[霜, 霜柱]	—
	[低温]	外気温度低(凍結)
	[低温水]	—
高温系	[高温]	外気温度高(冷却機能低下: 空調)
	[高温水]	海水温度高(冷却機能低下: 海水系)

* 衝突荷重は特定の箇所に同時に負荷がかからない。

③風水害系

風水害系の影響モードを表 6 に示す。竜巻に伴う止水対策（水密扉等）への影響については、設計基準竜巻に対して機能が損なわれない設計とする。竜巻に伴う落雷対策への影響については、避雷鉄塔が倒壊する可能性があるが、落雷以外の事象への影響は存在しない（他事象との重畳を評価する際には考慮不要）。

表 6 風水害系の影響モード

自然現象		影響モード
風水害系	[降水]	浸水, 堆積荷重
	[風 (台風)]	風圧荷重*, 取水口閉塞
	[竜巻]	風圧荷重*, 気圧差荷重, 飛来物衝突荷重, 取水口閉塞
	[落雷]	雷サージ&誘導電流
	[地下水による浸食]	地盤不安定, 浸水

* 風 (台風) と竜巻は同じ風圧荷重の影響モードが存在するが, 竜巻評価における基準風速策定の際に用いている風速データについては風 (台風含む) の影響を含んだ値となっていることから, 風 (台風) の組み合わせ荷重については竜巻評価に包絡されている。

④地震系 (津波)

地震随伴津波については, 止水対策等により安全機能が損なわれない設計とする (第 5 条耐津波設計方針で説明)。

⑤地震系 (火山)

地震系 (火山) の影響モードを表 7 に示す。火山性地震における, 火山のプラントへの影響については, 地震の本震と同時にプラントに襲来する可能性は低く, ある程度の時差をもって襲来するものと思われる。また, 火山性地震についてはその他の地震源による地震よりも大幅に危険性が低いことが評価されており (火山影響評価で実施), プラントへの地震動による影響は無視できる。

表 7 地震系 (火山) の影響モード

自然現象		影響モード
地震系 (火山)	[地震]	地震荷重, 地盤沈下, 地面隆起 (相対的な水位低下)
	[火山]	堆積荷重, 取水口閉塞, 空調閉塞, 腐食, 相間短絡

以上より, 相関性をもつ事象のセットについて, 単一事象時に想定している影響モード以外の新たな影響モードがないこと, 及び増長されるモードが存在しないことが確認されたため, 相関性をもつ事象のセット+他事象での増長する影響を確認する際に, 相関性をもつ事象について特別に配慮する必要はない。

1.3.1-3 影響パターン

組み合わせを考慮した場合に発電用原子炉施設に与える影響パターンを以下の 3 つの観点で分類した。

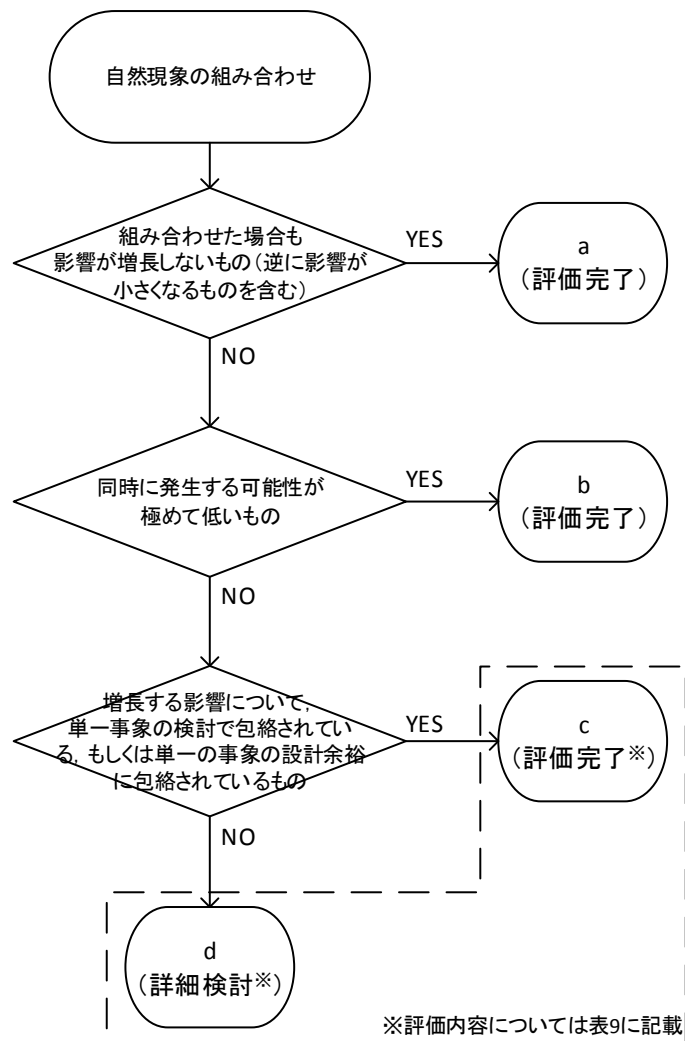
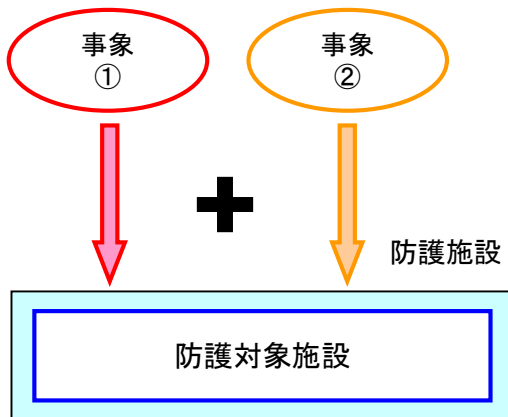


図 4 影響パターン選定フロー

上記 a, b に該当する自然現象の組み合わせについては、安全施設の安全機能が損なわれない。

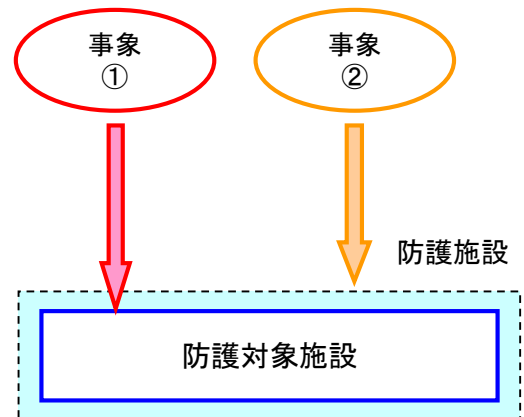
上記 c, d に該当する自然現象の組み合わせについては、事象が単独で発生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組み合わせとなるが、その増長する影響パターンについては図 5 のとおり 4 つに分類した。

I. 各事象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース



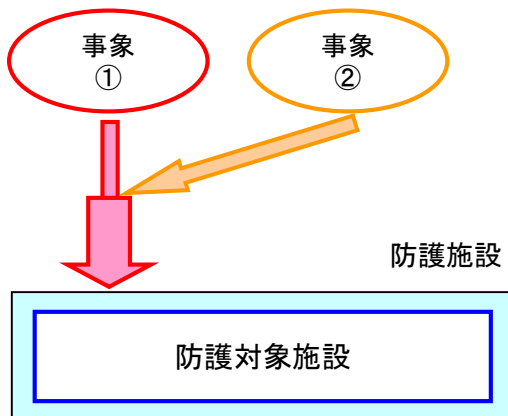
例：積雪+火山灰=堆積荷重増

II. 事象②によって防護施設が機能喪失することにより、事象①の影響が増長するケース



例：地震+津波
=地震により止水機能が喪失して浸水量増

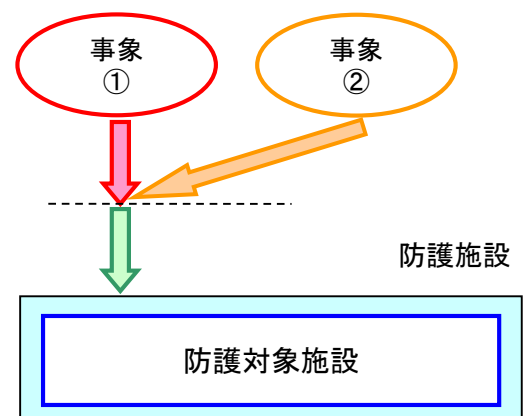
III-1. 他の事象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース



例：火山灰+降水
=密度増による堆積荷重増

例：森林火災+強風
=風速増による火線強度増

III-2. 他の事象の作用により影響が及ぶようになるケース



例：火山灰+降水
=斜面に堆積した火山灰が大量の降水で滑り、衝撃荷重発生

図 5 重畳による増長パターン分類

1.3.2 重畳影響分類結果

事象の重畳影響について1.3.1に基づき、a, b, c, dに分類（c, dについては更にI, II, III-1, III-2に分類）した結果について表8に示す。

表 8 自然現象／人為事象の重畳 マトリックス (3/3)

事象②		事象①		No.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
		事象	損傷・機能喪失モード	事象	海岸浸食	森林火災	生物学的事象	塩害、塩害	太陽フレア、磁気嵐	火災・爆発	有毒ガス	船舶の衝突	電磁的障害	サイト内外での掘削	内部溢水	重量物輸送	化学物質の放出による水質悪化
					①冷却機能低下:海水系	①熱影響 ②外気取入機器及び人への影響	①閉塞(取水) ①個別機器の損傷	①腐食	①誘導電流	①熱影響 ②外気取入機器及び人への影響	①人への影響	①閉塞(取水)	①電磁的影響	①ケーブル・配管損傷 ②斜面倒壊	①被水・没水	①燃料集合体落下、重機転倒	①冷却効率低下 ②腐食
No.	事象	損傷・機能喪失モード															
1	地震	①荷重(地震荷重)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		②地盤沈下(変位)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
2	津波	③地面隆起(相対的な水位低下)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		④泥湧出	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
3	降水	①浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		②荷重(衝突) 襲来物・波力	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
4	風(台風含む)	③浮力	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		④閉塞(取水) 襲来物・海底砂移動	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a
5	竜巻	⑤冷却機能低下:海水系	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
6	落雷	①荷重(風圧)	a	d(III-1)	d(III-1)	a	a	a	a	d(III-1)	d(III-1)	a	a	a	a	a	a
		②閉塞(取水)	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a
7	地下水による浸食	①荷重(風圧)	a	b	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a
		②荷重(気圧差)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
8	積雪	③荷重(衝突)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		④閉塞(取水)	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a
9	霧、霧柱	①雷サージ&誘導電流	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a
		①地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
10	低温系	②浸水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
11	高温系	②相間短絡	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		③閉塞(空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
12	霧、霧柱	①-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①外気温度低(凍結)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
13	霧、霧柱	②外気温度高(冷却機能低下:空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①海水温度高(冷却機能低下:海水系)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	b
14	霧、霧柱	①-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①-	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
15	火山	①荷重(堆積)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		②閉塞(取水)	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a
16	地滑り	③閉塞(空調)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		④腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
17	海水中の地滑り	⑤相間短絡	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		⑥水質汚染	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
18	土地の浸食、カルスト	⑦大気汚染	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①荷重(衝突)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
19	土の伸縮	②閉塞(取水)	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①地盤不安定	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
20	海岸浸食	①冷却機能低下:海水系	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①熱影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
21	森林火災	②外気取入機器及び人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①閉塞(取水)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
22	生物学的事象	①個別機器の損傷	a	a	a	a	a	a	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a
		①腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
23	塩害、塩害	①誘導電流	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①熱影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
24	太陽フレア、磁気嵐	②外気取入機器及び人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
25	火災・爆発	②外気取入機器及び人への影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①閉塞(取水)	a	a	a	d(I)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
26	有毒ガス	①閉塞(取水)	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①電磁的影響	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
27	船舶の衝突	①ケーブル・配管損傷	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		②斜面倒壊	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
28	電磁的障害	①被水・没水	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①燃料集合体落下、重機転倒	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
29	内部溢水	①冷却効率低下	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		②腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
30	重量物輸送	②腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		①冷却効率低下	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
31	化学物質の放出による水質悪化	②腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		②腐食	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

6 条-別添 1(外事)-1-添付 17-12

1.4 個別評価

プラントへの影響が想定される重畳（1.3.2 で c,d に分類されたもの）について、個別に検討を実施する。ここで、「重畳の結果を個別に評価するもの」、「他の重畳事象で代表させるもの」、「単一の事象の検討で包絡されている、もしくは単一の事象の設計余裕に包絡されているもの（1.3.2 の c）」に整理し検討する。（例：積雪＋降水の堆積荷重は、積雪＋火山の堆積荷重以下であることからそちらで代表させる。）

検討結果を表 9 に示す。荷重評価については、荷重の大きさ等の観点で代表性のある、地震、積雪、火山の組み合わせに対して影響評価を実施し、問題無いことを確認した。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (1/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
1	地震(地震荷重)×積雪(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、 地震または積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している 。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で地震が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →評価対象施設に対する影響評価を実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 15)
2	地震(地震荷重)×火山(堆積) ※ベース負荷として積雪(堆積)及び降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、 地震または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している 。仮に、建屋等に火山灰が堆積している状態で地震が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →評価対象施設に対する影響評価を実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 15)
3	風(風荷重)×積雪(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、風または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で風が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.1,2 で代表 (添付資料 15)
4	風(風荷重)×火山(堆積) ※ベース負荷として積雪(堆積)及び降水(堆積)を考慮	d(Ⅲ-1)	安全施設は、風または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に火山灰が堆積している状態で風が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.1,2 で代表 (添付資料 15)
5	積雪(堆積)×火山(堆積) ※ベース負荷として降水(堆積)を考慮	d(I)	安全施設は、 積雪または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している 。仮に、建屋等に火山灰と積雪が同時期に堆積した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →火山において評価
6	積雪(堆積)×降水(堆積)	d(I)	安全施設は、積雪または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に雪が堆積している状態で雨水が染み込むことにより荷重増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.5 (水分を含む) で代表

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (2/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
7	火山 (堆積) × 降水 (堆積)	d(I)	安全施設は、火山または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、建屋等に火山灰が堆積している状態で雨水が染み込むことにより荷重増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.5 (水分を含む) で代表
8	竜巻 (飛来物) × 地震 (地震荷重)	d(II)	安全施設は、 竜巻または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。 仮に、地震により竜巻対策である固縛器具が破損した場合に、 事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →固縛器具が破損した場合は、安全上支障の無い期間で復旧するものとする。
9	低温 (凍結) × 地震 (地震荷重)	d(II)	安全施設は、 低温または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。 仮に、地震により常用系空調が破損した場合に、 事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →常用系空調が破損する規模の地震が発生した場合には、プラントは自動停止している可能性が極めて高く、また自動停止しない場合も低温影響については進展が緩やかであることからスクリーニングアウト。
10	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 地震 (地震荷重)	d(II)	安全施設は、 落雷または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。 仮に、地震により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、 事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →避雷鉄塔が破損する規模の地震が発生した場合には、プラントは自動停止している可能性が極めて高いことからスクリーニングアウト。また、避雷鉄塔に期待しない場合の落雷による影響評価についても実施し、問題ないことを確認した。(添付資料 16)
11	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 風 (風圧)	d(II)	安全施設は、落雷または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、風の影響等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.10 で代表

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (3/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
12	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 竜巻 (飛来物等)	d(Ⅱ)	安全施設は、落雷または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、竜巻の飛来物等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.10 で代表
13	落雷 (雷サージ&誘導電流) × 津波 (波力等)	d(Ⅱ)	安全施設は、落雷または津波が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、津波の波力等により避雷鉄塔が損壊した場合に雷撃電流値が増加する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →No.10 で代表
14	地下水 (浸水) × 地震 (地震荷重)	c(Ⅱ)	安全施設は、地下水または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地震荷重により排水設備が損壊した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
15	地下水 (浸水) × 降水 (浸水)	c(Ⅲ-1)	安全施設は、地下水または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、雨水により地下水量が増加した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
16	積雪 (相間短絡) × 降水 (堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、 積雪または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降水により雪が湿った場合、相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから積雪・降水の影響は受けないため、対応可能。

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (4/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
17	積雪(相間短絡)×火山(相間短絡)	d(I)	安全施設は、積雪または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、火山灰と積雪が同時期に堆積した等で相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから積雪・火山灰の影響は受けないため、対応可能。
18	火山(相間短絡)×降水(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、火山または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、降水により火山灰が湿った場合、相間短絡の可能性が高まり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →相間短絡が発生したとしても外部電源喪失であり、非常用ディーゼル発電機が建屋内施設であることから火山灰・降水の影響は受けないため、対応可能。
19	積雪(空調)×火山(空調)	d(I)	安全施設は、積雪または火山が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、積雪と火山灰が同時期に堆積した場合、空調への影響が増長し、事象個別での評価から増長する影響が考えられることから、影響評価を実施する。 →堆積高さで厳しいのは、主事象が積雪(設計基準 167cm)、副事象が火山(VEI4 3cm)の組み合わせ(合計 170cm)となるが、その場合も空調給排気口(一番低い箇所の地上高 2.8m)まで達しない。
20	地滑り(衝突)×積雪(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地滑りまたは積雪が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、雪が堆積した状態で地滑りが発生した場合、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑りの規模が増加することが考えられるが、周辺斜面と建屋については、十分の裕度を持った離隔距離が保たれている。
21	地滑り(衝突)×降水(堆積)	d(Ⅲ-1)	安全施設は、地滑りまたは降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、地滑りが発生した際に雨水で地面が湿っている場合、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →地滑り×積雪と同様

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (5/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
22	火山 (堆積) × 降水 (堆積)	d(III-2)	<p>安全施設は、火山または降水が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。火山灰が雨水により湿ることで地滑りのような状況が発生する可能性があり、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。</p> <p>→地滑り評価で代表する。</p>
23	低温 (凍結) × 風 (風圧)	c(III-1)	<p>安全施設は、低温または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、低温状態で風が発生した場合に熱伝達の変化が想定され、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。</p> <p>→低温 (単独) の評価条件において風速は 15m/s (淡水貯水池は 3.1m/s) を仮定し、24 時間の影響評価を実施している。対して年超過確率 10^{-2} の規模は、最大風速 (10 分間平均) で新潟市 27.9m/s, 上越市 19.5m/s となるが、以下の理由で低温 (単独) の評価条件で十分包絡されるものとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・台風を除いて、低温 (単独) の評価条件を超えるような風が長期間継続することは考えにくい。 ・台風については、発生時期が 6~10 月に集中することから低温が重畳する可能性は小さい。 ・低温 (単独) の風速以外の評価条件において土からの放熱に期待しない等の保守性を有している。 ・淡水貯水池については、低温 (単独) の評価条件と年超過確率 10^{-2} の規模との差が大きいものの、凍った場合も代替設備により対応可能。
24	火災・爆発 (熱影響等) × 風 (風圧)	c(III-1)	<p>安全施設は、火災・爆発または風が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、火災発生時に風が発生した場合に風速・風向による火災熱影響の評価条件の変化が想定され、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。</p> <p>→森林火災などではガイドに基づき 16m/s の風速により評価を実施している。年超過確率 10^{-2} の規模は、最大風速 (10 分間平均) で新潟市 27.9m/s, 上越市 19.5m/s となるが、単一の評価条件における保守性 (風向設定, 温度設定, 湿度設定等) や影響継続時間 (長くても数時間程度の火災影響時に最大風速が発生する可能性は小さい) を考慮すると、影響が及ぶ可能性は極めて小さいと考えられる。</p>

表 9 事象の重畳 個別検討対象抽出結果 (6/6)

(太字は重畳の結果を個別に評価するもの)

No.	重畳事象 (事象①×事象②)	影響パターン (増長パターン)	検討結果
25	風 (風圧) × 竜巻 (風圧等)	c(I)	安全施設は、風または竜巻が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、台風等により気圧分布が形成されている状況で竜巻が発生した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →設計竜巻設定の際に使用している観測データは、風の影響についても含んだデータとなっていることから竜巻評価に包絡されている、もしくは設計竜巻設定の際の余裕に包絡されているものと考えられる。
26	溢水 (被水・没水) × 地震 (地震荷重)	c(III-1)	安全施設は、溢水または地震が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、溢水対策等が地震により損傷した場合に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →内部溢水において評価
27	取水口閉塞関係 例：風×生物学的事象 (くらげ等)	d(I)	安全施設は、生物学的事象等が個別に発生した場合に安全機能が喪失しないことを確認している。仮に、台風等で飛散物が発生した際に同時期にくらげが発生した場合等に、事象個別での評価から増長する影響が考えられる。 →事象単独の場合と比較して、作業量が増加する恐れがあるが、除塵装置や既に整備された手順等と同様の対応により対処可能である。

1.4.1 アクセス性・視認性について

自然現象及び人為事象が安全施設に及ぼす影響としては、荷重だけでなく、アクセス性及び視認性に対する影響も考えられることから、これらの観点についても影響を評価する。

アクセス性及び視認性の観点からの影響評価結果を以下に示す。

アクセス性への影響確認結果

設計基準においては、屋内設備と屋内での対応により事象収束が可能であることから、自然現象による屋外のアクセス性への影響については基本的には考慮する必要が無い。ただし、設計基準においても積雪の設計基準を設定する際に建屋屋上等の除雪に期待しており、除雪の際には屋外アクセスルートを使用することから、積雪については考慮する必要がある。アクセス性に支障が出るような規模の積雪については気象予報により事前の予測が可能であることから、積雪状況等を見計らいながら除雪するという対応となる。

これらの影響及び対応については、重大事故時と差異が無いことから、以下に第四十三条での検討結果（積雪以外を含む）をまとめたものを示す。

アクセス性への影響として、保管場所の耐性、作業環境、アクセスルート（屋外/屋内）が考えられることから成立性について確認し、表 10 のような影響が存在することが確認された。事象の重畳を考慮した場合も、作業量や作業時間の増加が考えられるが、作業不能となることは考えにくく、また気象予報等により作業が困難なレベルの強風等が想定される場合はプラントを停止する等の対応も考えられる。

表 10 アクセス性についての影響及び対応

対象	事象	影響	対応
保管場所の耐性	地滑り	高台に保管している重大事故等対処設備が機能喪失	2箇所の高台に分散配置，設計基準事故対処設備により対応
	積雪，火山	重大事故等対処設備上に雪または火山灰の堆積	除雪または除灰（湿潤状態を想定した除灰体制）
	風（台風を含む），竜巻	飛散物の発生	飛散物除去
作業環境	地震	段差等の発生	整地作業の実施
	積雪，火山	雪または火山灰の堆積	除雪または除灰
	風（台風を含む）	屋外での作業が困難なレベルの強風	気象予報により，左記のようなレベルの強風が想定される場合はプラント停止
	落雷	落雷	警報発生時を避け対応
	低温	低温	暖機運転等
アクセスルート	地震，津波，風（台風含む），竜巻，地滑り，森林火災	段差や瓦礫の発生により，一部のアクセスルートが通行不能	別ルートによりアクセス可能。 また瓦礫等については，ホイールローダー等の重機により整地作業も実施可能。
	風（台風含む）	屋外での作業が困難なレベルの強風	気象予報により，左記のようなレベルの強風が想定される場合はプラント停止。
	降水	敷地内の浸水	構内排水路で海域へ排水するために影響なし。 万一，排水能力を超える場合も，排水用フラップゲートを介して海域へ排水されることから，緊急車両はアクセス可能。 また，気象予報を踏まえ，可搬型設備の通行に支障がある状況が予想される場合は，予め土のう設置による降水の導水対策などにより車両等の通行ルートを確保する。
	低温	低温	気象予報により事前の予測が十分可能なことからアクセスルートへの融雪剤散布が実施可能。
	積雪，火山	雪または火山灰の堆積	除雪または除灰

視認性評価結果

視認性の観点からは、降水等により中央制御室外の状況や津波を監視するカメラの視認性の低下、及び屋外作業の視認性の低下を及ぼす可能性がある。

中央制御室外の状況や津波を監視するカメラについては、降水等による視認性の低下や、竜巻等による機能喪失の可能性がある。カメラは位置的分散が図られているものの、重畳を考慮した場合にはすべてのカメラに期待できない状況も考えられる。その場合にも、中央制御室に設置する気象情報を出力する端末、潮位計等の代替設備により必要な機能を確保することができる。

また、降水や霧・靄などによって屋外作業等の視認性が低下する恐れがあるが、その場合も作業時間増加や作業効率が悪化するものの作業不能となることは考えにくい。

柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉

竜巻影響評価について

目次

別添 2-1

1. 竜巻に対する防護
 - 1.1. 概要
 - 1.2. 竜巻影響評価の対象施設
 - 1.3. 評価の基本的な考え方
2. 基準竜巻・設計竜巻の設定
 - 2.1. 概要
 - 2.2. 竜巻検討地域の設定
 - 2.3. 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定
 - 2.4. 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定
 - 2.5. 設計竜巻の特性値
3. 竜巻影響評価
 - 3.1. 評価概要
 - 3.2. 評価対象施設
 - 3.3. 設計荷重の設定
 - 3.4. 評価対象施設の設計方針
 - 3.5. 竜巻随伴事象に対する評価

添付資料

- 1.1. 重大事故等対処施設に対する考慮について
- 1.2. 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出について
- 1.3. 耐震 S クラス設備について
- 1.4. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出について
- 2.1. 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について
- 2.2. 竜巻検討地域において発生した竜巻
- 2.3. 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
- 2.4. 地形効果による竜巻風速への影響について
- 2.5. 設計竜巻の特性値の設定
- 3.1. 竜巻影響評価の概要及び保守性について
- 3.2. 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 3.3. 設計飛来物の選定について
- 3.4. 竜巻随伴事象の抽出について

1. 竜巻に対する防護

1.1. 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下、「設置許可基準規則」という。）」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならずとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随件事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを評価・確認するために原子力規制委員会の定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日原規技発13061911号 原子力規制委員会決定）」（以下、「ガイド」という。）を参照し、竜巻影響評価として以下を実施し、発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。

- ・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）の設定
- ・柏崎刈羽原子力発電所における飛来物に係る調査
- ・飛来物防止対策
- ・考慮すべき設計荷重に対する竜巻防護施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

また、第43条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準事故対処設備の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認する。【添付資料－1.1】

1.2. 竜巻影響評価の対象施設

竜巻影響評価の対象施設としては、以下の「(1) 竜巻防護施設のうち評価対象施設」及び「(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設」に示す施設を竜巻影響評価の対象施設とする。

また、竜巻に対する防護設計を行う、竜巻防護施設のうち評価対象施設、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設を「評価対象施設等」という。

(1) 竜巻防護施設のうち評価対象施設【添付資料－1.2】

設置許可基準規則第6条における安全施設とは、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1, 2及び3に該当する構築物、系統及び機器（以下、「安全重要度クラス1, 2, 3に属する構築物、系統及び機器」という。）を指していることから、竜巻防護施設としては、安全重要度クラス1, 2, 3に属する構築物、系統及び機器とする。

また、以下の点を踏まえ、竜巻防護施設のうち、外部事象防護対象施設は、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器（原子炉停止、炉心冷却、使用済燃料プール冷却を維持するために必要な異常の発生防止の機能、若しくは異常の影響緩和機能を有する設備）又はそれを内包する建屋とする。

- ・ 竜巻襲来後に設備等の損壊状況を踏まえ、必要に応じプラント停止の措置をとること
- ・ プラント停止後は、その状態を維持することが重要であること

その上で、本評価における評価対象施設は、外部事象防護対象施設のうち、屋内設備は内包する建屋により防護する設計とすることから、屋外設備（建屋含む）、外気との接続がある設備及び外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備に分類し、抽出した。また、外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備については、建屋、構築物の構造健全性の確認結果より、設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から、設備を抽出する。

なお、上記以外の安全施設については、竜巻及びその随件事象に対して機能維持すること、竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、若しくは、安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な場合には、安全機能を損なわないことから評価完了とする。

図 1.2.1 に竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フローを、図 1.2.2 に評価対象施設を示す。

また、上記の抽出に加え、「基準地震動および耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統、機器）及び建屋・構築物のうち、竜巻の影響を受ける可能性がある設備を抽出し、追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。【添付資料-1.3】

（屋外設備）

- ・ 軽油タンク
- ・ 非常用ディーゼル発電機燃料移送系
- ・ 原子炉建屋
- ・ タービン建屋 海水熱交換器区域
- ・ コントロール建屋
- ・ 廃棄物処理建屋

（外気との接続がある設備）

- ・ 非常用ディーゼル発電機吸気系
- ・ 非常用ディーゼル発電機非常用送風機
- ・ 換気空調系（ディーゼル発電機電気区域換気空調系，中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御・電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空

調系)

(外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備)

- ・原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備 (非常用ディーゼル発電機, 非常用ディーゼル発電機ディーゼル機関, 非常用ディーゼル発電機始動用空気系, 非常用ディーゼル発電機冷却水系)
- ・原子炉建屋 4 階設置設備 (使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む))
- ・タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 非常用電気品室 (A) 設置設備 (パワーセンタ, モータコントロールセンタ)
- ・タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 階段室等設置設備 (原子炉補機冷却系配管, 原子炉補機冷却海水系配管)

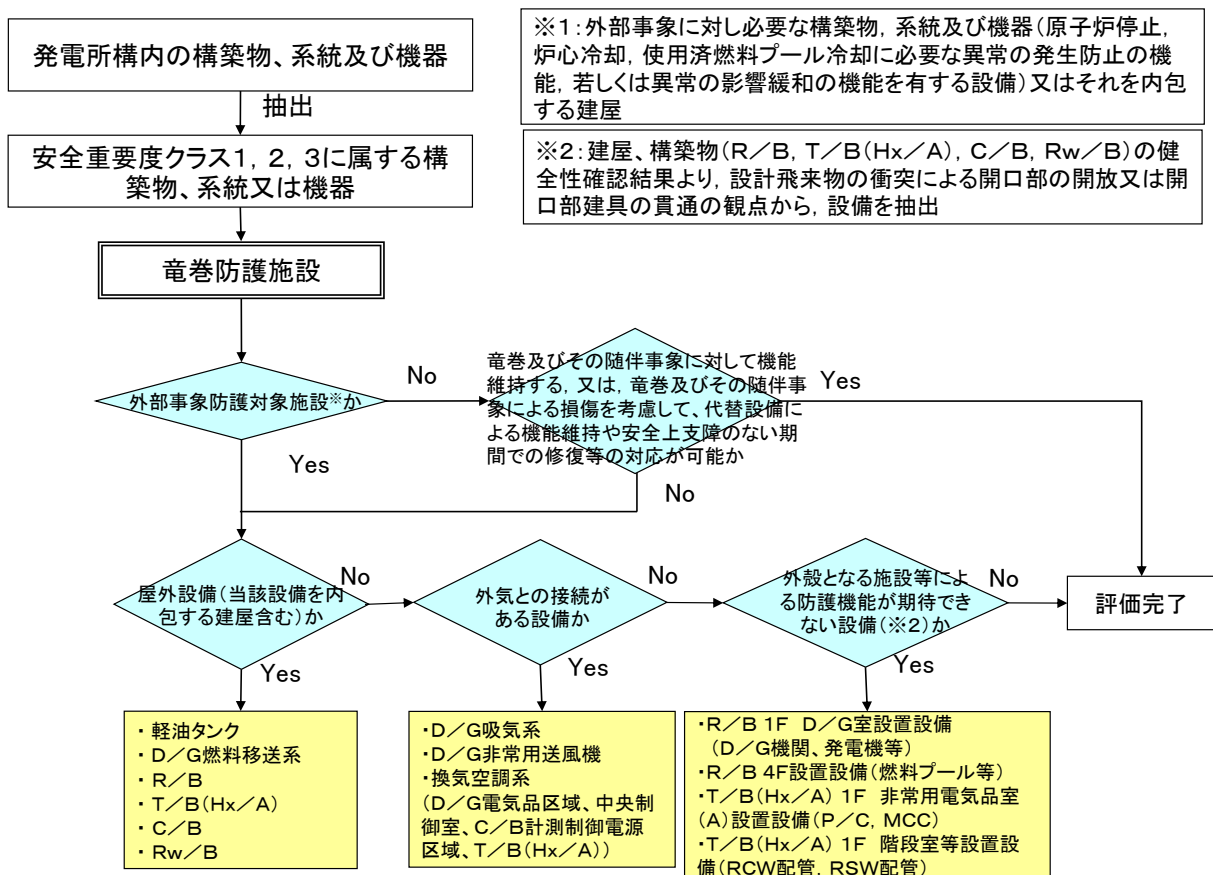


図 1.2.1 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

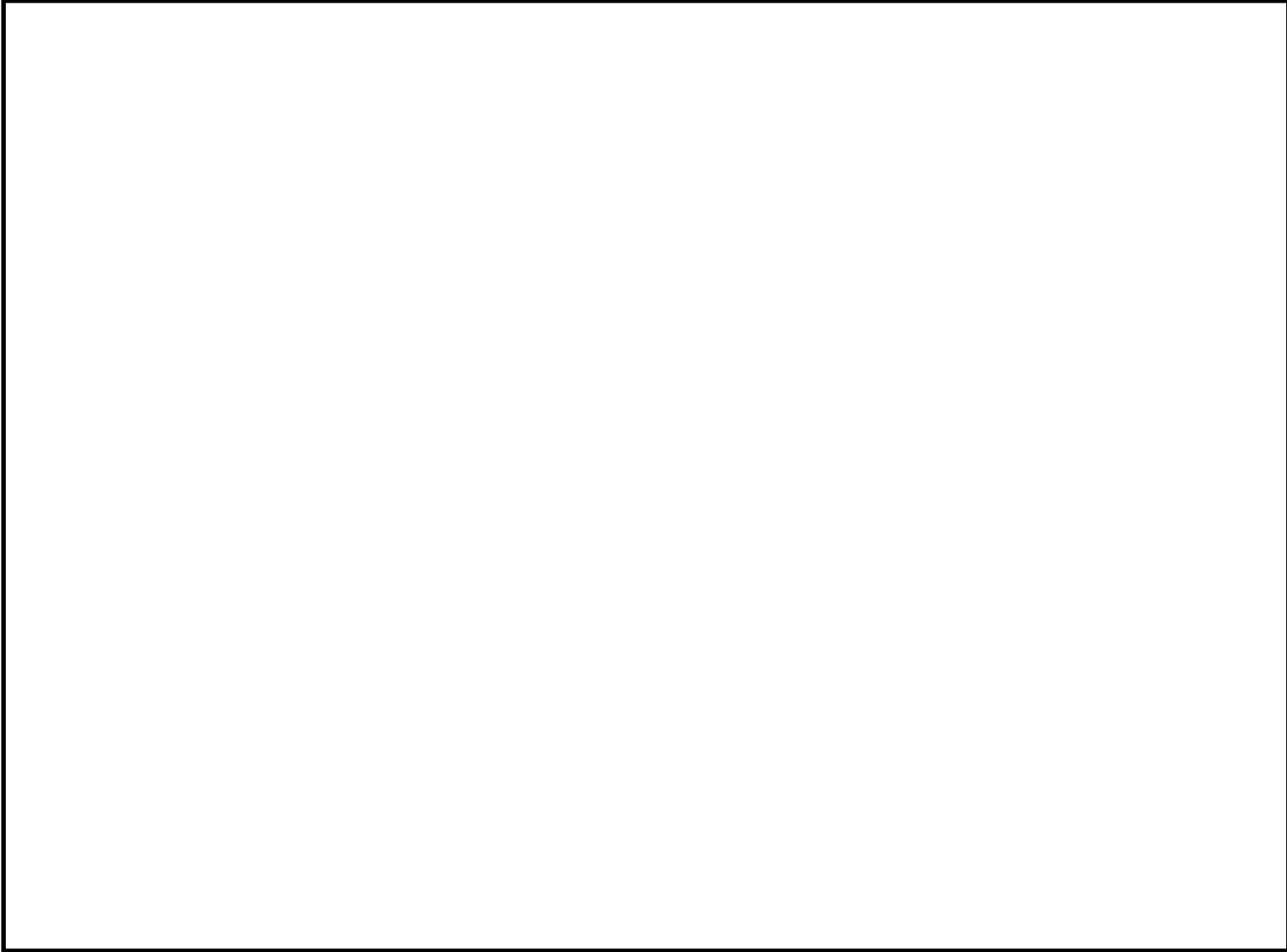


図 1.2.2 竜巻防護施設のうち評価対象施設

(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設【添付資料-1.4】

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては、当該施設の破損等により外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設、またはその施設の特定の区画とする。

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては、発電所構内の構築物、系統及び機器（安全重要度クラス1, 2, 3及びノンクラス）の中から、以下の①, ②及び③に示す施設を抽出する。

図1.2.3に竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを、図1.2.4に評価対象施設を示す。

① 機械的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、倒壊により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出し、評価する。

- ・主排気筒
- ・5号炉主排気筒（6号炉への影響）
- ・5号炉タービン建屋
- ・サービス建屋（6・7号炉共通施設）
- ・原子炉建屋天井クレーン（自号炉への影響）
- ・燃料交換機（自号炉への影響）

② 機能的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備として、以下を抽出し、評価を実施する。

- ・非常用ディーゼル発電機排気管
- ・非常用ディーゼル発電機排気消音器
- ・ミスト管（燃料ディタンク、非常用ディーゼル発電機機関本体、潤滑油補給タンク、燃料ドレンタンク）

③ 二次的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、二次的影響の観点から、竜巻随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出し、評価を実施する。

- ・溢水により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性のある設備（純水タンク、ろ過水タンク、NSD収集タンク、苛性ソーダ貯槽、硫酸貯槽）
- ・火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備（変圧器、5号炉軽油タンク、第一ガスタービン発電機用燃料タンク）

ク)
・外部電源

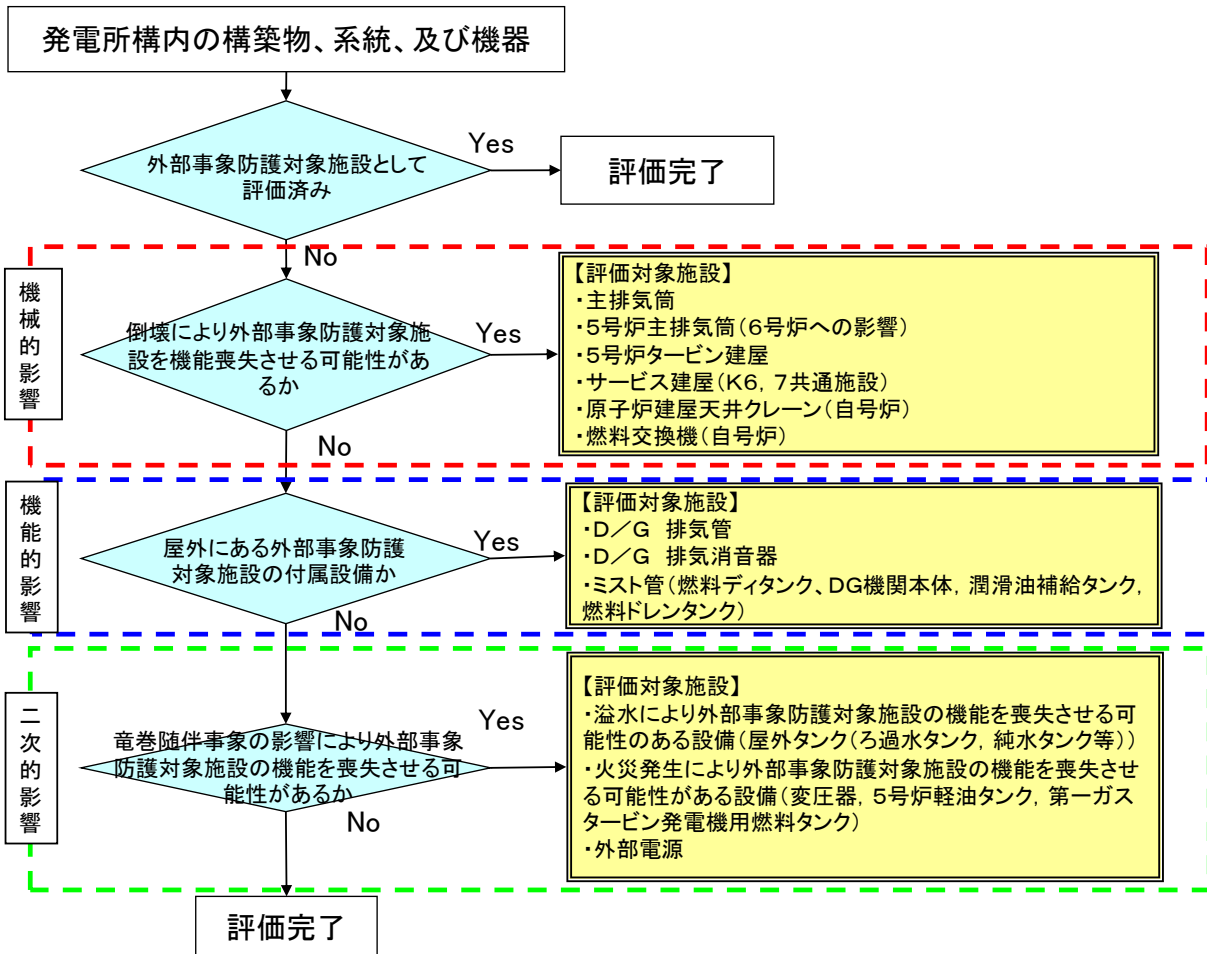


図 1. 2. 3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

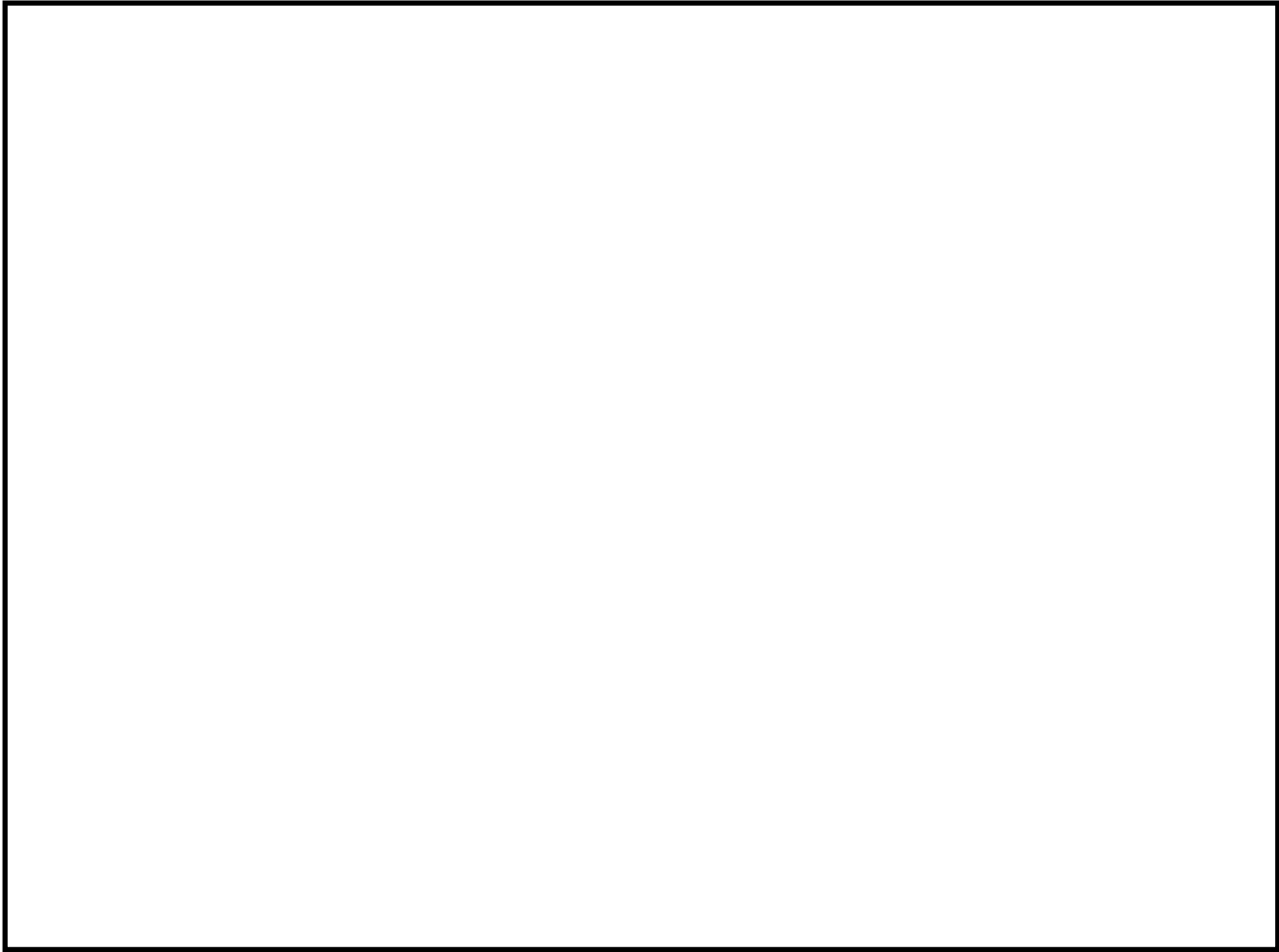


図 1.2.4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

1.3. 評価の基本的な考え方

1.3.1. 評価の基本フロー

ガイドに基づき基準竜巻，設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに，考慮すべき設計荷重に対して，抽出した評価対象施設等の構造健全性評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されていることの確認を行う。図1.3.1.1に竜巻影響評価の基本フローを示す。

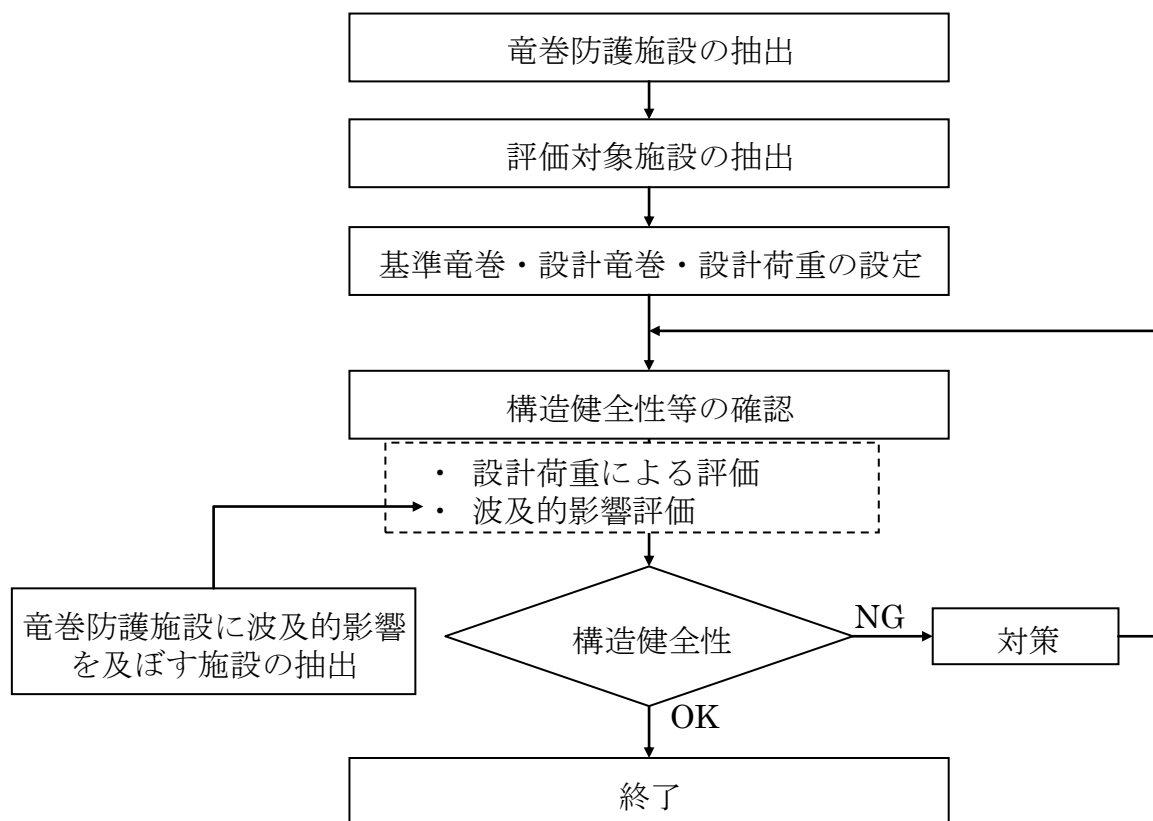


図 1.3.1.1 竜巻影響評価の基本フロー

1.3.2. 評価対象施設等に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

(1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

①風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

②気圧差による圧力

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力

③飛来物の衝撃荷重

設計竜巻によって評価対象施設等に衝突し得る飛来物（以下、「設計飛来物」という。）が評価対象施設等に衝突する際の衝撃荷重

(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

①評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重等

②竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等

なお，上記（2）の②の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，上記（2）の①の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。

具体的な荷重については，「3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定」に示す。

1.3.3. 施設の安全性の確認方針

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重，竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して，評価対象施設，あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることを確認する。

2. 基準竜巻・設計竜巻の設定

2.1. 概要

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、図2.1.1に示す通り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。

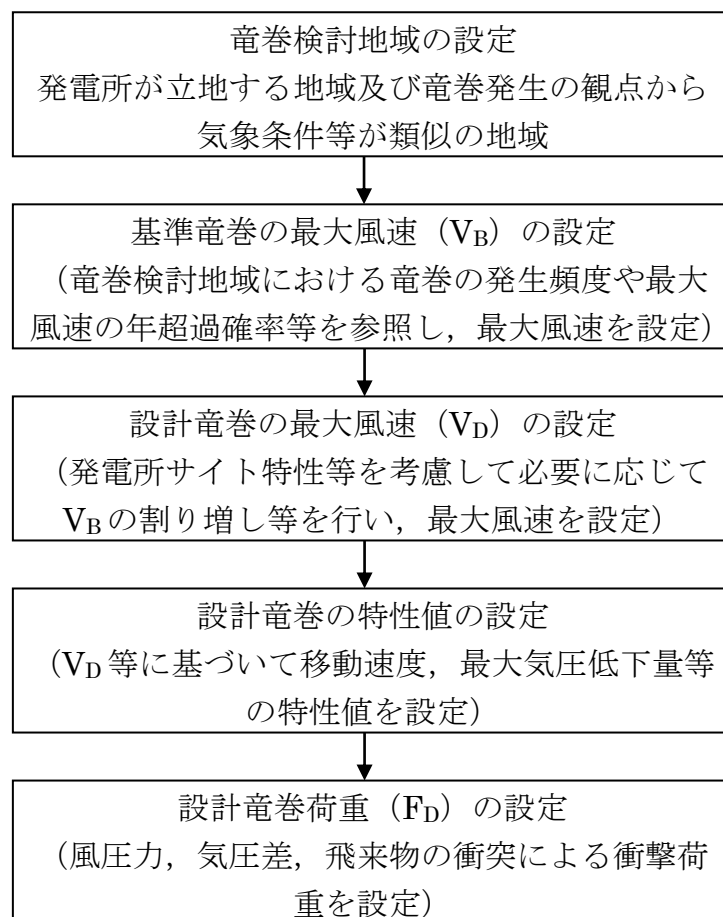


図2.1.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

2.2. 竜巻検討地域の設定

柏崎刈羽原子力発電所に対する竜巻検討地域について、ガイドを参考に、発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、図 2.2.1 に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約 33,395km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。



図2.2.1 竜巻検討地域（赤線部）

2.2.1. 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

- (1) 総観場の分析に基づく地域特性の検討
- (2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の検討

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」の考え方にに基づき、竜巻発生要因となる気象条件（総観場）を確認する観点から、(1)、(2)の分析により地域特性を確認し、竜巻検討地域を設定した。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さを把握する観点から、(3)の分析により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを図 2.2.1.1 に、検討の流れを示したフローを図 2.2.1.2 に示す。

なお、(3)の突風関連指数を用いた分析は、“大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件”を把握する上で有効であることを踏まえ、(3)の分析結果のみで竜巻検討地域

を設定するのではなく，(1)，(2)の分析により設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために用いている。

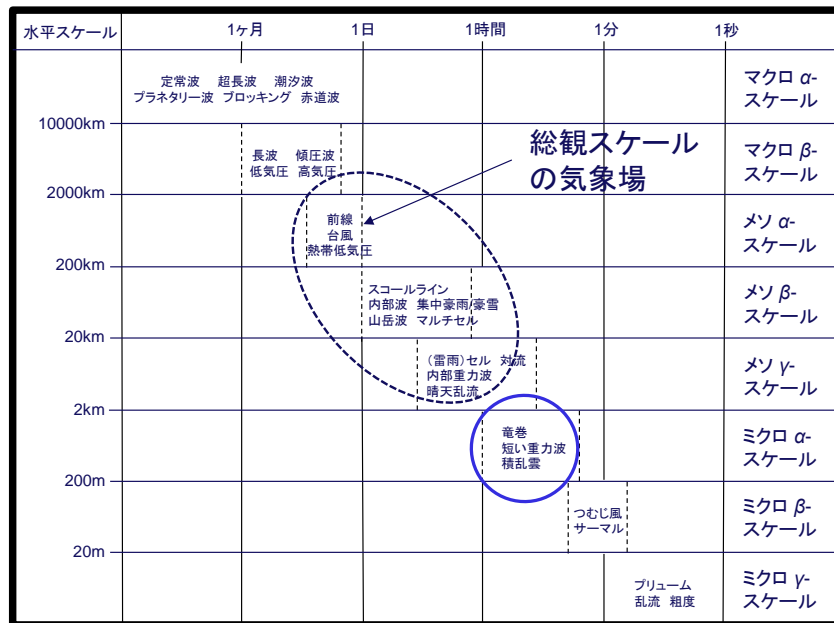


図 2. 2. 1. 1 竜巻とその関連気象の時空間スケール

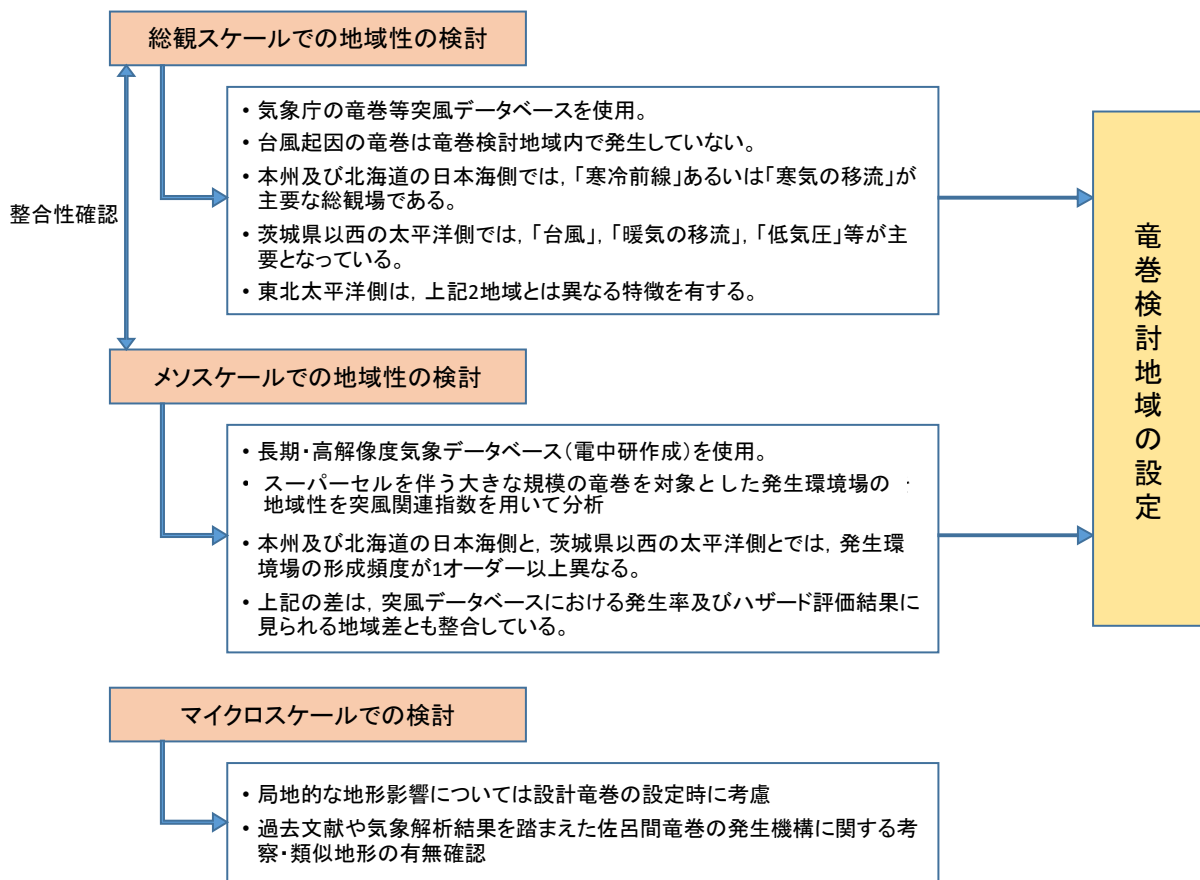


図 2. 2. 1. 2 竜巻検討地域の検討フロー

2.2.2. 総観場の分析に基づく地域特性の検討

気象庁竜巻データベース[※]では、竜巻を発生させた総観場を約40種に分類しているが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して7種に再編し、発生分布の特徴を分析した。表2.2.2.1に総観場の分類法と発生分布の特徴を示す。また、図2.2.2.1に総観場ごとの竜巻発生地点の分布、図2.2.2.2にF2以上の竜巻発生箇所を示す。

分析の結果、竜巻発生要因となる気象条件の観点で、以下のような地域特性があることを確認した。

- ① 太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し、九州を除く日本海側地域や北海道では発生していない。(図2.2.2.1(a))
また、台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有していることから、仮に台風起因の竜巻の発生した場合も、規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。
- ② 温帯低気圧や季節風(夏)起因の竜巻は全国で発生しているが、規模的には太平洋側でF3が発生しているのに対し、日本海側ではF2が最大となっている。(図2.2.2.1(b), (c))
- ③ 季節風(冬)起因の竜巻は、九州を除く日本海側地域に多く発生している。規模的には、東北地方の日本海側及び北陸地方ではF2竜巻が1件発生しているのみで、F3竜巻は発生していない。(図2.2.2.1(d))

図2.2.2.3にも示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる気象条件(総観場)が大きく異なっており、竜巻検討地域を日本海側とすることの妥当性が確認できた。

※：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>)

表 2.2.2.1 総観場の分類法

総観場	気象庁 DB の分類	特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲が竜巻を発生させる。 関東以西の太平洋側で発生頻度が高く、F3 竜巻も多くみられる。
温帯低気圧	南岸低気圧, 日本海低気圧, 二つ玉低 気圧, 東シナ海低気圧, オホーツク海 低気圧, その他(低気圧), 寒冷前線, 温暖前線, 閉塞前線	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織 的な雲が形成する環境場。主に南からの下 層の暖湿流が親雲の発達に重要な働きを するため, 暖湿流が山岳等で遮られない関 東以西の太平洋側で発生頻度が高く, F3 竜巻も見られる。 日本海側での頻度は比較的low。
季節風(夏)	暖気の移流, 熱帯低気圧, 湿舌, 太平 洋高気圧	暖湿流が主要因で親雲を形成する環境場。 関東以西の太平洋側や内陸で多く確認さ れている。
季節風(冬)	寒気の移流, 気圧の谷, 大陸高気圧, 季節風	大気上層に寒気が流入することで大気が 不安定になり, 竜巻の親雲が形成する環境 場。寒気は北～西から移流することが多い ため, 日本海側や関東以北で発生頻度が高 い。
停滞前線	停滞前線, 梅雨前線, 前線帯, 不安定 線, その他(前線)	南からの暖湿流により親雲が形成されや すく, 関東以西の太平洋側や内陸で発生頻 度が高い。
局地性	局地性擾乱, 雷雨(熱雷), 雷雨(熱雷 を除く), 地形効果, 局地性降水	局地的な循環により親雲が形成する環境 場。内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧, 中緯度高気圧, オホー ツク海高気圧, 帯状高気圧, その他(高 気圧), 大循環異常, その他	上記に当てはまらない環境場。全体的に個 数は少ない。

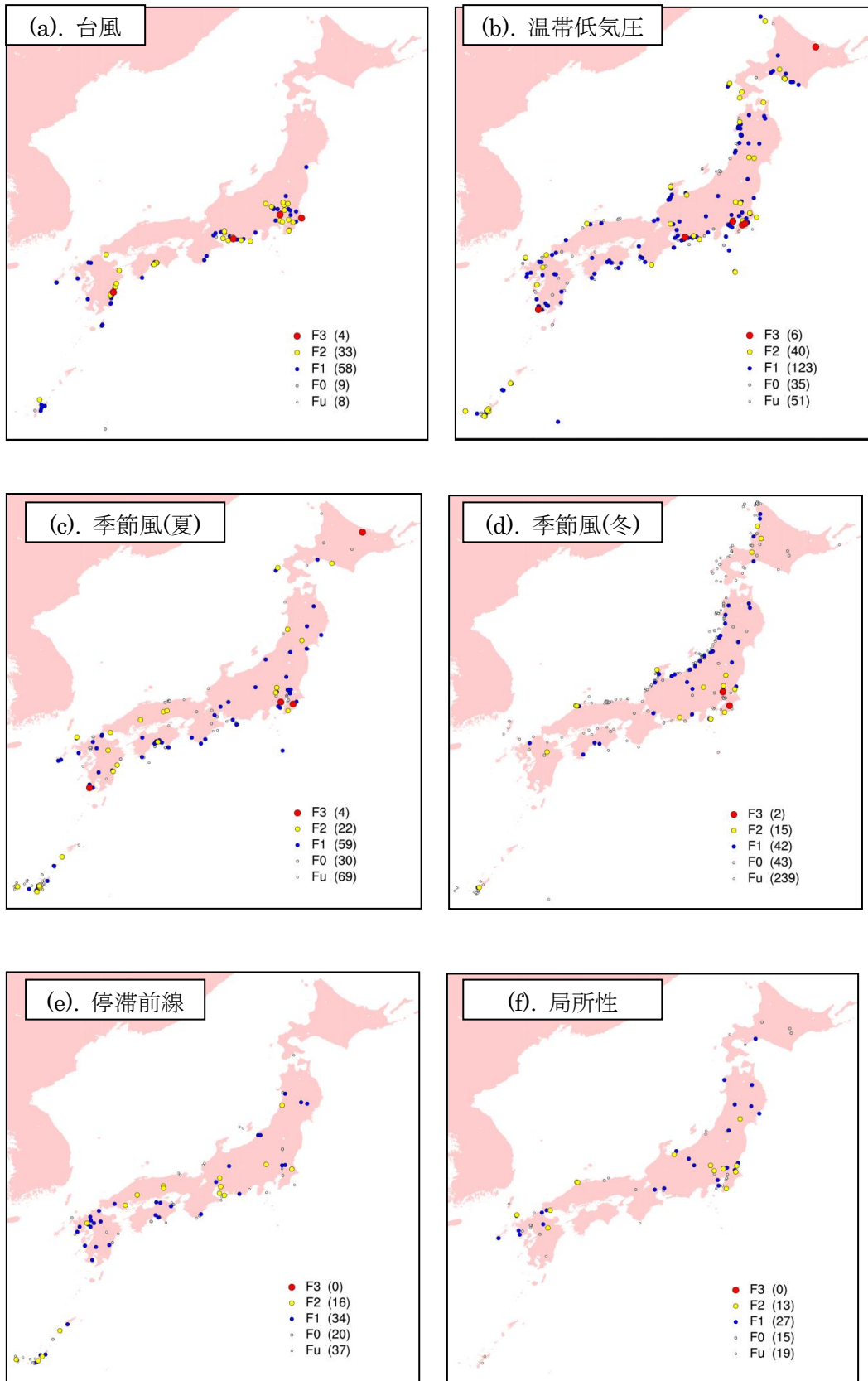


図 2.2.2.1 総観場ごとの竜巻発生地点の分布(1961年～2012年)
(気象庁竜巻データベースのデータをもとに作成)

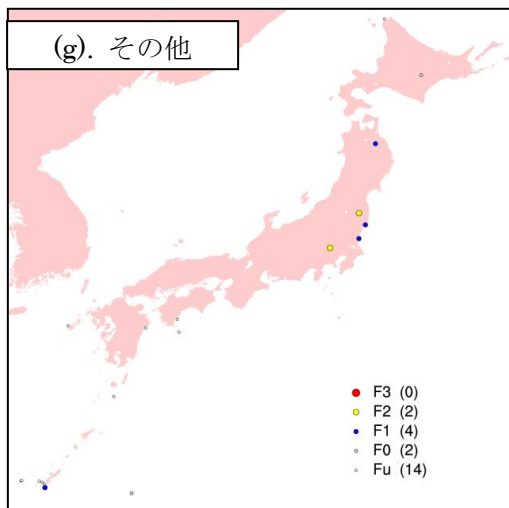


図 2.2.2.1(続き) 総観場ごとのスケール別竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)
(気象庁竜巻データベースのデータをもとに作成)

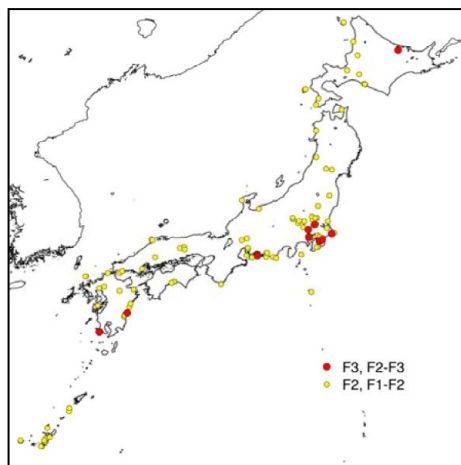
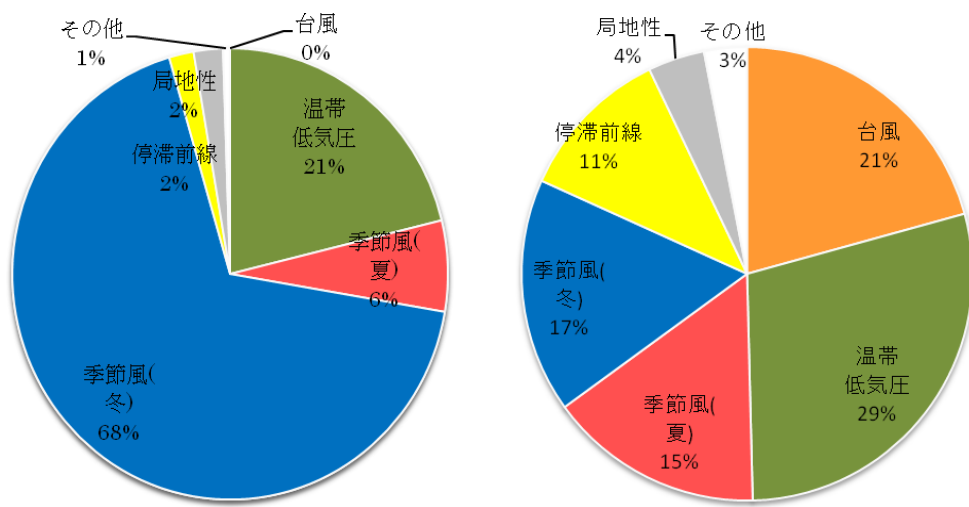


図 2.2.2.2 F2以上の竜巻発生箇所
(気象庁竜巻データベースのデータをもとに作成)



竜巻検討地域 (日本海沿岸)

太平洋側地域

図 2.2.2.3 竜巻の総観場の特徴の比較

2.2.3. 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討

日本で竜巻が集中する地域については、独立行政法人原子力安全基盤機構の「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に、全国 19 個の竜巻集中地域が示されている。

図 2.2.3.1 に示す通り、柏崎刈羽原子力発電所は、竜巻集中地域④（新潟県（佐渡島含む）・富山県）に立地している。従って、基本的な考え方としては柏崎刈羽原子力発電所における竜巻検討地域は、この竜巻集中地域④とすることが考えられる。

ただし、気象庁竜巻データベースによると、1961 年 1 月から 2012 年 6 月の 51.5 年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域④で 45 事例であり、この期間に④で観測されているもっとも強い竜巻は F1 となる。（表 2.2.3.1）

竜巻発生の影響評価の観点からすると、データ数は多い方がよく、また竜巻集中地域④以外の日本海沿岸では F2 規模の竜巻も発生しているため、竜巻検討地域として北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定し、その妥当性を検討する。

なお、設定した竜巻検討地域の竜巻個数は 192 個、観測されたもっとも強い竜巻は F2 となる。表 2.2.3.2 に竜巻検討地域内での F1 を超える竜巻の観測記録を示す。

竜巻検討地域と竜巻集中地域④の F1 以上の竜巻発生確率は、 2.9×10^{-5} 、 2.5×10^{-5} （個/年/km²）であることから、竜巻検討地域は単位面積あたりの竜巻発生数が大きくなるよう、かつ藤田スケールが大きな竜巻が含まれるような設定となっている。

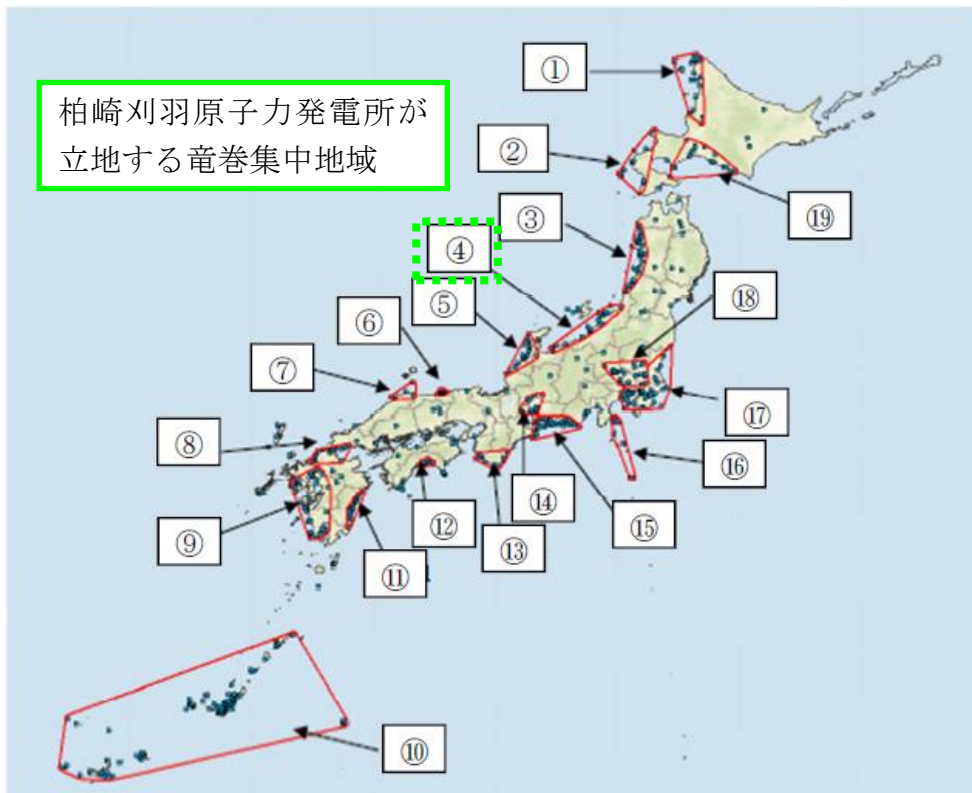


図 2.2.3.1 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 個の地域
(JNES「竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」より引用)

竜巻の地域特性を検討するため、竜巻集中地域④と竜巻検討地域、及び竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③(青森県日本海側から山形県)と⑤(石川県と福井県)における総観場の比較を行った。

図 2.2.3.2 に各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴を示す。また、表 2.2.3.1 に総観場の特徴を示す。

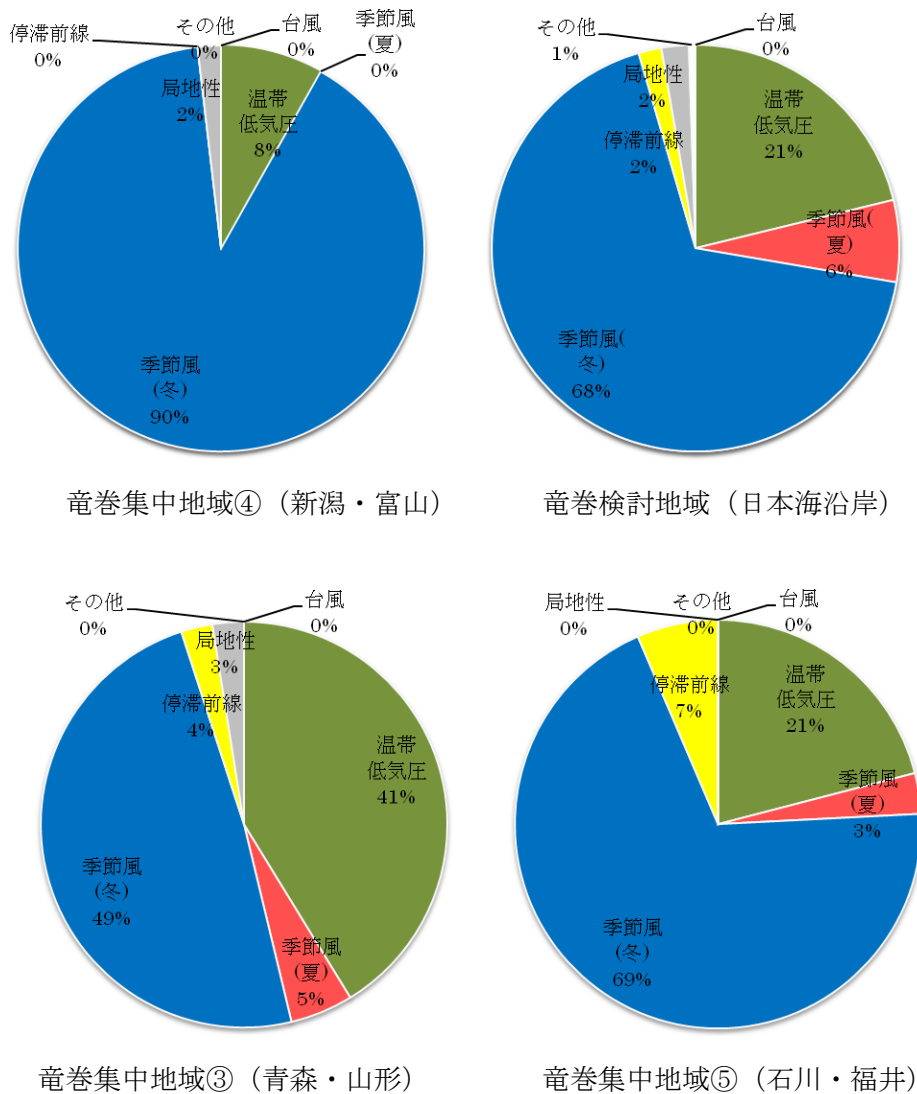


図 2.2.3.2 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

竜巻集中地域④で発生した竜巻の総観場は、“季節風(冬)”が 90%，“温帯低気圧”が 8%を占める。竜巻検討地域では、竜巻集中地域と同様に“季節風(冬)”と“温帯低気圧”の比率が高い。これらの地域では、寒気にもなって発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また、両地域とも、太平洋側で多くみられる台風起源の竜巻は今のところ確認されていない。

また、竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③と⑤については、温帯低気圧の割合は竜巻検討地域④よりもやや高いものの、やはりどちらの地域も“季節風(冬)”と“温帯低気圧”が竜巻発生の主要因となっている。

以上の分析結果より，北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域に設定することは竜巻集中地域における地域特性の観点からも妥当であると考えられる。

表 2.2.3.1 F スケールごとの総観場のまとめ

	個 数	総観場 1 位 (比率%)	総観場 2 位 (比率%)	総観場 3 位 (比率%)	主移動方 向 (比率%)
集 全体	45	季節風(冬) 90%	温帯低気圧 8%	局地性 2%	東 32%
中 F1	7	季節風(冬) 88%	局地性 7%	温帯低気圧 5%	東北東 43%
地 F0	7	季節風(冬) 86%	温帯低気圧 14%		東, 東北東 33%
域 ④ F 不明	31	季節風(冬) 91%	温帯低気圧 8%	局地性 1%	北東 43%
F0 以 上	14	季節風(冬) 87%	温帯低気圧 9%	局地性 4%	東北東 38%
検 全体	192	季節風(冬) 68%	温帯低気圧 21%	季節風(夏) 6%	東 39%
討 F2	10	温帯低気圧 63%	季節風(冬) 23%	局地性 9%	北東 40%
地 F1	40	温帯低気圧 51%	季節風(冬) 42%	局地性 6%	東 35%
域 F0	24	季節風(冬) 65%	温帯低気圧 27%	停滞前線 4%	東 33%
F 不明	118	季節風(冬) 81%	季節風(夏) 9%	温帯低気圧 6%	東 46%
F1 以 上	50	温帯低気圧 54%	季節風(冬) 38%	局地性 6%	東 30%
F0 以 上	74	季節風(冬) 47%	温帯低気圧 45%	局地性 5%	東 31%
集 全体	40	季節風(冬) 49%	温帯低気圧 41%	季節風(夏) 5%	東 36%
中 ③					
集 全体	31	季節風(冬) 69%	温帯低気圧 21%	停滞前線 7%	東 55%
中 ⑤					
太 全体	337	温帯低気圧 29%	台風 21%	季節風(冬) 17%	北東 23%
平 洋					

表2.2.3.2 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1より大きい竜巻)
(気象庁「竜巻等竜巻データベース」より作成)

現象区別	発生日時	発生場所	Fスケール※	総観場
竜巻	1962/09/28 14:20	北海道宗谷支庁 東利尻町	(F2)	寒冷前線
竜巻	1971/10/17 05:00	北海道留萌支庁 羽幌町	(F2)	寒気の移流
竜巻	1974/10/03 19:05	北海道檜山支庁 奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	温暖前線
竜巻	1974/10/20 15:00	北海道檜山支庁 檜山郡上ノ国町	(F1~F2)	寒冷前線
竜巻	1975/05/31 18:10	島根県 簸川郡 大社町	(F2)	日本海低気圧・局地 性じょう乱・寒気 の移流
竜巻	1975/09/08 01:30	北海道檜山支庁 奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	日本海低気圧・暖気 の移流
竜巻	1979/11/02 01:58	北海道渡島支庁 松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧・温暖 前線
竜巻	1989/03/16 19:20	島根県 簸川郡 大社町	(F2)	局地性じょう乱・寒 気の移流
竜巻	1990/04/06 02:55	石川県 羽咋郡 富来町	F2	オホーツク海低気 圧・気圧の谷
竜巻	1999/11/25 15:40	秋田県 八森町	(F1~F2)	日本海低気圧・寒冷 前線

※：Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したものがあり、F2以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。

2.2.4. 突風関連指数による地域特性の検討

総観場での検討に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さについての地域特性を検討するため、気象庁や米国気象局における現業においても竜巻探知・予測に活用されており、竜巻の発生しやすさを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の検討を行った。なお、突風関連指数を用いての検討については日本海側と太平洋側の地域性が異なることを示すために実施し、特定規模の竜巻発生の可能性を評価するものではない。

2.2.4.1. 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。もう一つは「スーパーセル」と呼ばれる、回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダーによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に、竜巻発生予測について、突風関連指数を適用している例を示す。

気象庁での突風関連指数の適用状況

気象庁では平成20年3月から、低気圧の発達等に関して半日から1日程度前に発表する予告的な気象情報において、11種類の突風関連指数を算出し、竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があるると予測される場合には、当気象情報において注意喚起することとした。

その後、気象庁では竜巻等の突風の予測プロダクトとして、平成22年5月より竜巻発生確度ナウキャスト情報の提供を開始した。竜巻発生確度ナウキャストは、「竜巻が今にも発生する（または発生している）可能性の程度」（発生確度）を10分毎に解析した結果をもとに、降水域の移動ベクトル等を用いて1時間先まで発生確度を予測する。発生確度の解析は、以下の二つの技術を組み合わせて実施している。

- ・気象ドップラーレーダ観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術
- ・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを図2.2.4.1.1に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことが主目的のため、レーダプロダクトに重みを置いている。また、小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

以上のように、気象庁では竜巻の監視や様々なリードタイムに対する予測に突風関連指数を活用している。

海外での突風関連指数の適用状況

海外では、米国の気象庁にあたる NOAA の SPC (ストーム予測センター) においても気象庁と同様に、突風関連指数の情報とレーダー観測のデータが現業で活用されており、突風関連指数に関する検討も盛んに行われている。

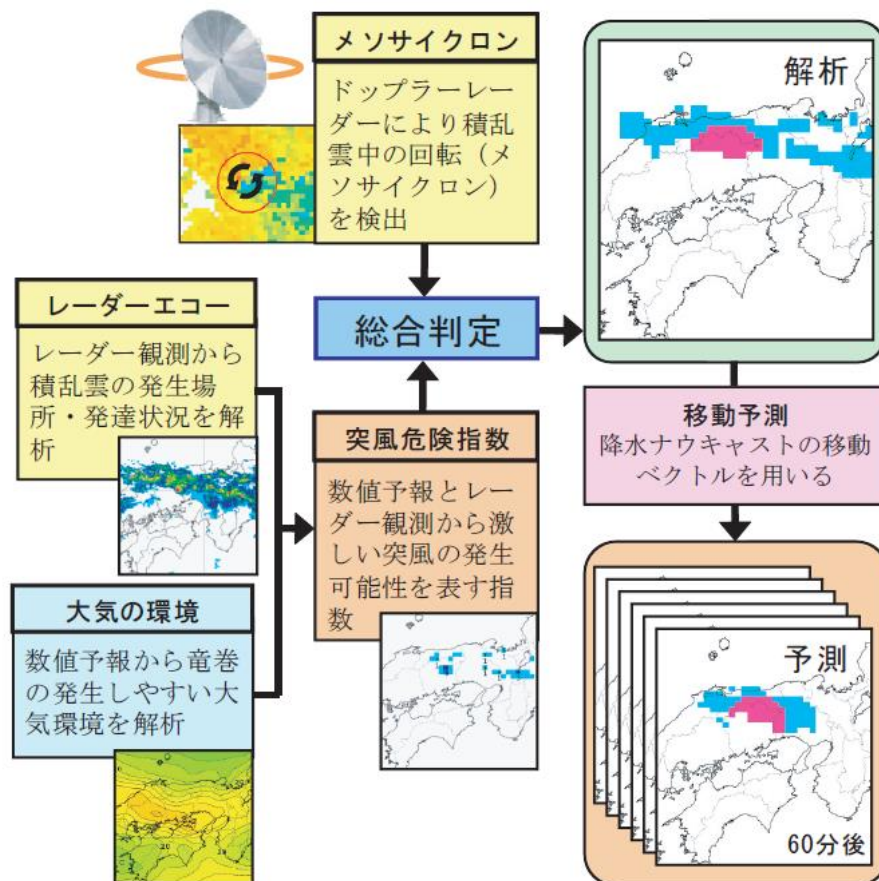


図 2.2.4.1.1 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

2.2.4.2. 検討に用いる突風関連指数について

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり、スーパーセルの発生環境は予測できる技術があつて気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは、本検討に用いる突風関連指数について説明する。

図 2.2.4.2.1 に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア(異なる高度間での風向・風速差)と、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気不安定度を表す指標として、「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度につ

いて、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である EHI による分析も行い、SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

SReH, CAPE 及びその複合指数である EHI について以下に説明する。



風向・風速差による渦の発生

上昇気流の発生

竜巻の発生

図 2.2.4.2.1 竜巻の発生メカニズム

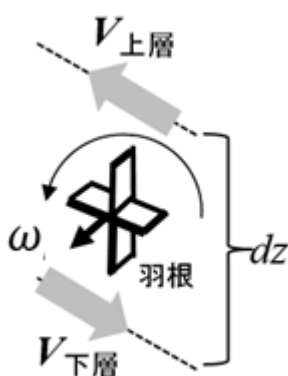
(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ)

風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し、値が大きいほど、積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。(図 2.2.4.2.2)

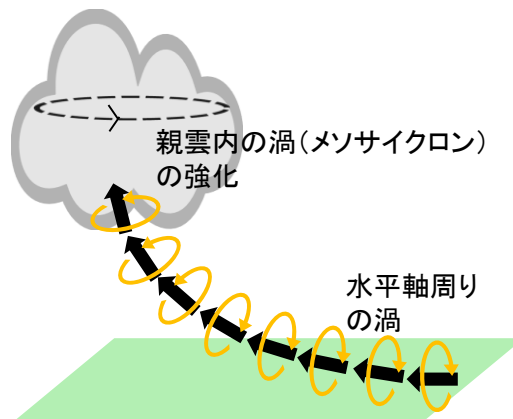
$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3\text{km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

V : 水平風速ベクトル C : ストームの移動速度

ω : 鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図



水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

図 2.2.4.2.2 SReH の算出概念

(2) CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)
 上昇気流の発達しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達し
 うるため、大気的不安定度の指標となる。(図 2.2.4.2.3)

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

g : 重力加速度 θ'_e : 下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位
 θ_e : ストーム周囲の相当温位 dz : 鉛直方向の層厚

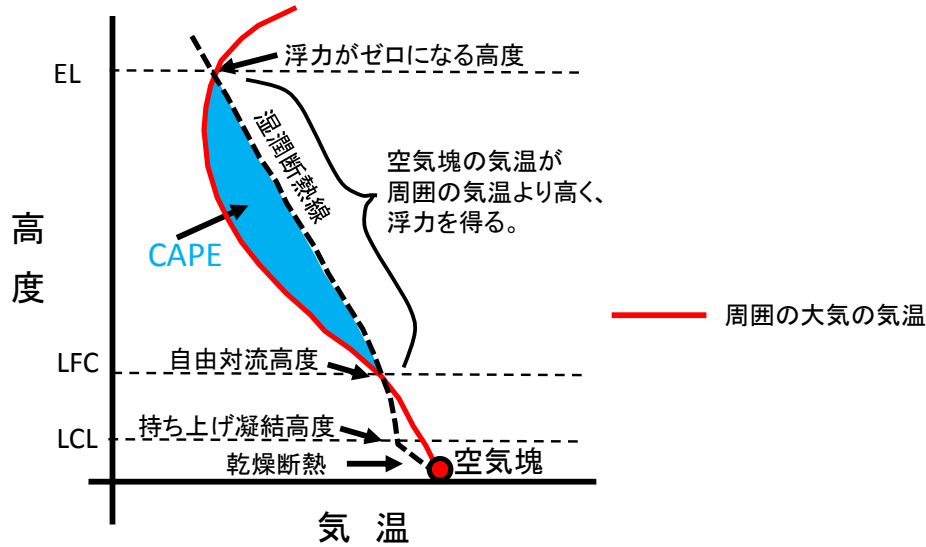


図 2.2.4.2.3 CAPE の算出概念

(3) EHI (Energy Helicity Index)

SReH と CAPE の複合的な突風関連指数。スーパーセルや竜巻の発生し易さを経験的に指標化したもので、米国では CAPE 単独や SReH 単独に比べると竜巻発生との相関関係が高いとされている。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160000}$$

(参考) 相当温位

温位とは、下式に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。

2つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく(不安定であり)、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いため、大きな積乱雲の発生につながる。

相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱(水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇)の影響も考慮された温位である。

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱})$$

2.2.4.3. 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図 2.2.4.3.1 に示す。WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し、それをもとに突風関連指数を算出している。図 2.2.4.3.1 をみると、季節によって CAPE の値が大きくなるものの、F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。

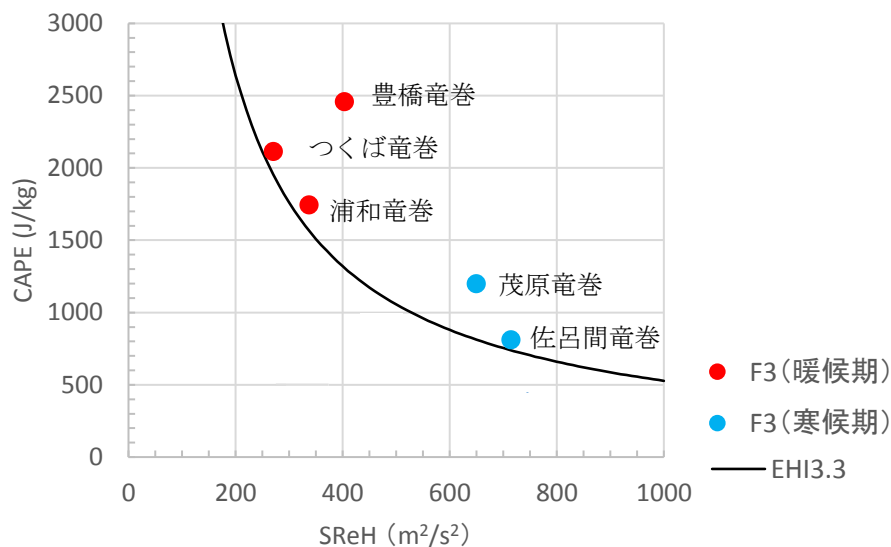


図 2.2.4.3.1 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生要因の指標である SReH と CAPE について、国内で (太平洋側で) 発生した F3 竜巻では、SReH と CAPE の両方 (あるいは複合指数である EHI) が大きな値をとる傾向が見られる。また、これまでに発生した国内における F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻 (6 事例) は、スーパーセルを伴っていたことが報告されている。

したがって、SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度 (以下、同時超過頻度と呼ぶ。) を分析することにより、スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出だすことができると考えられる。

2.2.4.4. 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

SReH と CAPE の閾値については、図 2.2.4.4.1 の F3 竜巻のデータをもとに、実際の

竜巻発生地点と対応するよう、下記のように設定した。また、CAPE の閾値については、緯度・季節で絶対値が大きく変わるため、5月～10月（暖候期）及び11月～4月（寒候期）に分けて閾値を設定した。

[5月～10月（暖候期）] SReH : 250 m²/s², CAPE : 1600 J/kg

[11月～4月（寒候期）] SReH : 250 m²/s², CAPE : 600 J/kg

図 2.2.4.4.1 は、1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータをもとに、SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また、気象庁竜巻データベースで確認された F2-F3 竜巻および F3 竜巻の発生箇所を図 2.2.4.4.2 に示す。

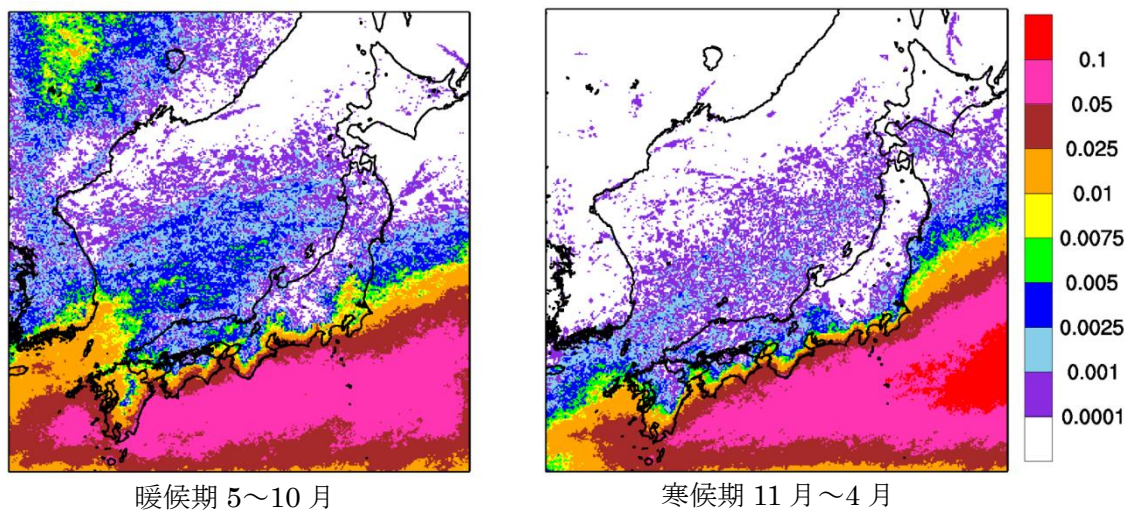


図2.2.4.4.1 F3規模以上を対象としたSReH, CAPE同時超過頻度分布（単位：％）

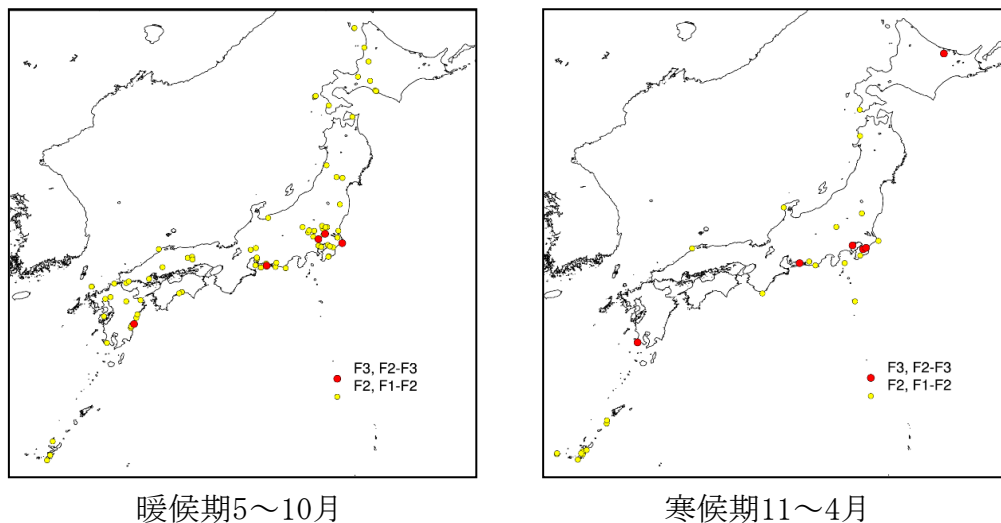


図2.2.4.4.2 F2規模以上の発生箇所
（気象庁「竜巻等竜巻データベース」より作成）

また、EHI についても、SReH と CAPE と同様に閾値を設け超過頻度について分析した。EHI の閾値については、過去のいずれの F3 事例においても EHI が 3.5 程度を越えていることから、それを包含する値として EHI:3.3 を設定した（暖候期と寒候期は分けない）。

EHI の超過頻度分布をマップ化したものについても図 2.2.4.4.3 に示す。SReH, CAPE の同時超過頻度分布（図 2.2.4.4.1）に対応した結果となっており、EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した。（図 2.2.4.4.4）

ただし、閾値を大きくした場合、実際に F3 が発生した関東平野内を包含できなくなる。また閾値を小さくした場合、小さな竜巻が発生する環境場をカウントすることから、地域性は薄れていくことがわかる。

なお、CAPE, SReH についても同様の感度解析を実施しており、同様の傾向が得られることを確認した。【添付資料 2.1 付録 E】

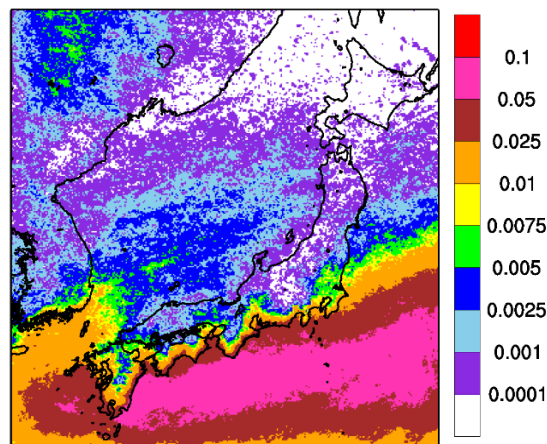


図2.2.4.4.3 EHIの超過頻度分布（単位：%，EHI閾値:3.3）

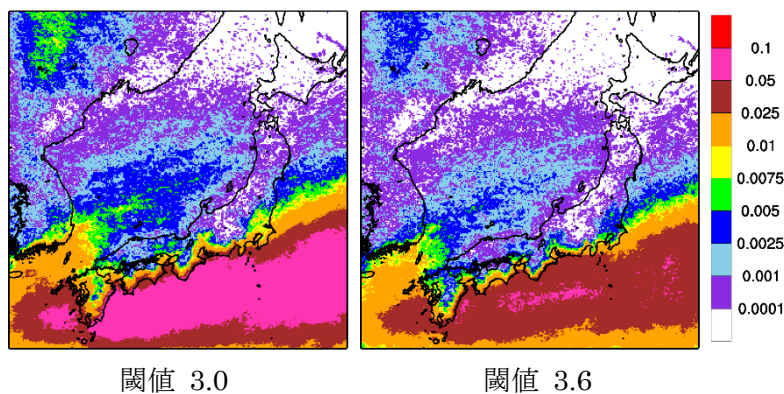


図 2.2.4.4.4 EHI の超過頻度分布（単位：%，EHI 閾値は左から、3.0、3.6）

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、柏崎刈羽原子力発電所の立地地域は、茨城県以西の太平洋沿岸よりも1~2オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、太平洋側と竜巻検討地域で大きな地域特性の違いがあることを確認した。

参考として、F2規模の竜巻について同様の検討を行った。閾値の設定はF2規模の竜巻発生時の実績をもとに以下の様に設定した。

[5月-10月 (暖候期)] SReH : 200 m²/s², CAPE : 1000 J/kg

[11月-4月 (寒候期)] SReH : 200 m²/s², CAPE : 350 J/kg

EHI を用いる場合の閾値 EHI:1.5

SReH, CAPE の同時超過頻度分析の結果を図 2.2.4.4.5 に、EHI の超過頻度分布を図 2.2.4.4.6 に示す。

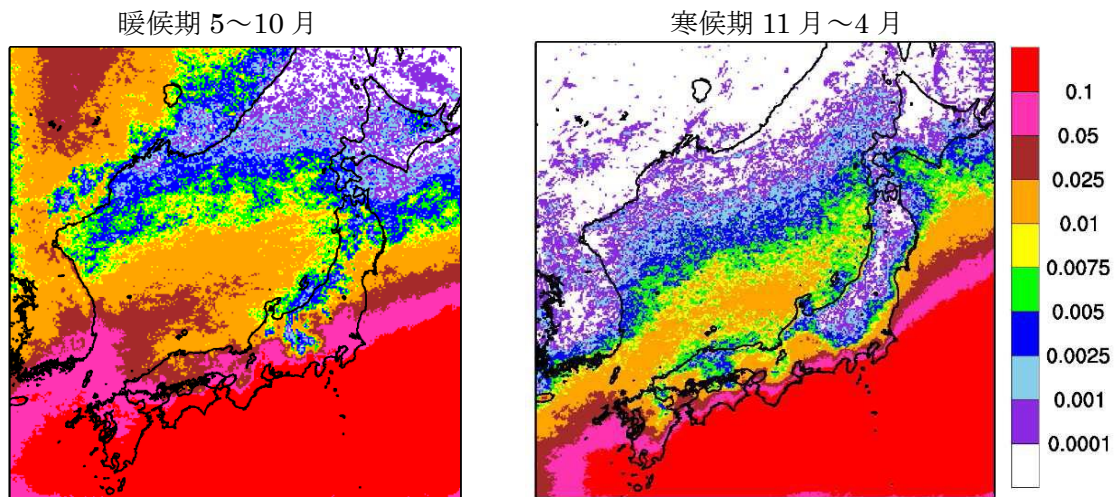


図2.2.4.4.5 F2規模のSReH, CAPE同時超過頻度分布 (単位: %)

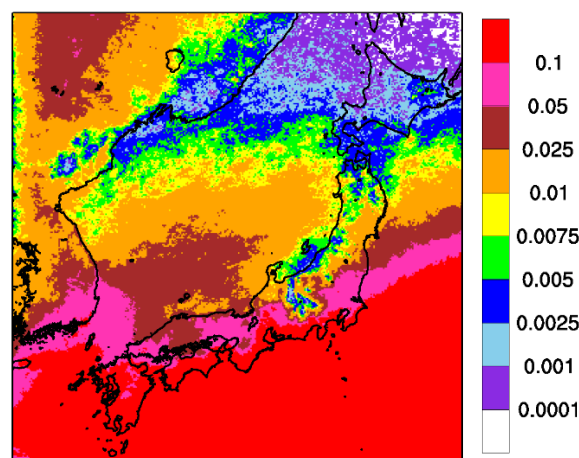


図2.2.4.4.6 EHIの超過頻度分布 (単位: %, EHI閾値:1.5)

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても、柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域は、太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

日本海側で大きな竜巻が発生しにくい原因の一つとしては、太平洋側から暖かく湿った空気が、日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えてくる事が出来ないため、日本海側では大きな竜巻を引き起こす環境場が形成しにくくなっていることが考えられる。

2.2.4.5. 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から、F3 規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域が分かったが、そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町では 2006 年 11 月に F3 竜巻が発生している（以下、佐呂間竜巻と呼ぶ。）。

佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、

- ・国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。
- ・F3 竜巻としては継続時間（1 分）と移動距離（約 1.4km）が非常に短かったという点で異なっている。

佐呂間竜巻の発生した地域では、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた。（図 2.2.4.5.1、図 2.2.4.5.2）

また、日高山脈の東側では、山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点となっており、ここで発生した親雲が山脈沿いに北上しながら持続的に発達し、佐呂間地域で F3 規模の竜巻を形成するに至ったと考えられる。

これらの発生メカニズムについて、図 2.2.4.5.3 に模式的に示す。

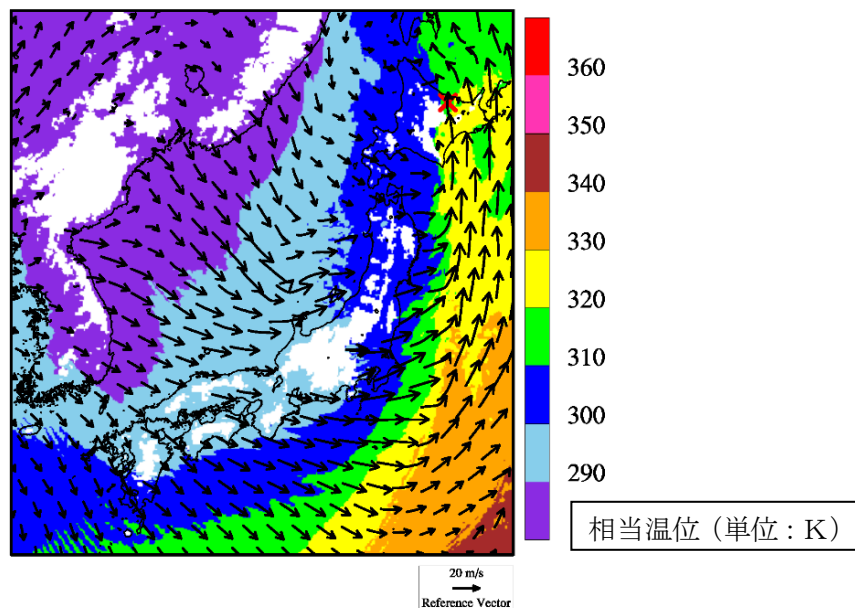


図 2.2.4.5.1 佐呂間竜巻発生時の風向・風速および相当温位の分布(海拔 500m 高度)



親雲の発生位置（点線内）と移動方向 竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

図 2. 2. 4. 5. 2 親雲の発生箇所と移動方向（左）および竜巻の発生箇所（右）

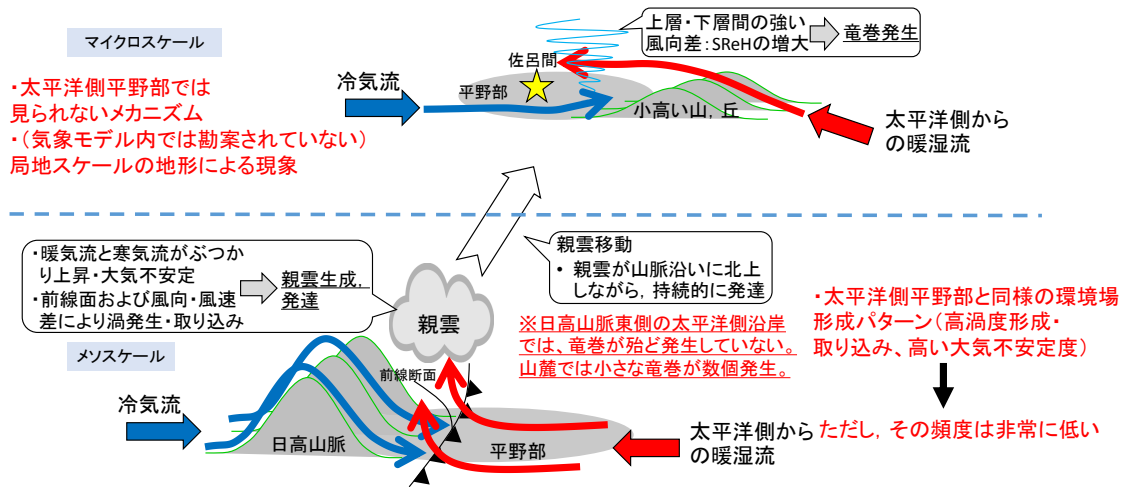


図 2. 2. 4. 5. 3 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

このように、佐呂間竜巻の発生メカニズムは、太平洋側沿岸域にて発生している F3 竜巻のメカニズムとは大きく異なっており、竜巻の持続時間・被害域長さも大きく異なっている。

竜巻影響評価における取り扱いとしては、基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的な地形影響を受けており、そういった影響については、設計竜巻 V_D の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿ったものとなる。

考慮する際のポイントは、以下の 2 点である。

- ・ 太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域で

ある。

- ・ 近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入する風上側に尾根状の丘・山が存在すること。

その観点で柏崎刈羽原子力発電所の地形を確認すると、以下の様に整理できる。

- ・ 本州中央部に高標高山岳が存在するため、太平洋側から暖湿流が直接流入しない。（図 2. 2. 4. 5. 4）
- ・ 日本海側で発達する気流は、主に西から東へ移動する傾向が強く、気流の流入する風上側（海側）に尾根状の丘，山が存在しない。

したがって、柏崎刈羽原子力発電所で佐呂間竜巻と同様な地形条件にはなっていないことを確認した。

以上の検討結果より、竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが示され、その観点から柏崎刈羽原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域として設定することが妥当であることが確認できた。

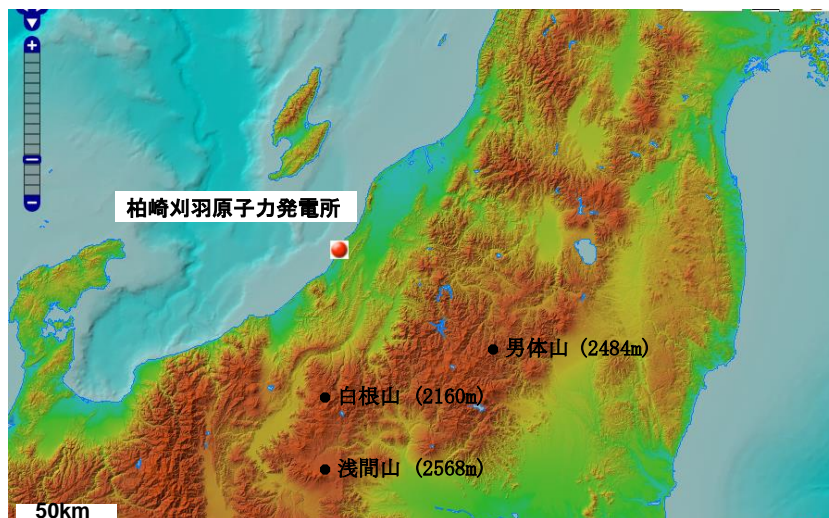


図2. 2. 4. 5. 4 柏崎刈羽原子力発電所周辺地形図

2.3. 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

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}) 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) のうち、大きな風速を設定する。

2.3.1. 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

表2.3.1.1に竜巻検討地域で過去に発生したF1より大きい竜巻の観測記録を示す。

表2.3.1.1より竜巻検討地域における過去最大竜巻はF2であり、Fスケールと風速の関係より風速は50～69m/sである。また、2.2節に基づく検討結果から、日本海側に設定した竜巻検討地域は、太平洋側と比較して総観場及びF3規模の竜巻発生のは易さの観点から地域性が異なることが説明できる。したがって、竜巻検討地域で過去に発生した最大竜巻F2の風速範囲の上限値69m/sを V_{B1} とする。

表2.3.1.1 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1より大きい竜巻)
(気象庁「竜巻等竜巻データベース」より作成)

現象区別	発生日時	発生場所	Fスケール※	総観場
竜巻	1962/09/28 14:20	北海道宗谷支庁 東利尻町	(F2)	寒冷前線
竜巻	1971/10/17 05:00	北海道留萌支庁 羽幌町	(F2)	寒気の移流
竜巻	1974/10/03 19:05	北海道檜山支庁 奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	温暖前線
竜巻	1974/10/20 15:00	北海道檜山支庁 檜山郡上ノ国町	(F1~F2)	寒冷前線
竜巻	1975/05/31 18:10	島根県 簸川郡 大社町	(F2)	日本海低気圧・局地 性じょう乱・寒気 の移流
竜巻	1975/09/08 01:30	北海道檜山支庁 奥尻郡奥尻町	(F1~F2)	日本海低気圧・暖気 の移流
竜巻	1979/11/02 01:58	北海道渡島支庁 松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧・温暖 前線
竜巻	1989/03/16 19:20	島根県 簸川郡 大社町	(F2)	局地性じょう乱・寒 気の移流
竜巻	1990/04/06 02:55	石川県 羽咋郡 富来町	F2	オホーツク海低気 圧・気圧の谷
竜巻	1999/11/25 15:40	秋田県 八森町	(F1~F2)	日本海低気圧・寒冷 前線

※：Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したものがあり、F2以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。

2.3.2. 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方【添付資料 2.3(1)】

竜巻最大風速のハザード曲線は、気象庁「竜巻等竜巻データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen&Chu及びGarson et. al)に基づき算定した。具体的な算定方法は、JNES委託研究成果報告書*を参考とし、図2.3.2.1に示すフローに従いハザード曲線を算定した。なお、ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側、陸側それぞれ5kmの範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、海上発生 of F スケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、竜巻影響評価ガイドに基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために竜巻検討地域を海岸線に沿って1km範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定した。【添付資料2.3参考資料3】

※ 東京工芸大学：「平成21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，平成23年2月

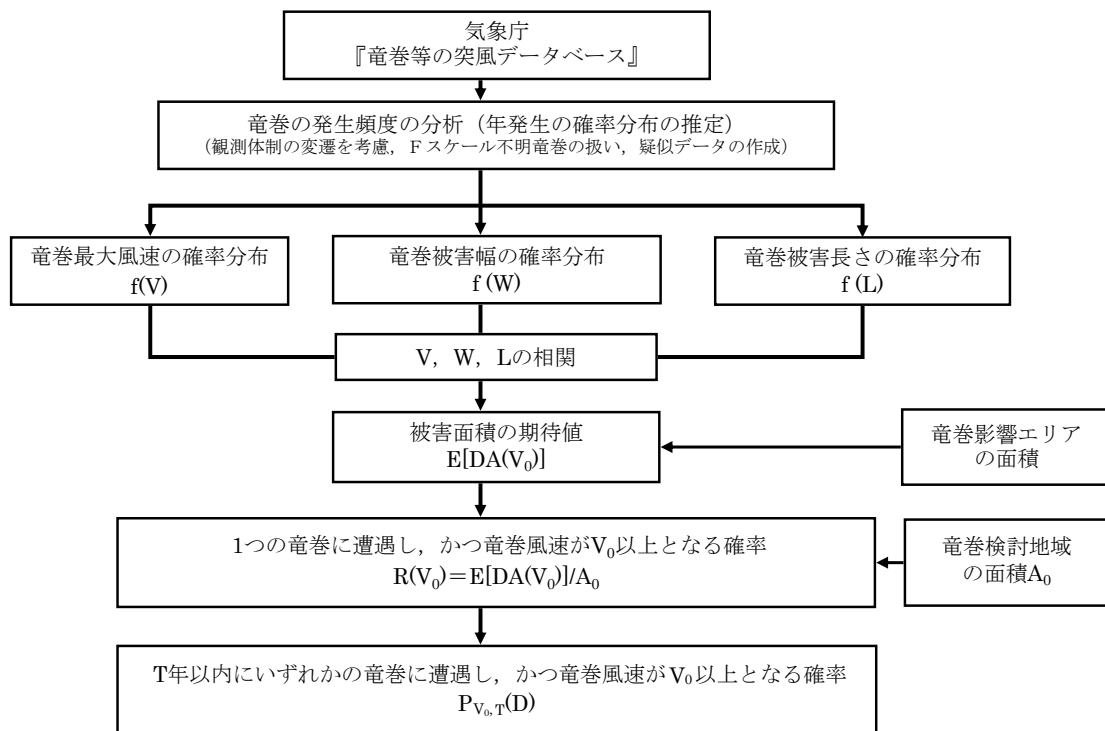


図 2.3.2.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

2.3.3. 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

本評価では、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である通過竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは、それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

2.3.4. 竜巻の発生頻度の分析【添付資料 2.3(2)】

気象庁「竜巻等竜巻データベース」を基に、1961年～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき（図2.3.4.1参照）を踏まえ、以下の(1)～(3)の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- (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用いる。
- (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用いる。
- (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用いる。

また、Fスケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（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については、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上でのFスケール不明の竜巻は、被害が少ないF0竜巻に分類した。海上で発生しその後上陸しなかった竜巻（以下、「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上5kmの範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸5kmの範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各Fスケールに分類する。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を表2.3.4.1に示す。

なお、竜巻発生確率モデルは、ガイドに従ってポアソン過程に従うものとし、年発生数の確率分布には、ポリヤ分布を適用した。

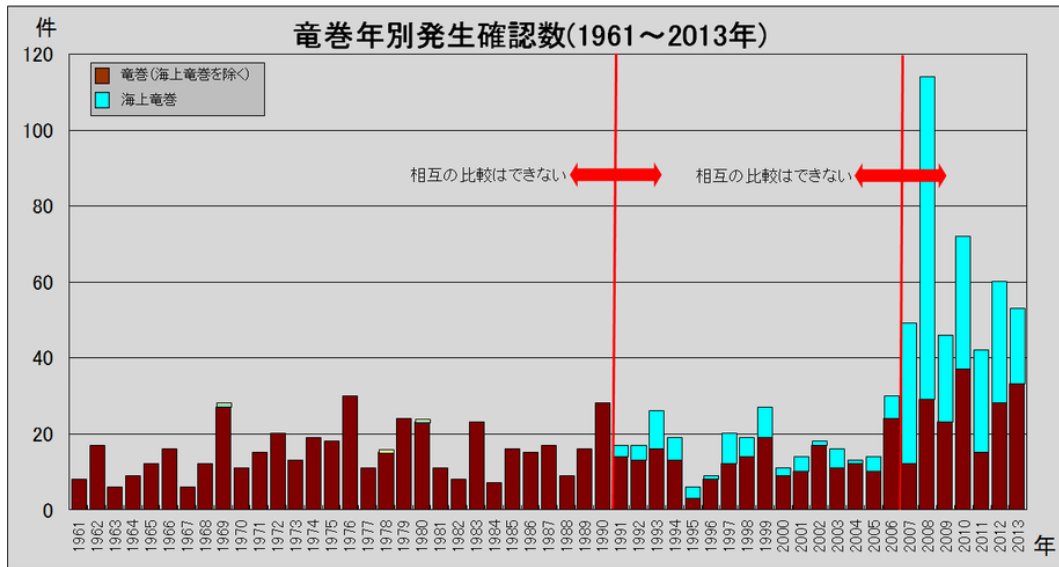


図 2.3.4.1 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

表 2.3.4.1 竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値(年)	1.44	0.47	0.78	0.19	-	0.25	2.04	3.73
	標準偏差(年)	2.25	1.75	0.90	0.49	-	0.71	5.92	7.81
	CV(年)	1.56	3.76	1.16	2.52	-	2.83	2.90	2.09
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値(年)	2.14	1.12	0.98	0.05	-	0.56	4.88	7.58
	標準偏差(年)	3.11	2.61	0.91	0.22	-	1.02	8.49	11.07
	CV(年)	1.45	2.34	0.93	4.64	-	1.83	1.74	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値(年)	4.91	4.00	0.91	-	-	1.27	16.55	22.73
	標準偏差(年)	5.55	4.32	1.24	-	-	1.69	11.41	15.10
	CV(年)	1.13	1.08	1.36	-	-	1.33	0.69	0.66
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値(年)	6.44	4.00	0.98	0.19	-	1.27	16.55	22.99
	標準偏差(年)	4.75	4.32	0.91	0.49	-	1.69	11.41	12.36
	CV(年)	0.74	1.08	0.93	2.52	-	1.33	0.69	0.54
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	-	-	-	23.05
	標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	-	-	-	8.97
	CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	-	-	-	0.39

2.3.5. 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数【添付資料 2.3(3)，(4)】

竜巻ハザードを評価するためには，一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分布が必要となることから，これらの確率密度分布を求める。なお，竜巻風速の確率密度分布は，F スケール別の竜巻発生数から求める。

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さを基に，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている JNES 委託研究成果報告書を参照し，対数正規分布に従うものとする。(図 2.3.5.1～図 2.3.5.6)

なお，疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅または被害長さの情報がない竜巻には，被害幅また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，被害幅または被害長さが大きいほうから優先的に用いることで，被害幅または被害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，被害幅または被害長さ 0 のデータについては計算に用いておらず，保守的な評価を行っている。

このように，前述の F スケール不明の竜巻の取扱い等も含め，データについては保守的な評価となる取扱いを行っている。

また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。表 2.3.5.1 に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。

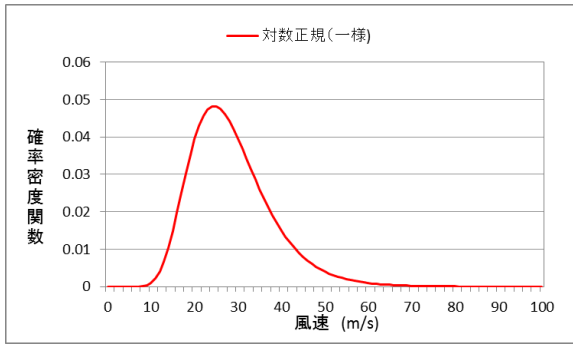


図2.3.5.1 竜巻風速の確率密度分布

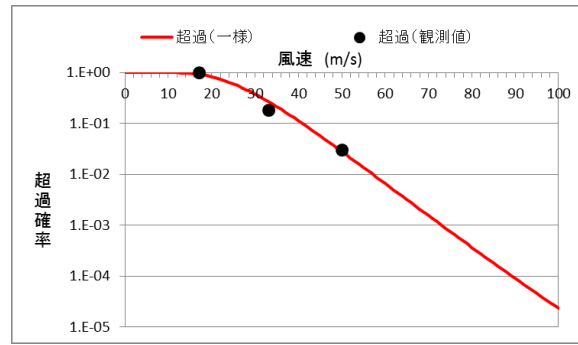


図2.3.5.2 竜巻風速の超過確率分布

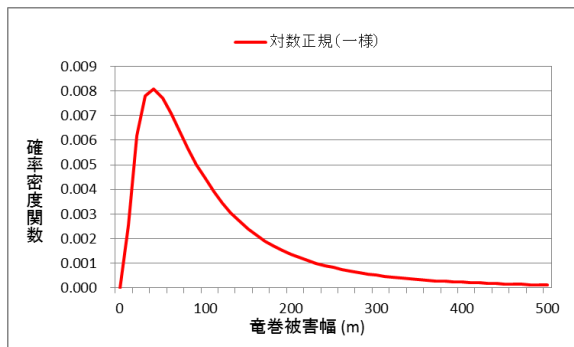


図2.3.5.3 被害幅の確率密度分布

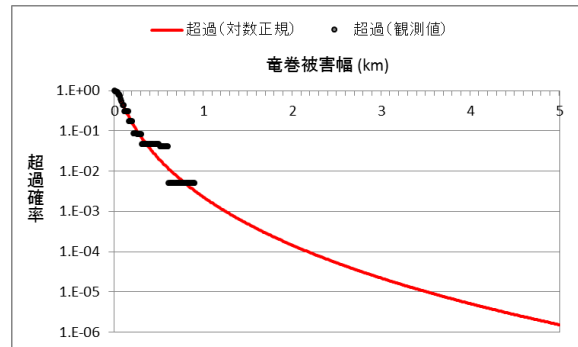


図2.3.5.4 被害幅の超過確率分布

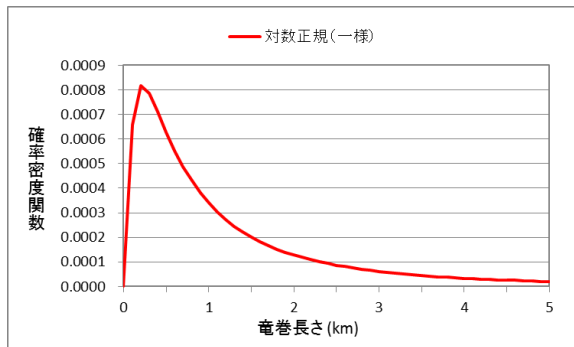


図2.3.5.5 被害長さの確率密度分布

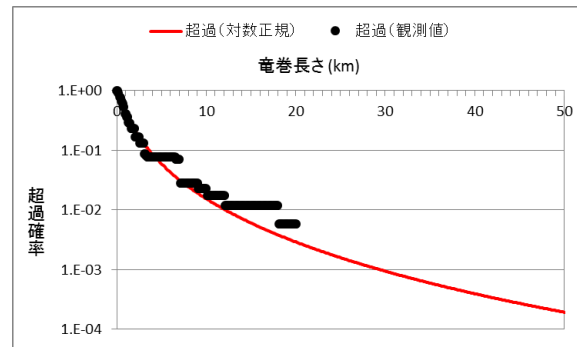


図2.3.5.6 被害長さの超過確率分布

表 2.3.5.1 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050*	0.312
被害幅	-0.050*	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

*風速と被害幅は無相関との知見が得られたため, ハザード算定の際には, 相関係数 0 として計算

2.3.6. 竜巻影響エリアの設定【添付資料 2.3(5)】

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定にあたり、 V_{B2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所の号炉ごとに設定する。号炉ごとのすべての評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅, 被害長さから設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。

図2.3.6.1に柏崎刈羽原子力発電所6号炉の竜巻影響エリア, 図2.3.6.2に7号炉の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所6号炉または7号炉の評価対象施設を含む長方形エリアの対角線長さが約260mであることを考慮して、各号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア(直径300m, 面積約 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$)として設定する。なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

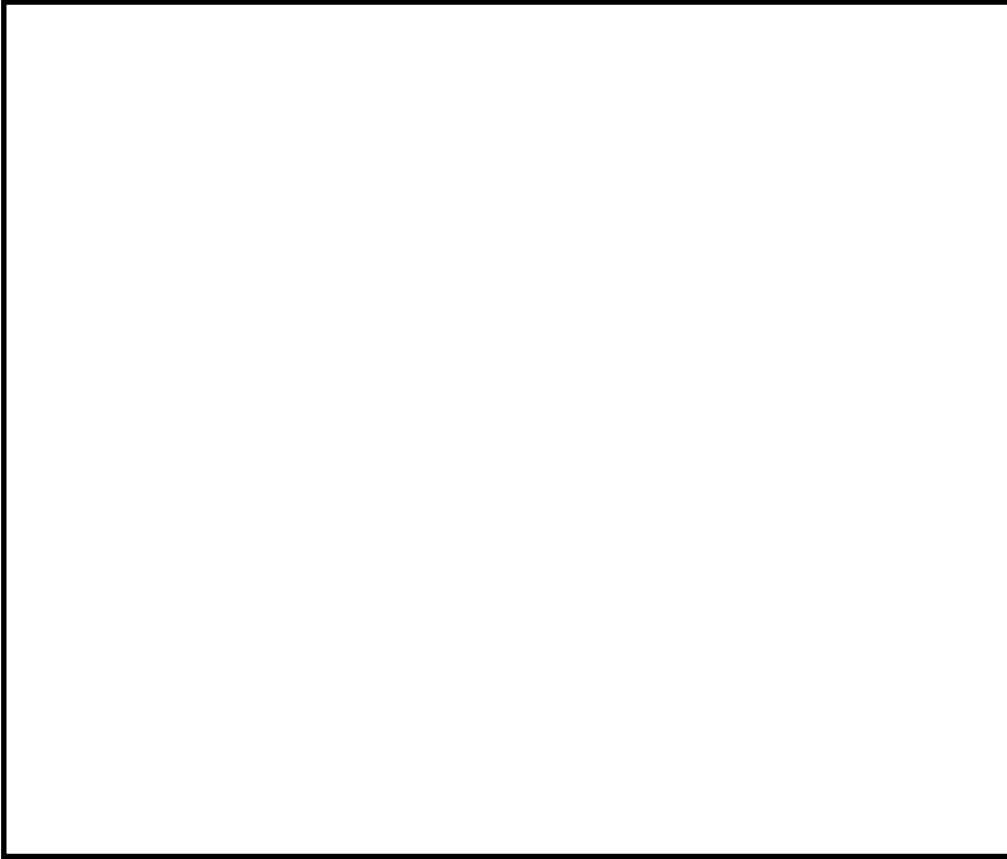


図2.3.6.1 6号炉 竜巻影響エリア

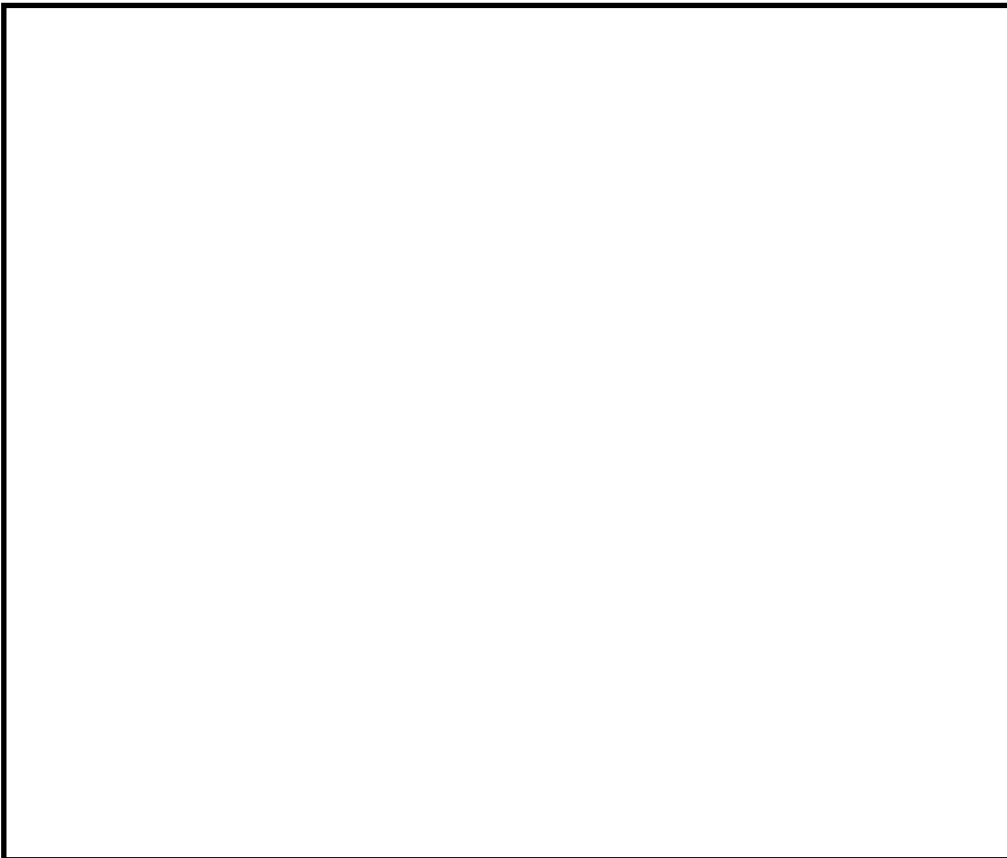


図2.3.6.2 7号炉 竜巻影響エリア

2.3.7. ハザードの算定【添付資料 2.3(6)】

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る。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式(1)で示される。

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

ここで、

N : 竜巻の年発生数
 v : 竜巻の年平均発生数
 T : 年数

β は分布パラメータであり式(2)で示される。

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

ここで、

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

D をリスク評価対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象と定義し、 $R(V_0)$ をリスク評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率と定義すると、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率は式(3)で示される

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約33,395km²)、1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式(4)で示される。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (4)$$

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

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式(4)により $R(V_0)$ を推定して、式(3)により $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅 w 、被害長さ l 、移動方向 α 及び構造物の寸法を A, B とし、 $f(V, w, l)$ 等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(5)で示される。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \tag{5}
\end{aligned}$$

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が V_0 以上となる幅であり、式(6)で示される。

$H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影した時の長さであり、式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{6}$$

ここで、

V_{\min} : 被害幅 w 内の最小竜巻風速

V_0 : 被害が発生する最小風速

$$\begin{aligned}
H(\alpha) &= B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \\
G(\alpha) &= A |\sin \alpha| + B |\cos \alpha| \tag{7}
\end{aligned}$$

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径300 mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を D_0 とした場合の計算式は式(8)で示される。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \tag{8}
\end{aligned}$$

2.3.8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域（竜巻検討地域）を対象に算定し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図2.3.8.1に示すとおり58.3m/sとなった。

なお，1km範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線については，算出を実施したものの，その技術的説明性が乏しいと考え， V_{B2} の設定には使用しないものとした。【添付資料2.3（参考資料3）】

- ※ 設計基準事故の発生頻度が 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年（発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案に対する意見募集の結果について：平成25年4月3日 原子力規制庁技術基盤課）であることから，設計基準として考慮する竜巻の最大風速は年超過確率 10^{-4} に設定することが妥当であると考え。ただし，ガイドで竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の年超過確率は， 10^{-5} を上回らないことが要求されていること，ハザードの不確実性があることを踏まえて保守的に 10^{-4} より1桁下げて，竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の年超過確率は 10^{-5} とする。

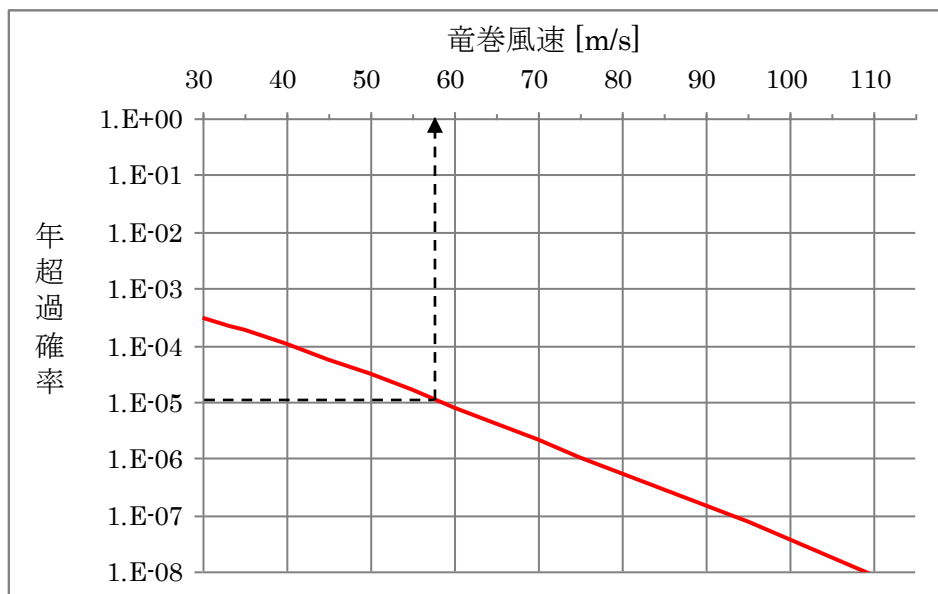
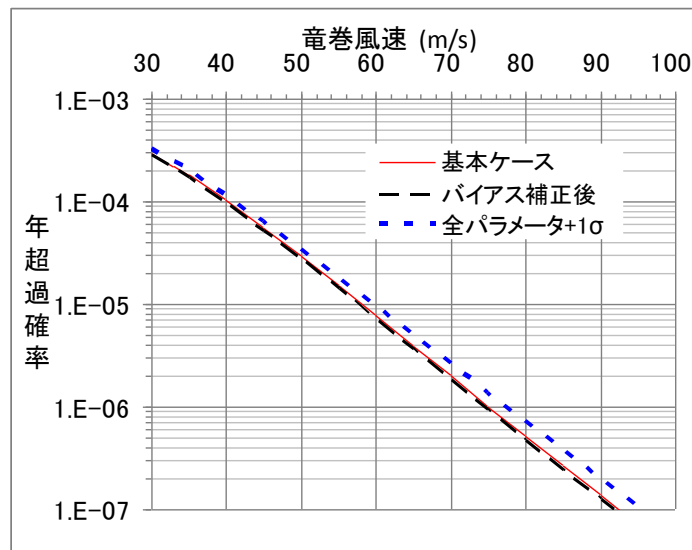


図2.3.8.1 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）

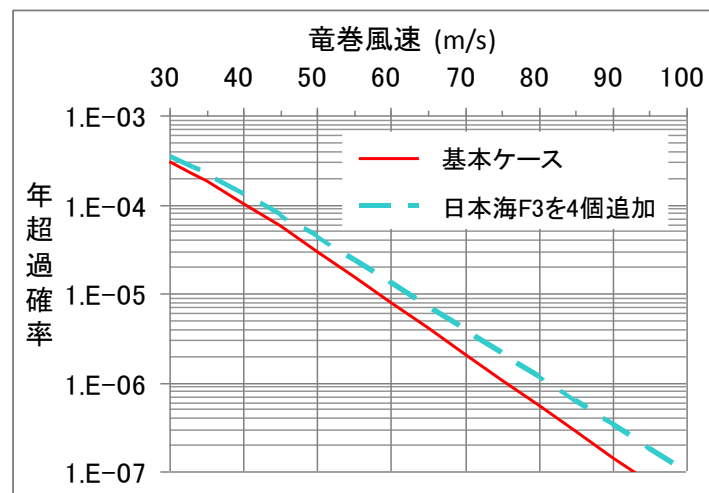
また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した【添付資料2.3参考資料5】

図2.3.8.2(a)に示した、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが十分小さいことを確認した。

更に、疑似データにF3竜巻を4個追加した感度解析結果を図2.3.8.2(b)に示す。この場合の年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速は62.2m/sとなり、かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから、データの高い安定性を確認した。



(a) バイアス補正後及び全パラメータ+1σのハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図2.3.8.2 ハザード不確かさ検討結果

2.3.9. 基準竜巻の最大風速 (V_B)

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=69$ m/s及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=58.3$ m/sのうち、大きい風速は69m/sである。(表2.3.9.1)

また、使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しており、Fスケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分して取り扱っているが、竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側はFスケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ、参照する年超過確率を 10^{-5} から一桁下げた年超過確率 10^{-6} に相当する風速である76m/sを柏崎刈羽原子力発電所における基準竜巻の最大風速 V_B とする。

使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しているが、将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できない。

将来的な気候変動として現時点でも予想されるものとしては地球温暖化が挙げられる。地球温暖化が進行した際には台風の強度が強まる傾向が考えられ、現時点の経験データでは台風起因の竜巻は日本海側では観測されていないものの将来的には日本海側においても発生する可能性がある。ただし台風は北上するにつれて、山岳での暖湿流遮断による安定化や海水温度低下による水蒸気供給量低下により衰弱しやすい特性を有していることから、仮に発生するとしても規模の大きな竜巻の発生は考えにくい。

将来的な気候変動についての現時点での予想は上記の通りとなるが、気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速は、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

表2.3.9.1 竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速[m/s]
過去に発生した竜巻による 最大風速 V_{B1}	69
竜巻最大風速のハザード曲線による 最大風速 V_{B2}	58.3
基準竜巻の最大風速 V_B	76

2.4. 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

2.4.1. 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、(1) 地形起伏による影響、(2) 地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

(1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、図 2.4.1.1 に示す通り竜巻の渦が上り斜面を移動する時（渦 1 から渦 2 へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

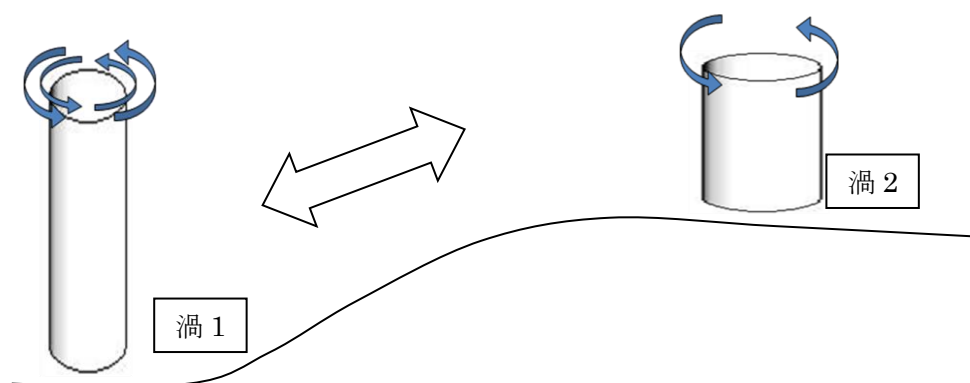


図 2.4.1.1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(2) 地表面粗度による影響

風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから、地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

2.4.2. 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形

柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地形を図 2.4.2.1、柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を図 2.4.2.2、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地表面粗度を図 2.4.2.3 に示す。発電所が立地する敷地は、北西が日本海に面し、三方を森林に囲まれた標高 60m 前後のなだらかな丘陵地である。

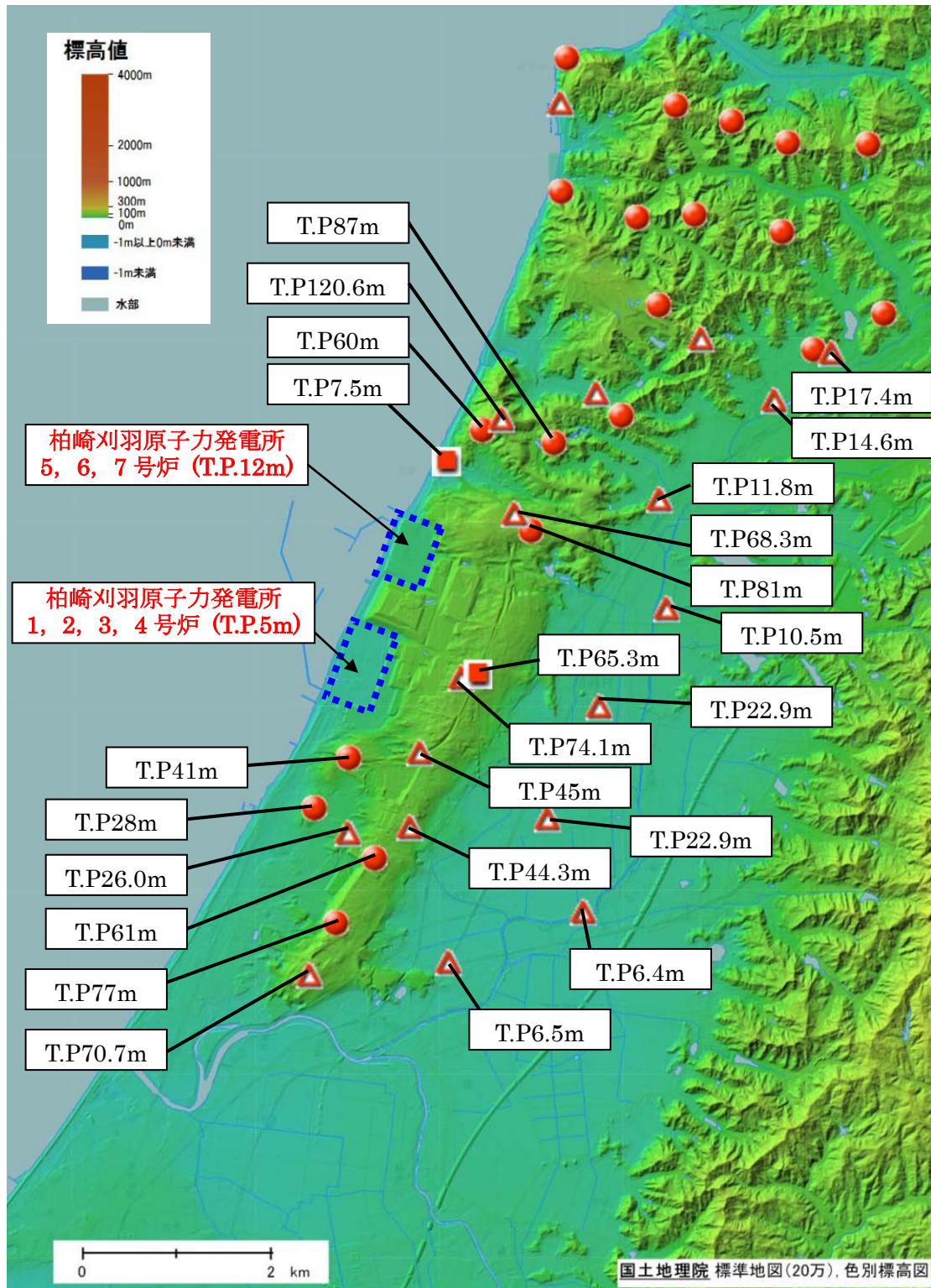


図 2.4.2.1 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形
(国土地理院「電子国土Web」より作成)

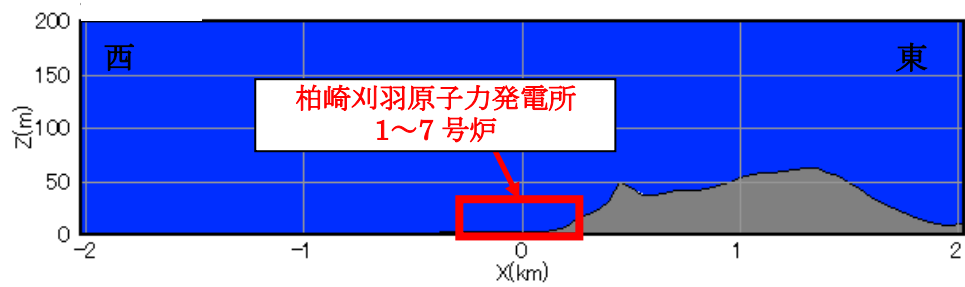


図 2. 4. 2. 2 柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

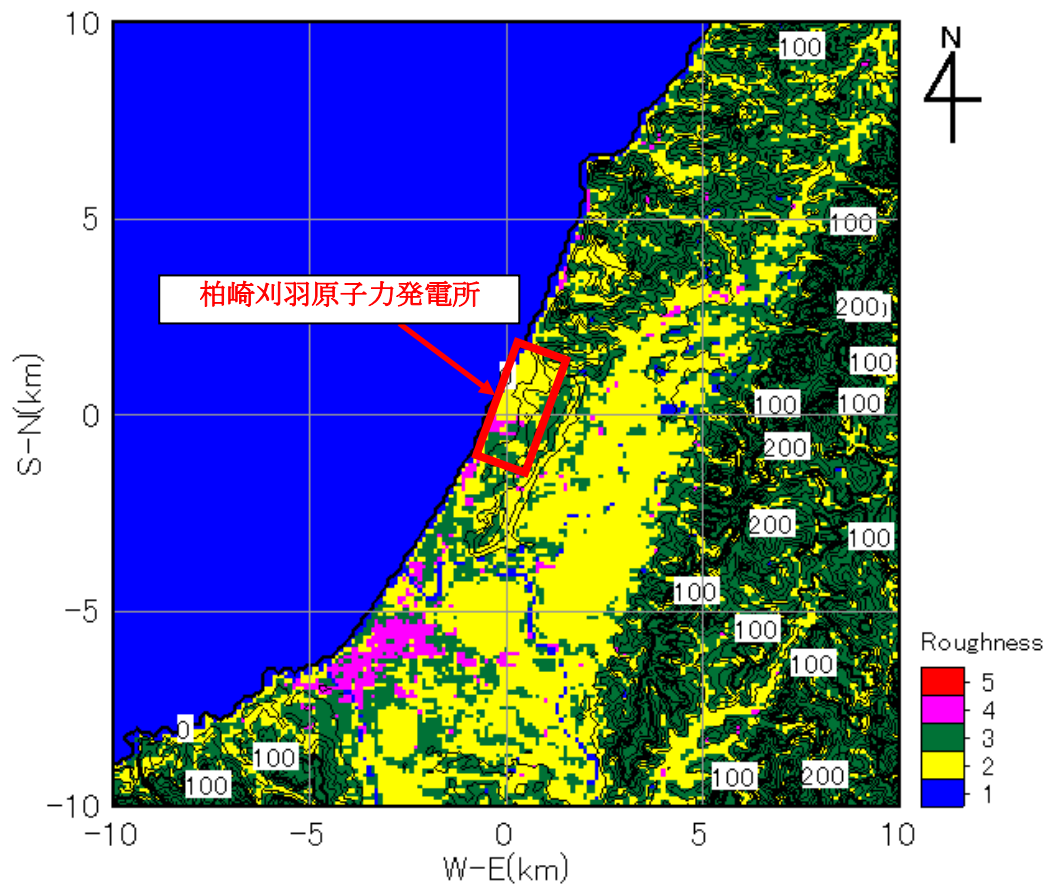


図 2. 4. 2. 3 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地表面粗度

2. 4. 3. 竜巻の移動方向の分析

柏崎刈羽原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお、分析の対象とする地域は、JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に示されている竜巻集中地域を参考に、集中地域③（東北地方の日本海側）、④（新潟県・富山県）及び⑤（石川県）とした。

図 2. 4. 3. 1 に竜巻集中地域④周辺で発生した竜巻の移動方向、図 2. 4. 3. 2 に竜巻集中地域③、④及び⑤において過去に発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果、柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は、

陸側から海側（東から西）に向かう竜巻は極めて少なく、発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう方向が多い。

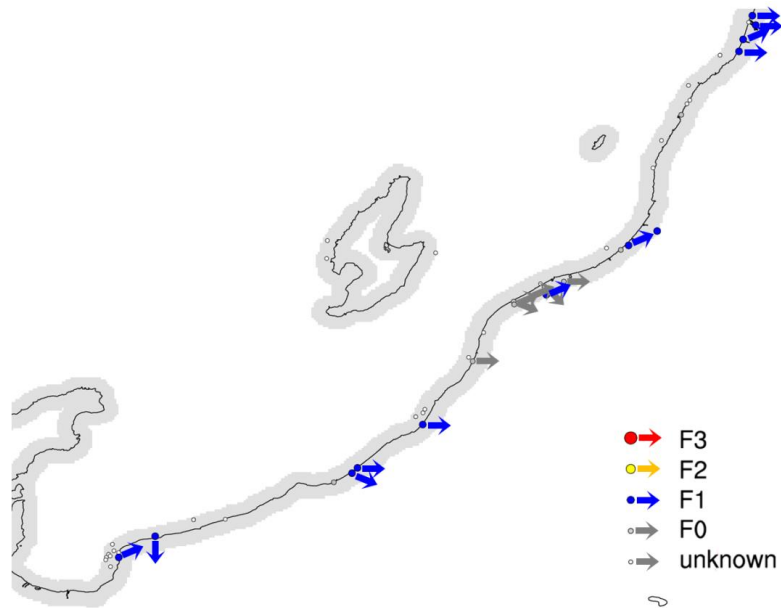


図2.4.3.1 竜巻集中地域④における竜巻移動方向（F0以上のみ）

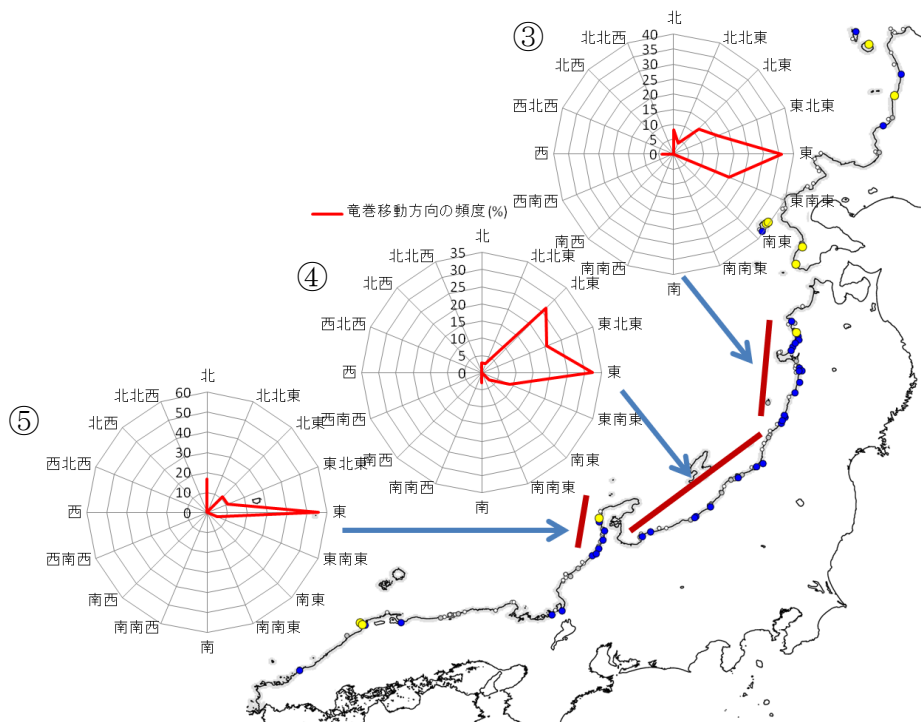


図2.4.3.2 竜巻集中地域③，④及び⑤における竜巻移動方向の頻度

2.4.4. 竜巻風速の増幅に関する検討

(1) 地形起伏による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の東側（例えば刈羽村の平地）で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し、発電所敷地内に進入した場合、竜巻はなだらかな丘陵を越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、丘陵がなだらかであるため竜巻の増幅・減衰はない、もしくは丘陵の上り勾配と下り勾配で相殺される。

(2) 地表面粗度による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺では、発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう竜巻の発生が極めて多く、竜巻が海上から陸側に移動する際には、地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため、粗度による減衰効果が期待できる。

2.4.5. 設計竜巻の最大風速 V_D

検討の結果、柏崎刈羽原子力発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、設計竜巻の最大風速 V_D は F3 の風速範囲の上限値 92m/s とする。

2.5. 設計竜巻の特性値

竜巻風速場としてフジタモデルを選定した場合の設計竜巻の特性値については、表 2.5.1 の通り設定する。なお、最大気圧低下量と最大気圧低下率は、数値解析によって計算する。【添付資料 2.5】

表 2.5.1 設計竜巻の特性値

設計竜巻の 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/s]	最大気圧低 下量(ΔP_{max}) [hPa]	最大気圧低 下率 ($((dp/dt)_{max})$) [hPa / s]
92	14	78	30	64	42

3. 竜巻影響評価

3.1. 評価概要

評価の概要は以下のとおりとする。

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

3.2. 評価対象施設

「1.2 竜巻影響評価の対象施設」に示したとおりとする。

3.3. 設計荷重の設定

3.3.1. 設計竜巻荷重の設定

設計竜巻の最大風速 V_D 等に基づき，「風圧力」，「気圧差による圧力」及び「飛来物の衝撃荷重」について，以下のとおり設定する。

(1) 設計竜巻による風圧力の設定

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

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

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

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

ただし，竜巻による最大風速は，一般的には水平方向の風速として算定されるが，鉛直方向の風圧力に対してせい弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には，フジタモデルの風速場による求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

(2) 設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差によ

る圧力の設定

設計竜巻による評価対象施設等の内外の気圧差による圧力は、最大気圧低下量 (ΔP_{\max}) に基づき設定する。

①建屋・構造物等

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

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

ここで、 ΔP_{\max} ：フジタモデルにより求まる最大気圧低下量、A:施設の受圧面積
外部事象防護対象施設を内包する建屋・構築物について、影響評価を実施し、当該施設が破損した場合には安全機能維持について確認を行う。

②設備(系統、機器)

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

(3) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設等に衝突する際の衝突荷重の設定

①柏崎刈羽原子力発電所6,7号炉における飛来物に係る現地調査結果及び設計飛来物の選定について

柏崎刈羽原子力発電所6,7号炉の竜巻影響評価における設計飛来物については、飛来物に係る現地調査結果及びガイドの解説表4.1に示されている設計飛来物の設定例を参照し設定する。

以下に柏崎刈羽原子力発電所にて実施した飛来物の現地調査の結果と、その結果を元に抽出した設計飛来物の設定の考え方を示す。【添付資料 3.3】

a. 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる竜巻の速度は、92m/s とする。(表 2.5.1 参照)

b. 飛来物に対する考え方

飛来物のうち、後述する設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギー及び貫通力(コンクリートの貫通限界厚さ)が大のもの、角型鋼管(大)より貫通力(鋼板の貫通限界厚さ)が大のものについては、設置場所等に応じ固縛を行うことで飛散させないものとする。また、衝突時に防護施設に与えるエネルギーが鋼製材の運動エネルギーより小さいものについては、適切な飛散防止対策を行う。

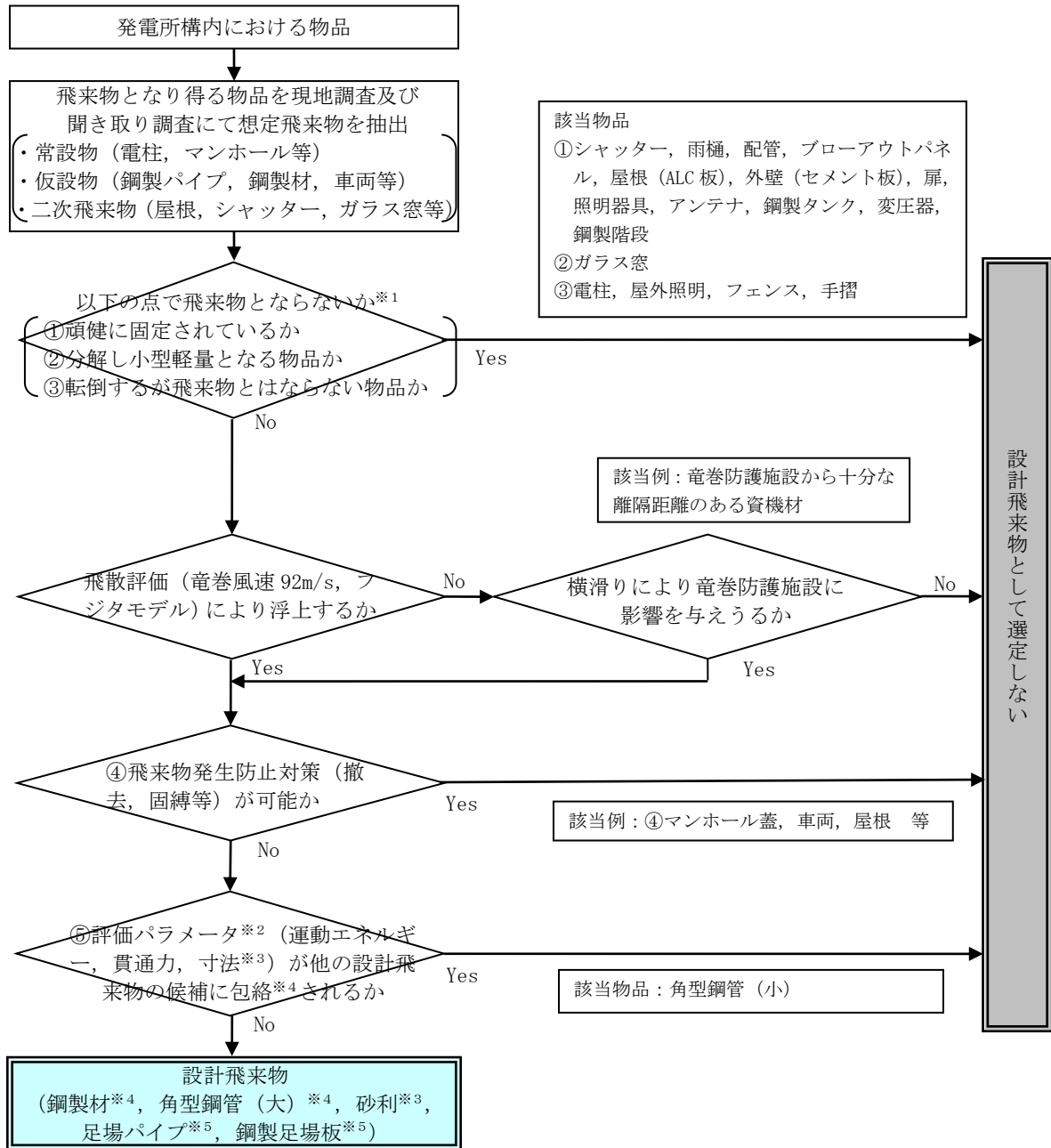
c. 設計飛来物の選定

設計飛来物の選定フローを図 3.3.1.1, 選定結果を表 3.3.1.1 に示す。

柏崎刈羽原子力発電所の飛来物に係る調査の結果、柏崎刈羽原子力発電所に

において飛来物となる可能性があるものから、浮き上がりの有無、運動エネルギー及び貫通力の大きさから、鋼製材、角型鋼管（大）、足場パイプ及び鋼製足場板を設計飛来物として選定した。但し、これらのうち飛散防止対策を講じるものは除く。選定した鋼製材のサイズ、重量については、現地調査及びガイドに基づいて、影響が大きい寸法、重量を設定した。

また、後述の換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットをすり抜ける可能性のある飛来物として砂利を選定した。なお、砂利のサイズは竜巻防護ネットをすり抜ける可能性があるサイズ（4cm）を考慮して設定した。



※1：過去の事例を参考に判定
 ※2：評価対象施設等に想定される損傷モードより、評価パラメータを設定
 ※3：換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があるものを抽出
 ※4：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合を考慮し、運動エネルギー、貫通力が仮設足場材（足場パイプ、鋼製足場板）に次ぐ飛来物についても抽出
 ※5：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合は除く。

図 3.3.1.1 設計飛来物の選定フロー

②設計飛来物の速度等の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度(V_{Hmax})及び最大鉛直速度(V_{Vmax})は、(3) a. に示す竜巻風速92m/sにて、フジタモデルを仮定し風速場の中での速度を算出した。また、設計飛来物の浮き上がり高さ及び飛散距離も同様に算出した。その結果を表3.3.1.1に示す。

a) 鋼製材、角型鋼管（大）及び砂利の影響高さ

ランキン渦モデルを採用している米国 Regulatory Guide 1.76 では、小さな飛来物（スチールパイプ等）はどの高さへの衝突も想定しているのに対し、重量物（自動車）に対しては9.1m（30feet）以下に影響を及ぼすこととしている。

一方、フジタモデルを適用した場合の鋼製材、角型鋼管（大）及び砂利の影響高さは、表3.3.1.1の通り、設計飛来物の浮き上がり高さは、最大でも0.15mと僅かであるが、設計飛来物は（設計飛来物の寸法で最も長い辺は4.2m）回転して飛散することも想定される。






また、高所の建屋開口部等への影響を及ぼす可能性があるものには飛散防止対策を講じることから、設計飛来物は原則地上高10m迄影響を及ぼすものとする。

b) 足場パイプ及び鋼製足場板の影響高さ

足場パイプ及び鋼製足場板の浮き上がり高さは、表3.3.1.1の通り、高所の建屋開口部等へ影響を及ぼす可能性があることから、どの高さへの衝突も想定するものとする。

飛来物の発生防止対策については、現地調査により抽出した飛来物や持ち込まれる物品の寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー、貫通力を考慮して、衝突時に建屋等又は竜巻防護対策設備に与えるエネルギーが設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）によるものより大きく、竜巻防護施設を防護できない可能性があるものは固縛、固定又は竜巻防護施設からの離隔対策を実施し、確実に飛来物とならない運用とする。

表 3.3.1.1 柏崎刈羽原子力発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製材	角型鋼管 (大)	足場パイプ	鋼製足場板
					
サイズ (m)	長さ×幅×奥行き 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行き 4×0.1×0.1	長さ×幅×奥行き 4×0.051×0.051	長さ×幅×奥行き 4×0.25×0.04
質量 (kg)	0.2	135	28	11	14
最大水平速度 (m/s)	14	10	16	42	55
最大鉛直速度 (m/s)	7	7	7	38	18
浮き上がり高さ (m)	0.08	0.08	0.15	0.65+(152) [※]	52+(152) [※]
飛散距離 (m)	18	9	20	265	377

※：() 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

③設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設等の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重(W_w)、気圧差による荷重(W_p)、及び設計飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重として、以下の式により算出する。

$$W_{T1}=W_p$$

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

ここで、

W_{T1} , W_{T2} :設計竜巻による複合荷重

W_w :設計竜巻の風圧力による荷重

W_p :設計竜巻の気圧差による荷重

W_M :設計飛来物による衝撃荷重

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

3.3.2. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。

(1) 評価対象施設等に常時作用する荷重、運転時荷重等

評価対象施設等に常時作用する荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり^{*1}、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、雹及び大雨である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は、以下のとおり設計竜巻荷重に包絡される。

なお、竜巻と同時に発生する自然現象については今後も継続的に新たな知見等の収集に取り組み、必要な事項については適切に反映を行う。

①雷

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

②雪

柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域においては、冬期、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の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされるため、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

③雹

雹は積乱雲から直径 5mm 以上の氷の粒^{※2}であり、仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合、その重量は約 0.5kg となる。10cm 程度の雹の終端速度は 59m/s^{※3}、運動エネルギーは約 0.9kJ であり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく、雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④大雨

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

※1：雷雨とメソ気象 大野久雄、東京堂出版

※2：気象庁ホームページ

※3：一般気象学 小倉義光、東京大学出版社

(3) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は、設計竜巻によって安全機能を損なわない設計とするため、設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故などの設計基準事故の起因とはならないことから、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから、設計基準事故時荷重と設計竜巻との組み合わせは考慮しない。

なお、評価対象施設等のうち設計基準事故荷重が生じ、竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外設備としては、軽油タンク及び非常用ディーゼル発電機燃料移送系が考えられるが、設計基準事故時においても、通常運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、竜巻と設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

3.4. 評価対象施設等の設計方針

評価対象施設等については、以下の設計方針の通り、設計荷重に対してその構造健全性を維持する設計とする。評価対象施設等以外の竜巻防護施設については、竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、若しくは、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保（例えば、外部電源喪失時における非常用ディーゼル発電機からの受電）すること、安全上支障のない期間に修復（例えば、気圧差により開放したブローアウトパネルに対する閉止措置）すること等の対応が可能な設計とすることにより、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。

(1) 許容限界

建屋・構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の

有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重により、発生する変形又は応力が以下の法令、規格、基準、指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

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

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

- ・ 日本工業規格
- ・ 日本機械学会の基準・指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）等

(2) 屋外設備（外部事象防護対象施設を内包する施設も含む。）

屋外設備は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて施設の補強、燃料移送ポンプ防護板の設置等の防護対策を講じる方針とする。

なお、外殻となる施設等による防護機能が期待できる屋内設備は、建屋又は構築物による防護により、設計荷重に対して安全機能を損なわない方針とする。

①軽油タンク

軽油タンクは、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物（鋼製材、角型鋼管（大）、砂利、足場パイプ、鋼製足場板のことをいう。以下、(2)において同じ。）による衝撃荷重、軽油タンクに常時作用する荷重、運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

②非常用ディーゼル発電機燃料移送系

非常用ディーゼル発電機燃料移送系のポンプ、配管及び弁は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、非常用ディーゼル発電機燃料移送系のポンプ、配管及び弁に常時作用する荷重、運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物に対して燃料移送ポンプ防護板の設置等の防護対策を行う。

④ 原子炉建屋，タービン建屋 海水熱交換器区域，コントロール建屋，廃棄物処理建屋

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

また，外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備に関する方針は(4)に示す。

(3) 外気との接続がある設備

設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，必要に応じて竜巻防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

①非常用ディーゼル発電機吸気系

非常用ディーゼル発電機吸気系は，原子炉建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。非常用ディーゼル発電機吸気系の建屋開口部は鋼製材，角型鋼管（大），砂利の影響高さ地上 10m より高いこと，足場パイプ，鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また，気圧差による荷重に対して，非常用ディーゼル発電機吸気系の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

②非常用ディーゼル発電機非常用送風機

非常用ディーゼル発電機非常用送風機は，原子炉建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。非常用ディーゼル発電機非常用送風機を設置している区画の建屋開口部は鋼製材，角型鋼管（大），砂利の影響高さ地上 10m より高いこと，足場パイプ，鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また，気圧差による荷重に対して，非常用ディーゼル発電機非常用送風機の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

③換気空調系（ディーゼル発電機電気区域換気空調系，中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御・電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系）

換気空調系は，各建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。換気空調系の地上 10m 以下の建屋開口部には設計飛来物の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うこと，地上 10m より高い建屋開口部には足場パイプ，鋼製足場板の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行

うことを考慮すると、設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また、気圧差による荷重に対して、換気空調系の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

(4) 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備

設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

- ① 原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備、原子炉建屋 4 階設置設備（使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む））、タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 非常用電気品室 (A) 設置設備、タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 階段室等設置設備

原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備、タービン建屋海水熱交換器区域 1 階 非常用電気品室 (A) 設置設備、タービン建屋海水熱交換器区域 1 階 階段室等設置設備は、設計飛来物の衝突により、開口部の開放又は開口部建具の貫通が発生することを考慮し、開口部建具の補強等の防護対策を行う。

原子炉建屋 4 階設置設備（使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む））の区画の建屋開口部は鋼製材、角型鋼管（大）、砂利の影響高さ地上 10m より高いこと、足場パイプ、鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると、設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

(5) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

設計荷重に対する当該施設の健全性評価を行い、必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

- ① 主排気筒、5 号炉主排気筒

主排気筒は、設置高さが地上 10m より高いことを考慮すると、鋼製材、角型鋼管（大）、砂利による衝撃荷重は作用しない。また、足場パイプ、鋼製足場板による衝撃荷重及び風圧力による荷重に対して、転倒により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

5 号炉主排気筒は、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、転倒により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

- ② 5 号炉タービン建屋、サービス建屋

5 号炉タービン建屋及びサービス建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重に対して、転倒により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

- ③ 原子炉建屋天井クレーン、燃料交換機

原子炉建屋天井クレーン、燃料交換機を内包する原子炉建屋の開口部は、鋼製材、角型鋼管（大）、砂利の影響高さ地上 10m より高いこと、足場パイプ、鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことにより、倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

④非常用ディーゼル発電機排気管、非常用ディーゼル発電機排気消音器、ミスト管
非常用ディーゼル発電機排気管、非常用ディーゼル発電機排気消音器、ミスト管は、設置高さが地上 10m より高いことを考慮すると、鋼製材、角型鋼管（大）、砂利による衝撃荷重は作用しない。足場パイプ、鋼製足場板の衝突による損傷を考慮して、補修が可能な設計とすることにより、非常用ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさない設計とする。また、風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

⑤ 竜巻随件事象の影響により外部事象防護対象施設の機能喪失させる可能性がある施設（溢水により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性のある設備、火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備、外部電源）

竜巻随件事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設の設計方針は、3.5 に記載する。

3.5. 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象は、過去の竜巻被害状況及び柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置から、想定される事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行い竜巻防護施設が安全機能を損なわれないことを確認した。【添付資料 3.4】

(1) 火災

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器、屋外の危険物タンク等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建屋内については、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部が、地上高 10m より高い場合には足場パイプ、鋼製足場板の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うこと、地上高 10m より低い場合には設計飛来物の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことから、飛来物が侵入することはない。

建屋外については、屋外にある危険物タンク等からの火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえて外部火災影響評価において、航空機墜落や敷地内の危険物タンク火災が発生した場合においても、安全上重要な設備が収納されている原子炉建屋、コントロール建屋や屋外安全系機器に影響を及ぼさないことを確認している。

以上より、竜巻による火災により外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

(2) 溢水

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の溢水源に衝突する場合、屋外タンクに飛来物が衝突する場合の溢水が想定される。

建屋内については、外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部が、地上高 10m より高い場合には足場パイプ、鋼製足場板の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うこと、地上高 10m より低い場合には設計飛来物の衝突に対する竜巻防護ネット等の設置等の防護対策を行うことから、飛来物が侵入することはない。

内部溢水影響評価において、地震時の屋外タンクの破損を想定し、原子炉建屋やコントロール建屋の水密扉や建屋隙間部の止水措置等により、地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさないことを確認している。

竜巻による飛来物で屋外タンク等が損傷して発生する溢水に対しては、上記に包絡されることから、外部事象防護対象施設の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より、竜巻による溢水により外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

(3) 外部電源喪失

竜巻により、送電網等が損傷して外部電源喪失に至った場合、原子炉の負荷喪失となり、所内単独運転に移行して事象収束する可能性があるが、移行できず原子炉トリップした場合においても、自動的に非常用ディーゼル発電機から受電できるため、外部電源喪失の影響がなく外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について

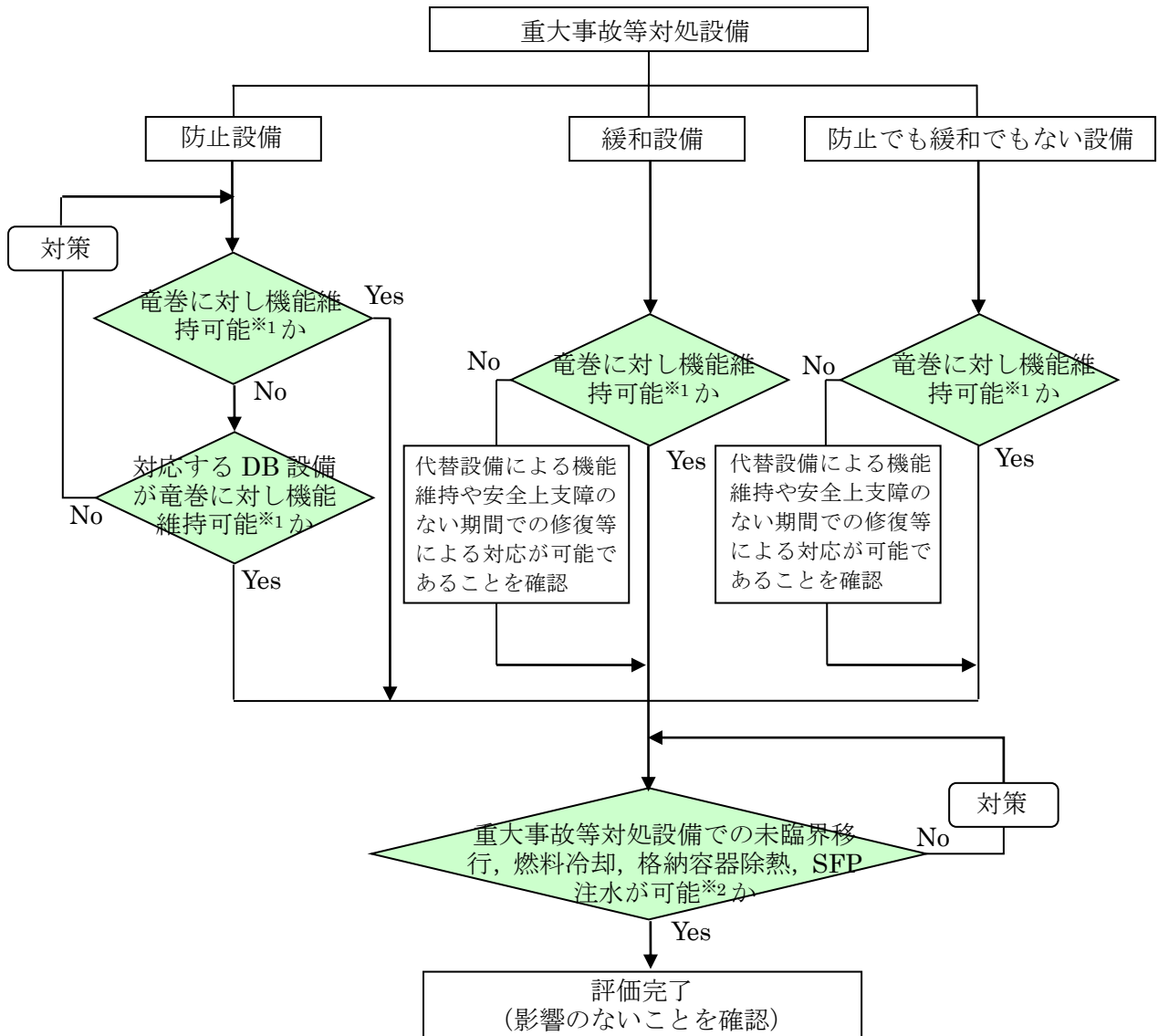
第43条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準事故対処設備の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処施設の安全機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認する。

重大事故等対処設備の機能維持は、以下の方針に従い評価を実施する。

- (1) 重大事故防止設備は、竜巻によって、設計基準事故対処設備の安全機能と同時にその機能が損なわれる恐れのないこと
- (2) 重大事故等対処設備であって、重大事故防止設備でない設備は、代替設備もしくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること
- (3) 竜巻が発生した場合においても、重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能，燃料冷却機能，格納容器除熱機能，使用済燃料プール注水機能）が維持できること（竜巻により重大事故等対処設備と設計基準事故対処設備の機能が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）

評価フローを図1.1.1，評価結果を表1.1.1に示す。また，図1.1.2に竜巻襲来時における重大事故等対処設備と代替手段の3点での位置的分散による安全機能維持の例（低圧代替注水系の場合）を示す。

表1.1.1より，設計竜巻によって，重大事故等対処施設の安全機能が喪失した場合においても，位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から，代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認した。



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋（原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋，廃棄物処理建屋）の影響評価を実施し，安全機能が維持されるかを確認。

※2：竜巻により重大事故等対処設備と設計基準事故対処設備が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図 1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価フロー

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

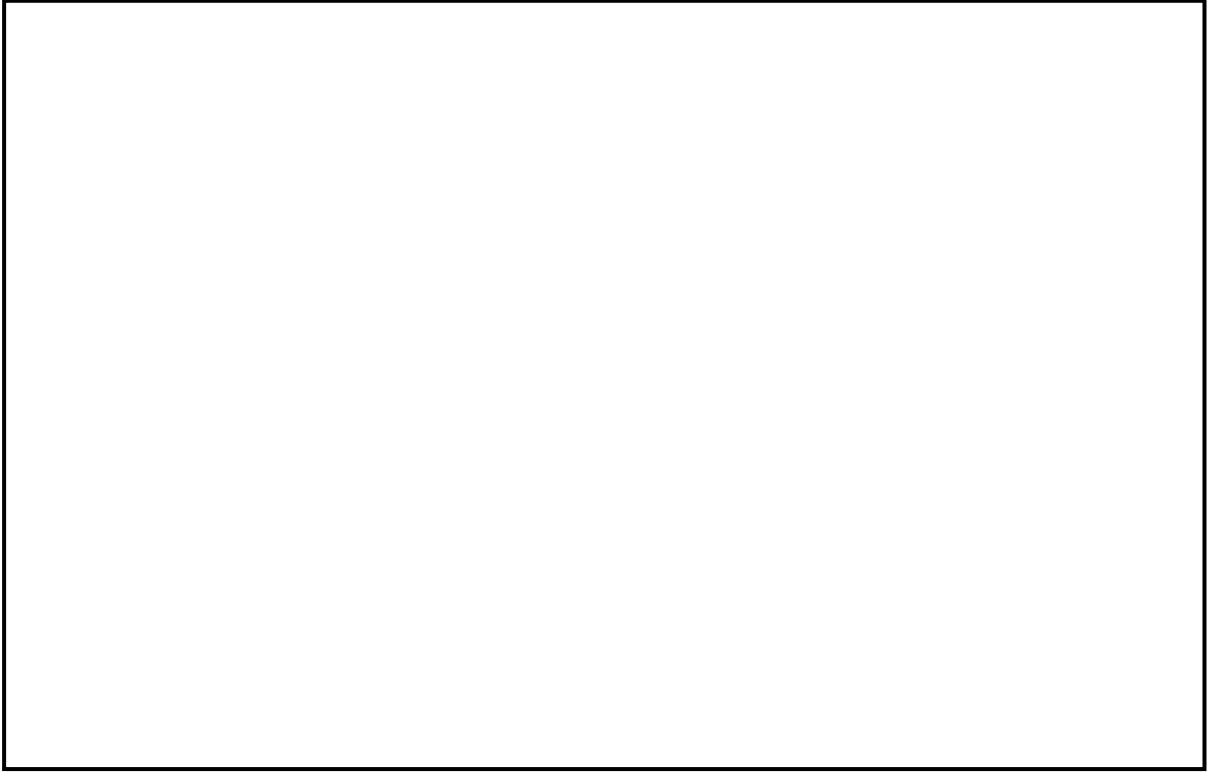


図 1.1.2 竜巻襲来時における代替手段による安全機能維持の例
(低圧代替注水系の場合)

表1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果（1／5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	竜巻	
				評価	防護方法
第37条（重大事故等の拡大の防止等）	—	—	—	—	—
第38条（重大事故等対処施設の地盤）	—	—	—	—	—
第39条（地震による損傷の防止）	—	—	—	—	—
第40条（津波による損傷の防止）	—	—	—	—	—
第41条（火災による損傷の防止）	—	—	—	—	—
第42条（特定重大事故等対処施設）	特定重大事故等対処施設	一申請範囲外		—	—
第43条（重大事故等対処設備）	ホイールローダ	防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
第44条（緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備）	代替制御棒挿入機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替冷却材再循環ポンプ・トリップ機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入系	防止設備	R/B	○	建屋内
第45条（原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	原子炉隔離時冷却系	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	高圧代替注水系	防止設備	R/B	○	建屋内
第46条（原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備）	代替自動減圧機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	減圧制御〔自動減圧系の起動阻止スイッチ〕	防止設備	R/B	○	建屋内
	高圧窒素ガスボンベ（供給系配管含む）	防止設備	R/B	○	建屋内
第47条（原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	低圧代替注水系（常設）〔MWCポンプ〕	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	低圧代替注水系（可搬型）〔消防車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（低圧代替注水系（常設））
	低圧代替注水系（可搬型）（常設箇所）〔消防車接続口、配管等〕	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（低圧代替注水系（常設））
	低圧代替注水系（常設箇所）〔原子炉圧力容器（注入先）、配管等〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は竜巻による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
 —：他の項目にて整理

表1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果（2／5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	竜巻		
				評価	防護方法	
第48条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）	代替原子炉補機冷却系（可搬部）〔代替Hx設備一式〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）	
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）〔代替Hx接続口、配管等〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）	
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）〔原子炉補機冷却系配管、Hx等〕	防止設備・緩和設備	R/B T/B	○	建屋内	
	真空破壊弁（S/C→D/W）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	耐圧強化ベント系（W/W及びFD/W）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	格納容器圧力逃がし装置 〔フィルタベント〕	→50条に記載（うち、防止設備）		—	—	
	代替格納容器圧力逃がし装置 〔地下式フィルタベント〕	→50条に記載（うち、防止設備）		—	—	
第49条（原子炉格納容器内の冷却等のための設備）	代替格納容器スプレイ冷却系（MWC代替スプレイ）	防止設備・緩和設備	Rw/B R/B	○	建屋内	
第50条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）	格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置、よう素フィルタ、配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外	○	代替設備（耐圧強化ベント、代替循環冷却）
		フィルタベントライン計装〔水素濃度計、放射線モニタ等〕	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	R/B, 屋外R/B廻り	○	建屋内（格納容器圧力逃がし装置側水素濃度計）及び代替設備（耐圧強化ベント用放射線検出器）
		格納容器圧力逃がし装置スクラバ水ph制御設備（可搬型）	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	建屋内
		窒素供給装置（可搬型）	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（耐圧強化ベント、代替循環冷却）
	代替格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置、よう素フィルタ、配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外（地下設置）	○	影響なし（屋内・地下）
		代替フィルタベントライン計装〔水素濃度計、放射線モニタ等〕	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外（地下設置）	○	影響なし（屋内・地下）
		代替格納容器圧力逃がし装置薬液タンク	緩和設備	屋外（地下）	○	影響なし（地下）
		窒素供給装置（可搬型）	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（耐圧強化ベント、代替循環冷却）
	代替循環冷却	復水移送ポンプ	→47, 49条に記載（うち、緩和設備）		—	—
		代替Hx設備一式（可搬部）、配管等	→48条に記載（うち、緩和設備）		—	—
		代替循環冷却用設備（常設）	緩和設備	R/B, T/B, Rw/B	○	建屋内
		真空破壊弁（S/C→D/W）	→48条に記載（うち、緩和設備）		—	—
第51条（原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備）	格納容器下部注水系（常設）	緩和設備	Rw/B	○	建屋内	
	格納容器下部注水系（可搬型）〔消防車〕	緩和設備	屋外	○	分散配置及び代替設備（格納容器下部注水系（常設））	
	格納容器下部注水系（可搬型）（常設箇所）〔消防車接続口、配管等〕	緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（格納容器下部注水系（常設））	
	格納容器下部注水系（常設箇所） 〔復水補給水系配管等〕	緩和設備	R/B Rw/B	○	建屋内	
	格納容器下部注水系（常設箇所） 〔原子炉格納容器（注入先）〕	→49条に記載（うち、緩和設備）		—	—	

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理

表1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果（3／5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	竜巻	
				評価	防護方法
第52条（水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備）	格納容器内の水素濃度監視設備 〔格納容器水素濃度系（SA）格納容器酸素濃度計〕	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置		→50条に記載	—	—
	代替格納容器圧力逃がし装置		→50条に記載	—	—
	耐圧強化ベント系（W/W）		→48条に記載（窒素供給装置（可搬型）は50条に記載）	—	—
第53条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）	耐圧強化ベント系〔耐圧強化ベント系放射線モニタ、フィルタ装置水素濃度計〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	静的触媒式水素再結合器〔PAR〕	緩和設備	R/B	○	外殻となる建屋が開口する場合には同機能は不要
	原子炉建屋水素濃度監視設備	緩和設備	R/B	○	外殻となる建屋が開口する場合には同機能は不要
第54条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）	原子炉建屋水素濃度計	緩和設備	R/B	○	外殻となる建屋が開口する場合には同機能は不要
	燃料プール代替注水系（可搬型）〔消防車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（燃料プール代替注水系（常設））
	燃料プール代替注水系（可搬型）（常設箇所）〔消防車接続口、配管等〕	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（燃料プール代替注水系（常設））
	燃料プール代替注水系（常設箇所）〔配管、弁等〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プールの水位、プール水温度	防止設備・緩和設備	R/B	○	分散配置及び代替設備（FPC温度計）
	使用済燃料貯蔵プール放射線モニタ	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備（FPC温度計）
第55条（工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備）	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ	防止でも緩和でもない設備	R/B	○	代替設備（FPC温度計）
	放水設備一式 〔大容量送水車、放水砲〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	放射性物質吸着剤	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	海洋への拡散抑制設備 〔汚濁防止膜〕	緩和設備	屋外固体廃棄物処理建屋廻り	○	補修を実施
	海洋への拡散抑制設備 〔汚濁防止膜設置のための小型船舶〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
第56条（重大事故等の取束に必要となる水の供給設備）	泡消火設備 〔泡原液搬送車、泡原液混合装置〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	復水貯蔵槽	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	サプレッション・プール	緩和設備	R/B	○	建屋内
	防火水槽	—（代替淡水源）	屋外（地下埋設）	○	影響なし（地下）
	淡水貯水池	—（代替淡水源）	淡水貯水池	○	代替設備（復水貯蔵槽）
	淡水貯水池～ 防火水槽移送ホース	防止設備・緩和設備	地下敷設	○	影響なし（地下）
	海水	—	屋外	—	—
海水取水ポンプ、海水ホース （可搬型代替注水ポンプ）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（淡水貯水池）	
		→47条に記載	—	—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は各竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は各竜巻による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理

表1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果（4／5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	竜巻	
				評価	防護方法
第57条（電源設備）	常設代替交流電源設備〔GTG一式〕	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機保管場所	○	分散配置及び代替設備（非常用D/G）
	常設代替交流電源設備〔第二GTG一式〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	分散配置及び代替設備（非常用D/G）
	常設代替交流電源設備〔非常用高圧母線C・D系〕	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替交流電源設備〔電源車〕（移動式変圧器含む）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（非常用D/G）
	可搬型代替交流電源設備（常設箇所）〔電源車接続箇所〕	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（非常用D/G）
	常設代替直流電源設備〔AM用直流125V蓄電池〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備〔蓄電池A系、A-2系〕	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備〔電源車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（直流電源設備）
	可搬型代替直流電源設備〔免震棟保管バッテリー〕	防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（直流電源設備）
	代替所内電源盤	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	6-7号炉電力融通ケーブル	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	（燃料設備（D/G軽油タンク））	→設計基準対象施設における評価対象施設		—	—
	（燃料設備（タンクローリー））	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（D/G軽油タンク）
第58条（計装設備）	重大事故等発生時の計装（SA時計装一式） 〔RPV温度・圧力・水位〕 〔RPV・格納容器への注水量〕 〔格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・酸素濃度・放射線量率〕 〔未臨界監視〕 〔最終ヒートシンクによる冷却状態の確認〕 〔格納容器バイパス監視〕 〔水源の確保〕 〔原子炉建屋内水素濃度〕	防止設備・緩和設備	C/B R/B Rw/B	○	建屋内
第59条（原子炉制御室）	中央制御室及び生体遮蔽	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室居住性（空調機）	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室及び生体遮へい	緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室加圧用ポンペ	緩和設備	C/B	○	建屋内

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理

表1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果（5 / 5）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設備設置箇所	自然現象による影響	
					竜巻	
					評価	防護方法
第60条（監視測定設備）	可搬型モニタリング・ポスト		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（モニタリングポスト）
	放射線サーベイ機器〔可搬型ダスト・よう素サンブラ、GM汚染サーベイメータ、NaIシンチレーションサーベイメータ、電離箱サーベイメータ、ZnSシンチレーションサーベイメータ〕		防止でも緩和でもない設備	免震重要棟 R/B（3号炉）	○	建屋内
	小型船舶		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	可搬型気象観測装置		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（気象観測装置）
	モニタリング・ポスト用発電機		防止でも緩和でもない設備	屋外	○	補修を実施
第61条（緊急時対策所）	緊急時対策所〔KK5TSC〕及び生体遮蔽		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	緊急時対策所〔KK5TSC〕居住性（空調機）		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所用可搬電源設備		防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備（予備機（大津側高台保管場所））
	プラントのデータ表示システム〔KK5TSCデータ伝送装置、SPDS表示装置等〕		防止でもない緩和でもない設備	R/B（3号炉）（屋外設備含む）	○	建屋内（屋外設備については代替設備（有線系）にて機能維持可能）
	緊急時対策所〔免震重要棟TSC〕及び生体遮蔽		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（5号炉緊急対策所）
	緊急時対策所（免震重要棟TSC）居住性（空調機）		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（5号炉緊急対策所）
	免震重要棟ガスタービン発電機		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（5号炉緊急対策所）
	プラントのデータ表示システム〔免震重要棟TSCデータ伝送装置、SPDS表示装置等〕		防止でも緩和でもない設備	免震重要棟（屋外設備含む）	○	建屋内（屋外設備については代替設備（有線系）にて機能維持可能）
	（通信連絡設備）		→62条に記載		—	—
第62条（通信連絡を行うために必要な設備）	所内通信	携帯型音声呼出電話設備	防止設備・緩和設備	R/B、T/B、C/B、Rw/B	○	建屋内
	所内外通信	衛星電話設備、無線連絡設備（所内通信）	防止でも緩和でもない設備	C/B、免震棟、R/B（5号炉）（屋外設備含む）	○	建屋（C/B、R/B（5号炉））内設備は影響なし。屋外設備は分散配置された代替設備（有線系、無線系、衛星系）により機能維持可能
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備、データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	C/B、免震棟、R/B（5号炉）（屋外設備含む）	○	建屋（C/B、R/B（5号炉））内設備は影響なし。屋外設備については分散配置された代替設備（有線系、無線系、衛星系）により機能維持可能

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
 —：他の項目にて整理

1.2 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について

柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉における竜巻防護施設のうち、評価対象施設の抽出フローを図1.2.1、抽出結果を表1.2.1に示す。具体的には、以下のStepにて抽出した。

Step1：安全重要度クラス1，2及びクラス3に属する構築物，系統及び機器のうち，外部事象防護対象施設*を抽出する。

※：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（原子炉停止，炉心冷却，使用済燃料プール冷却に必要な異常の発生防止の機能，若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備）又はそれを内包する建屋を選定する。

また，上記以外の安全施設については，竜巻及びその随件事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な場合，安全機能を損なわないことから評価完了とする。

Step2：Step1で抽出された設備の設置場所を確認し，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）を評価対象施設とする。

Step3：屋内設備だが外気との接続があるため，竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける換気空調設備等を評価対象施設とする。

Step4：竜巻防護施設が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待できないものを評価対象とする。なお，外殻による防護に期待できるかは，建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果より，設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から，設備を抽出する。

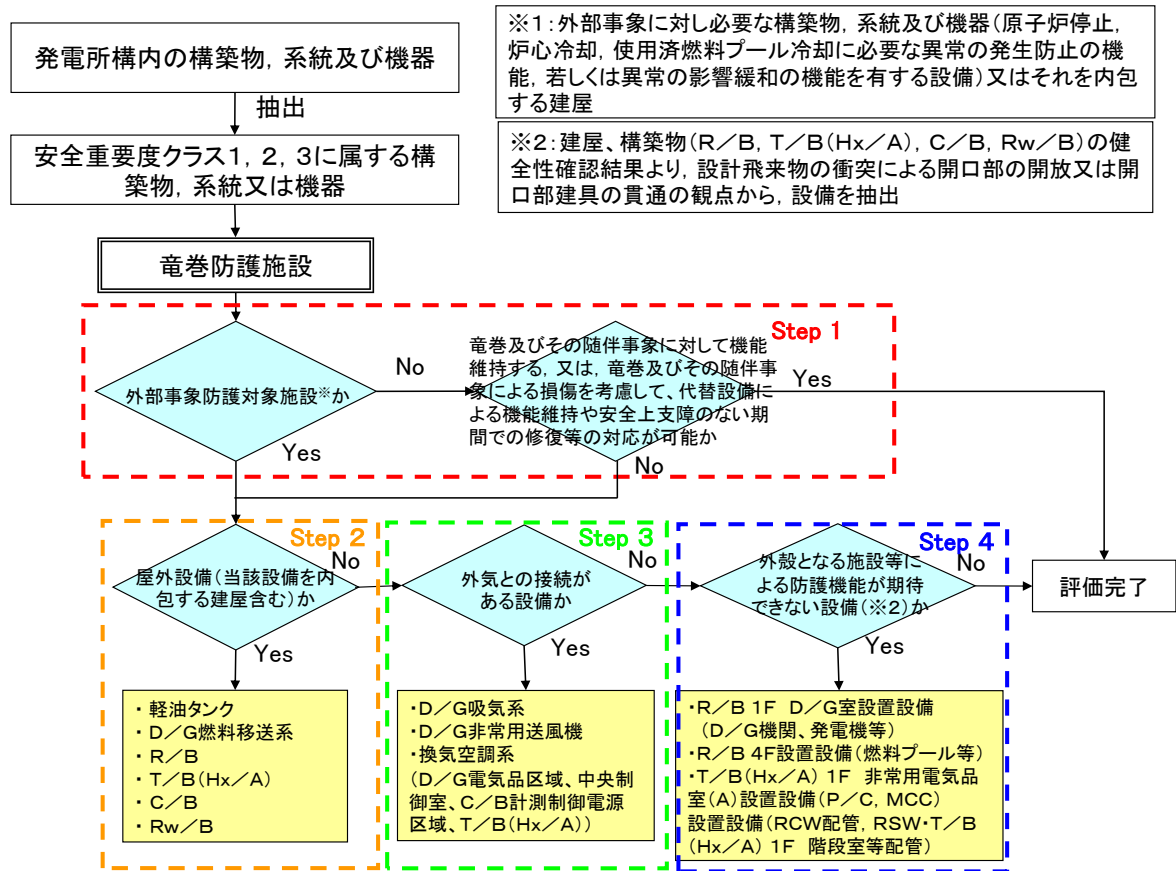


図 1.2.1 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

表1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（1 / 4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能※1	配置場所	Step				評価対象施設	
				外部事象防護対象施設	竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、又は、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	外気との接続がある設備か		外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	・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	○	-	×	×	×	-
	過剰反応度の印加防止機能	・制御棒カップリング、 ・制御棒駆動機構カップリング	R/B	○	-	×	×	×	-
	炉心形状の維持機能	・炉心支持構造物 （炉心シュラウド、シュラウドサポート、上部格子板、炉心支持板、制御棒案内管） ・燃料集合体	R/B	○	-	×	×	×	-
MS-1	原子炉の緊急停止機能	・原子炉停止系の制御棒による系（制御棒、制御棒駆動系）	R/B	○	-	×	×	×	-
	未臨界維持機能	・原子炉停止系（制御棒駆動系、ほう酸水注入系）	R/B	○	-	×	×	×	-
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	・逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	R/B	○	-	×	×	×	-
	原子炉停止後の除熱機能	・残留熱を除去する系統（残留熱除去系、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、逃がし安全弁、自動減圧系）、 ・サブプレッションプール	R/B	○	-	×	×	×	-
	炉心冷却機能	・復水貯蔵槽	Rw/B	○	-	×	×	×	-
		・非常用炉心冷却系（残留熱除去系、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、自動減圧系）、 ・サブプレッションプール	R/B	○	-	×	×	×	-
	放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能	・脱水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	○	-	×	×	×	-
		・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管 ・残留熱除去系（原子炉格納容器スプレイ冷却モード）	R/B	○	-	×	×	×	-
		・原子炉建屋 ・非常用ガス処理系（排風機、乾燥装置、フィルタ装置）	R/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	○
		・非常用ガス処理系（原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒頂上までの配管、弁）	R/B 屋外	×	○ （風荷重に対し影響無し、飛来物に対し損傷した場合には補修を実施）	-	-	-	-
		・可燃性ガス濃度制御系	R/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-
		・主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能）	屋外	×	○ （風荷重に対し影響無し、飛来物に対し損傷した場合には補修を実施）	-	-	-	-
工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	・安全保護系	C/B	○	-	×	×	×	-	
安全上特に重要な関連機能	・非常用所内電源系（ディーゼル機関、発電機、始動用空気系、冷却水系）	R/B	○	-	×	×	○	○	
	・非常用所内電源系（ディーゼル発電機備吸気系）	R/B	○	-	×	○	-	○	
	・D/G本体設備に係わる空調系（D/G非常用送風機）	R/B	○	-	×	○	-	○	
	・非常用所内電源系（発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路）	R/B, C/B, T/B	○	-	×	×	○ ^{※2}	○	
	・軽油タンク	屋外	○	-	○	-	-	○	
	・非常用ディーゼル発電機燃料移送系	屋外	○	-	○	-	-	○	
	・中央制御室及びその遮へい	C/B	○	-	×	×	×	-	
	・中央制御室換気空調系	C/B	○	-	×	○	-	○	
・原子炉補機冷却水系 ・原子炉補機冷却海水系	T/B	○	-	×	×	○ ^{※3}	○		
・直流電源系 ・計測制御電源系	R/B, C/B	○	-	×	×	×	-		

※1 間接関連系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

※2 K6, 7 Hx/A 1F 非常用電気品室(A)内のP/C, MCCは、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

※3 K6 Hx/A 1F 階段室内のRCW,RSW配管は、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

表1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（2／4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能※1	配置場所	Step				評価対象施設	
				外部事象 防護対象施設	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、又は、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	Step3 外気との接続がある設備か		Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能 (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。)	・原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分) ・主蒸気系	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する機能	・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	○	-	×	×	×	-
		・使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む)	R/B	○	-	×	×	○	○
		・新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能) ・放射性気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホールドアップ装置)	R/B T/B	○ ×	- ○ (屋内設備のため、影響なし)	×	×	×	- -
	燃料を安全に取り扱う機能	・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	・逃がし安全弁 (吹き止まり機能に関連する部分)	R/B	○	-	×	×	×	-	
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	・非常用所内電源系空調 (D/G制御室空調系 (DG/Z送風機・排風機))	R/B	○	-	×	○	-	○
		・非常用所内電源系空調 (C/B計測制御電源盤区域送風機・排風機)	C/B	○	-	×	○	-	○
	燃料プール水の補給機能	・非常用所内電源系空調 (Hx/A非常用送風機)	T/B (Hx/A)	○	-	×	○	-	○
		・残留熱除去系 ・放射性気体廃棄物処理系 (オフガス系) 隔離弁	R/B T/B	○ ×	- ○ (屋内設備のため、影響なし)	×	×	×	- -
	放射性物質放出の防止機能	・排気筒 (非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分)	屋外	×	○ (風荷重に対し影響無し、飛来物に対し損傷した場合には補修を実施)	-	-	-	-
		・燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁 ・原子炉建屋原子炉棟	R/B	○ ×	- ○ (設計荷重に対し影響なし、必要に応じてプラントを停止し、フロークバネの閉止を実施)	×	×	○	○ -
		・非常用ガス処理系	R/B	×	○ (風荷重に対し影響無し、飛来物に対し損傷した場合には補修を実施)	-	-	-	-
	事故時のプラント状態の把握機能	・事故時監視計器の一部 (格納容器エリアモニタ)	C/B	○	-	×	×	×	-
制御室外からの安全停止機能	・制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	R/B	○	-	×	×	×	-	

※1 間接関連系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

表1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（3／4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能※1	配置場所	Step1		Step2	Step3	Step4	評価対象施設
				外部事象 防護対象施設	竜巻及びその随伴事象に対して機能 維持する、又は、竜巻及びその随伴 事象による損傷を考慮して、代替設 備による機能維持や安全上支障のな い期間での修復等の対応可能か	屋外設備（当 該設備を内包 する建屋含 む）か	外気との接続が ある設備か	外殻となる施設等 による防護機能が 期待できない設備 か	
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2以外のもの)	・原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の 小口径配管、弁	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	原子炉冷却材の循環機能	・原子炉再循環系	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	放射性物質の貯蔵機能	・サブプレッションプール水サージタンク	屋外	×	○ (運用停止中のため、影響なし)	-	-	-	-
		・復水貯蔵槽	Rw/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・液体廃棄物処理系	Rw/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・固体廃棄物処理系	Rw/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶)	固体廃棄物貯蔵庫	×	○ (補修を実施(放射性物質の拡散防止につ いて適切な処置を実施))	-	-	-	-
		・固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	×	○ (補修を実施(放射性物質の拡散防止につ いて適切な処置を実施))	-	-	-	-
		・新燃料貯蔵庫 ・新燃料貯蔵ラック	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	電源供給機能 (非常用を除く)	・タービン ・発電機及び励磁装置 ・復水系 ・給水系 ・循環水系	T/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・送電線	屋外	×	○ (代替設備(非常用ディーゼル発電機)によ り機能維持可能)	-	-	-	-
		・変圧器	屋外	×	○ (代替設備(非常用ディーゼル発電機)によ り機能維持可能)	-	-	-	-
		・開閉所	開閉所	×	○ (代替設備(非常用ディーゼル発電機)によ り機能維持可能)	-	-	-	-
	プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く)	・原子炉制御系 (RWM含む) ・原子炉核計装 ・原子炉プロセス計装	C/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	プラント運転補助機能	・補助ボイラー設備	補助ボイラー建屋	×	○ (補修を実施)	-	-	-	-
		・計装用圧縮空気系 ・原子炉補機冷却水系 (MS-1関連以外) ・タービン補機冷却水系、タービン補機冷却海水系	T/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・復水補給水系	Rw/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放射防 止機能	・燃料被覆管	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	原子炉冷却材の浄化機能	・原子炉冷却材浄化系	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・復水浄化系	T/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-

※1 間接関係系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

表 1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（4 / 4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能 ^{※1}	配置場所	外部事象 防護対象施設	Step1	Step2	Step3	Step4	評価対象施設		
					竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、又は、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	外気との接続がある設備か	外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か			
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能	・逃がし安全弁（逃がし弁機能）	R/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-		
		・タービンバイパス弁	T/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-		
	出力上昇の抑制機能	・原子炉冷却材再循環系（再循環ポンプトリップ機能）	R/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-		
		・制御棒引抜監視装置									
	原子炉冷却材の補給機能	・制御棒駆動水圧系 ・原子炉隔離時冷却系	R/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-		
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	・原子炉冷却材再循環ポンプMGセット	Rw/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-		
	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	免震重要棟	・原子力発電所緊急時対策所	R/B	×	○ （代替設備（5号炉緊急対策所）により機能維持可能）	-	-	-	-	
				R/B(5号炉)	×	○ （頑健な建屋に防護されているため、影響なし）	-	-	-	-	
		通信 連絡 設備	所外 通信	・無線系 ・有線系	マイクロ波 無線鉄塔	×	○ （分散配置された代替設備（衛星系（5号炉）、有線系）により機能維持可能）	-	-	-	-
					送電鉄塔	×	○ （分散配置された代替設備（衛星系、無線系）により機能維持可能）	-	-	-	-
			所内外 通信	・有線系 ・無線系 ・衛星系	免震重要棟 （屋外設備含む）	×	○ （代替設備（衛星系（5号炉）、無線系（5号炉）、有線系）により機能維持可能）	-	-	-	-
					R/B（5号炉） （屋外設備含む）	×	○ （建屋内設備は影響なし。 屋外設備は代替設備（衛星系（免震重要棟）、無線系（マイクロ波無線鉄塔、免震重要棟）、有線系）により機能維持可能）	-	-	-	-
			所内 通信	・有線系	各建屋 （地下設備含む）	×	○ （建屋（免震重要棟除く）内及び地下布設のため影響なし）	-	-	-	-
					屋外設備	×	○ （復旧（PHS基地局）により機能維持可能）	-	-	-	-
		・放射線監視設備（モニタリングポスト）	屋外	×	○ （代替設備（可搬型モニタリング設備）により機能維持可能）	-	-	-	-		
		・放射線監視設備（放射線観測車）	可搬型SA設備保管場所	×	○ （代替設備（放射線観測車の代替測定装置）により機能維持可能）	-	-	-	-		
		・事故時監視計器の一部	R/B	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-		
			気象観測装置	×	○ （代替設備（可搬型気象観測装置）により機能維持可能）	-	-	-	-		
	・消火系	給水建屋 水処理建屋	×	○ （代替設備（防火水槽等）により機能維持可能）	-	-	-	-			
		ろ過水タンク （屋外配管含む）	×	○ （代替設備（防火水槽等）により機能維持可能）	-	-	-	-			
泡消火設備		×	○ （代替設備（消防車）により機能維持可能）	-	-	-	-				
・安全避難通路、非常照明	各建屋内	×	○ （屋内設備のため、影響なし）	-	-	-	-				

※1 間接関連系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

1.3 耐震Sクラス設備について

竜巻防護施設のうち評価対象施設としては、「安全重要度クラス1, 2, 3に属する構築物, 系統及び機器」より抽出をしているが, 「基準地震動および耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備(系統, 機器)及び建屋・構築物(以下, 「耐震Sクラス設備等」という。)のうち, 竜巻の影響を受ける可能性がある設備についても抽出し, 追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。

図1.3.1に耐震Sクラス設備等のうち評価対象施設の抽出フローを示す。

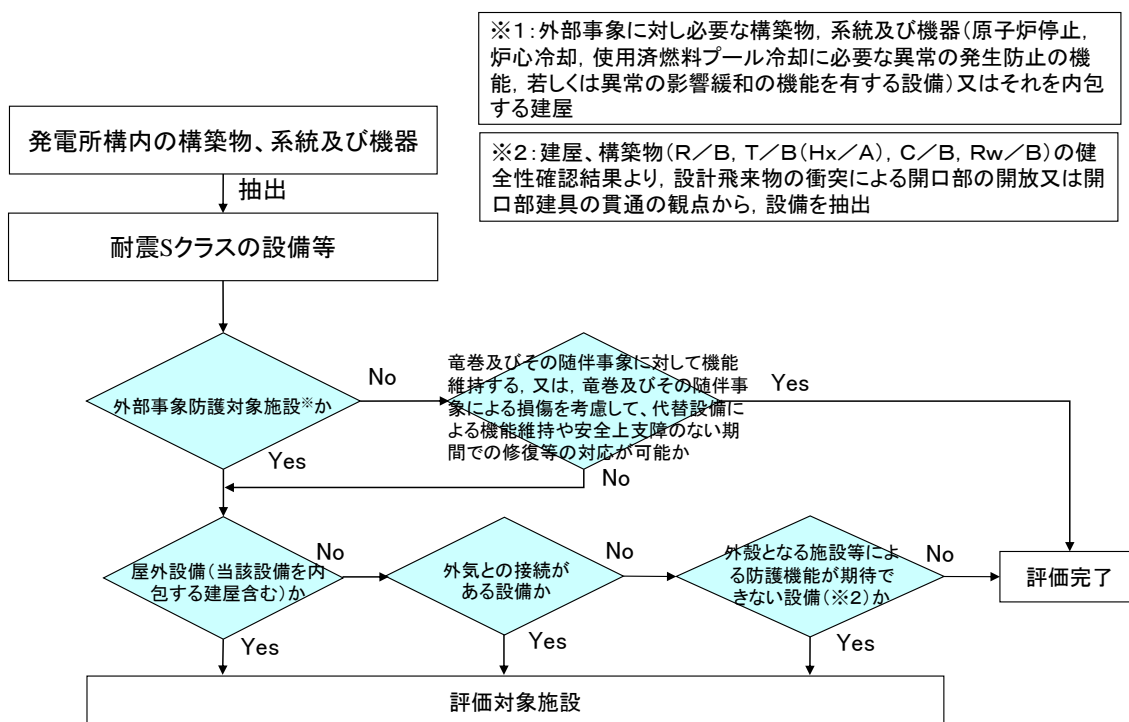


図 1.3.1 耐震 S クラス設備等のうち評価対象施設の抽出フロー

表 1.3.1 耐震 S クラス設備等のうち評価対象施設の抽出フロー（1 / 2）

○:Yes, ×:No, -:該当せずもしくは評価完了

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物、系統又は機器	配置場所	Step1		Step2	Step3	Step4	評価対象施設
					外部事象防護対象施設	電巻及びその随伴事象に対して機能維持する、又は、電巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	屋外設備か	外気との接続がある設備か	外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	
Sクラス	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	主要設備	・原子炉圧力容器 ・原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁	R/B	○	-	×	×	×	-
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	C/B	○	-	×	×	×	-
		直接支持構造物	・原子炉圧力容器支持スカート部 ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, C/B	○	-	×	×	×	-
	使用済燃料を貯蔵するための施設	主要設備	・使用済燃料プール ・使用済燃料貯蔵ラック	R/B	○	-	×	×	○	○ (抽出済)
		補助設備	・燃料プール水補給設備（残留熱除去系） ・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	R/B	○	-	×	×	○	○ (抽出済)
		計装設備	・計装設備	C/B	○	-	×	×	×	-
		直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, C/B	○	-	×	×	×	-
	原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設	主要設備	・制御棒、制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系（スクラム機能に関する部分）	R/B	○	-	×	×	×	-
		補助設備	・炉心支持構造物 ・チャンネル・ボックス ・電気計装設備	R/B, C/B	○	-	×	×	×	-
		直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, C/B	○	-	×	×	×	-
	原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・原子炉隔離時冷却系 ・高圧炉心注水系 ・冷却水源としてのサブプレッション・チェンバ	R/B	○	-	×	×	×	-
		補助設備	・原子炉補機冷却系 ・炉心支持構造物 ・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む） ・計装設備 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	T/B, R/B, R/B, C/B, R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	○*1	○ (抽出済) ○ (抽出済) ○ (抽出済)
直接支持構造物		・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	○	○ (抽出済)	
直接支持構造物		・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	×	-	
直接支持構造物		・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	×	-	
直接支持構造物		・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	×	-	
原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・非常用炉心冷却系（高圧炉心注水系、原子炉隔離時冷却系、残留熱除去系、自動減圧系） ・冷却水源としてのサブプレッション・チェンバ	R/B	○	-	×	×	×	-	
	補助設備	・原子炉補機冷却系 ・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む） ・計装設備 ・中央制御室の遮へい ・中央制御室換気空調系 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	T/B, R/B, C/B, C/B, C/B, R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	○*1	○ (抽出済) ○ (抽出済) ○ (抽出済) ○ (抽出済)	
	直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	○	○ (抽出済)	
	直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	×	-	
	直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	×	-	
	直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B, T/B, C/B	○	-	×	×	×	-	

※1 K6 Hx/A 1F 階段室内のRCW,RSW配管は、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

表 1.3.1 耐震 S クラス設備等のうち評価対象施設の抽出フロー (2 / 2)

○:Yes、×:No、-:該当せずもしくは評価完了

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物、系統又は機器	配置場所	Step1		Step2	Step3	Step4	評価対象施設	
					外部事象 防護対象施設	竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する、又は、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	屋外設備か	外気との接続がある設備か	外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か		
Sクラス	放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部拡散を抑制するための施設であり、Sクラス(IV)以外の施設	主要設備	・残留熱除去系 (格納容器スプレイ冷却モード) ・冷却水源としてのサブプレッション・チェンバ	R/B	○	-	×	×	×	-	
			・可燃性ガス濃度制御系	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-	
			・原子炉建屋原子炉区域	R/B	×	○ (設計荷重に対し影響なし 必要に応じプラントを停止し、 フューアが 社の閉止を実施)	-	-	-	-	
			・非常用ガス処理系及び排気口	R/B、屋外	×	○ (風荷重に対し影響無し、飛来物に対し損傷した場合には補修を実施)	-	-	-	-	
			・原子炉格納容器圧力抑制装置 (ダイヤフラムフロア、ベント管)	R/B	○	-	×	×	×	×	
		補助設備	・原子炉補機冷却系	T/B	○	-	×	×	○※1	○ (抽出済)	
			・非常用電源 (ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む)	R/B	○	-	×	×	○	○ (抽出済)	
			・計装設備 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	C/B	○	-	×	×	×	-	
		直接支持構造物	・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B、T/B、C/B	○	-	×	×	○ (D/G制御室空調系、 C/B計測制御電源版区域 送風機・排風機、Hx/A 非常用送風機)	○ (抽出済)	
			津波防護機能を有する設備 (※2)	主要設備 補助設備 直接支持構造物	- (※3) - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
		浸水防止機能を有する設備 (※2)	主要設備	・浸水防止設備 (水密扉、閉止板)	R/B、T/B、Rw/B、C/B	×	○ (補修を実施)	-	-	-	-
			補助設備	-	-	-	-	-	-	-	
直接支持構造物	-		-	-	-	-	-	-			
津波監視機能を有する設備 (※2)	主要設備	・津波監視カメラ、取水ビット水位計	屋外	×	-	-	-	-	-		
	補助設備	-	-	-	-	-	-	-			
	直接支持構造物	-	-	-	-	-	-	-			

※1 K6 Hx/A 1F 階段室内のRCW,RSW配管は、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

※2 要求はSs機能維持

※3 防潮堤については、竜巻襲来時に必要とはならない設備であるため、評価対象施設から除外する。

なお、設計竜巻と津波の重畳事象を考慮した場合、大湊側に設置する施設等は、竜巻により防潮堤が損傷した場合であっても、防潮堤によらず敷地高さにより津波からの防護が可能。

荒浜側に設置する施設等(免震重要棟、アクセスルート)は、防潮堤により津波から防護するため、竜巻により荒浜側防潮堤が損傷した場合には、必要に応じプラント停止し、復旧措置を実施する。

1.4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出について

竜巻防護施設に対する波及的影響として、当該施設の倒壊・損傷等により、外部事象防護対象施設が損傷を受ける機械的影響、当該施設が機能喪失に陥った場合に、外部事象防護対象施設も機能喪失する機能的影響、竜巻随件事象（火災、溢水、外部電源喪失）による二次的影響の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

図1.4.1に竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを示す。

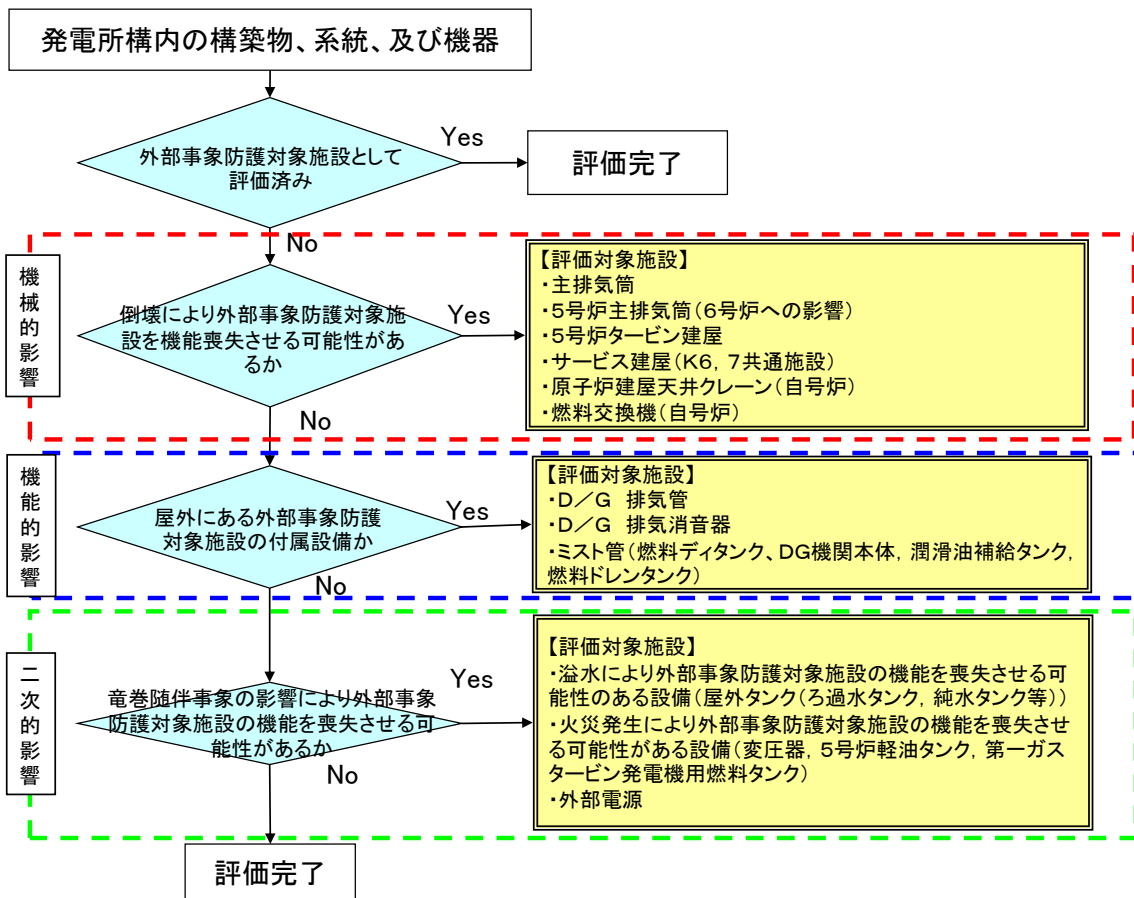


図 1.4.1 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

(1) 機械的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，機械的影響の観点から，外部事象防護対象施設周辺の施設が倒壊することにより，外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設を抽出する。

具体的には，図1.4.2に示す通り，施設の高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設を抽出した。

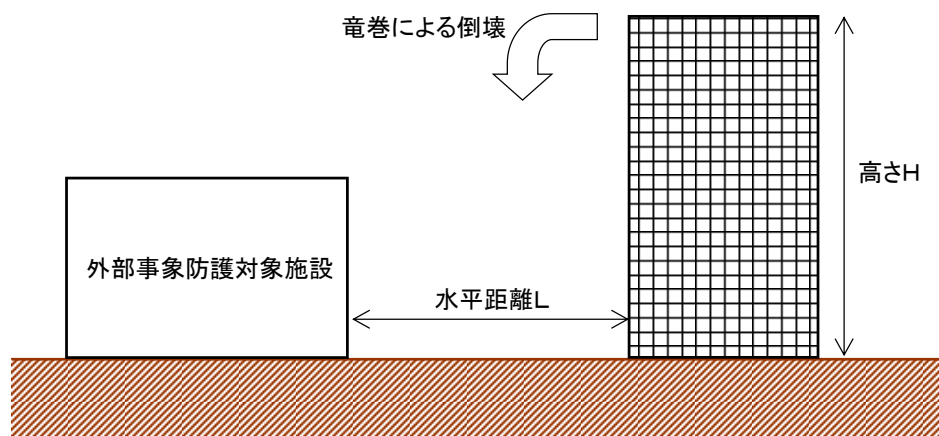


図 1.4.2 地上高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設（高さ $H \geq$ 水平距離 L ）

外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある建屋及び構築物について確認した結果を表1.4.1，設備について確認した結果を表1.4.2に示す。

また，図1.4.3には，外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る建物・構築物並びに主排気筒の倒壊範囲を示す。

確認の結果，倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設として，以下を抽出した。

- a. 建屋・構築物
 - ・ 主排気筒
 - ・ 5号炉主排気筒（6号炉への影響）
 - ・ 5号炉タービン建屋
 - ・ サービス建屋（6・7号炉共通施設）
- b. 設備（系統，機器）
 - ・ 原子炉建屋天井クレーン（自号炉への影響）
 - ・ 燃料交換機（自号炉への影響）

(2) 機能的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，機能的影響の観点（「屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か」）から，機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある施設を確認した結果を表1.4.2に示す。

確認の結果，機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある屋外の外部事象防護対象施設の付属設備として，以下を抽出した。

- ・ ディーゼル発電設備 排気管
- ・ ディーゼル発電設備 排気消音器
- ・ ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電機機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク）

(3) 二次的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，二次的影響の観点から，竜巻随伴事象の影響により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設を抽出する。

建屋内においては，外気との接続がある外部事象防護対象施設の開口部より，飛来物の侵入が想定される場合には，適切な防護対策を実施する。そのため，飛来物の侵入による溢水や火災は発生しないことから，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の安全機能に影響は与えない。

また，建屋外においては，外部事象防護対象施設の安全機能に影響がないことを確認するため，発電所敷地内の外部事象防護対象施設の周辺にある溢水源，発火源となる設備として，以下を抽出した。

なお，6号炉及び7号炉の軽油タンクについては，外部事象防護対象施設として抽出済であることから，本項目では抽出しない。

- ・ 溢水により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性のある設備（純水タンク，ろ過水タンク，NSD収集タンク，苛性ソーダ貯槽，硫酸貯槽）
- ・ 火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備（変圧器，5号炉軽油タンク，第一ガスタービン発電機用燃料タンク）
- ・ 外部電源

表1.4.1 機械的影響の観点の抽出結果（建屋，構築物）

建屋，構築物	近傍の外部事象防護対象施設並びに当該設備の外殻となる建屋	高さ	外部事象防護対象施設までの最短距離	評価対象施設
サービス建屋 (6, 7号共通施設)	コントロール建屋	17m	隣接	○
6号 主排気筒	コントロール建屋, 6号 原子炉建屋	46.8m ^{※1}	隣接	○
7号 主排気筒	7号 原子炉建屋	46.8m ^{※2}	隣接	○
5号 主排気筒	6号 原子炉建屋, 6号 軽油タンク	148m	約30m	○
5号 主排気筒モニタ 建屋	6号 軽油タンク	10m以下	約60m	×
5号 原子炉建屋 ^{※3}	6号 原子炉建屋	39m	約60m	×
5号 タービン建屋	6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	33.1m	約10m	○
5号 サービス建屋	6号 原子炉建屋	17.89m	約150m	×
5号 循環水ポンプ建 屋	6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	21.78	約80m	×
5号 海水熱交換器建 屋 ^{※3}	6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	13.8m	約90m	×
出入管理所	6号 軽油タンク	10m以下	約40m	×
待合室	6号 軽油タンク	10m以下	約30m	×
給水建屋	6号及び7号 軽油タンク	10m以下	約100m	×
予備品倉庫	7号 軽油タンク	10m以下	約70m	×
発電倉庫	7号 軽油タンク	10m以下	約90m	×
ランドリ建屋	6号 原子炉建屋, 6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	13.7m	約140m	×
補助ボイラ建屋	6号 原子炉建屋, 6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	11.5m	約140m	×
焼却炉建屋	6号 原子炉建屋, コントロール建屋	17m	約170m	×
避雷鉄塔 ^{※4}	7号 タービン建屋 海水熱交換器区域	149.5m	約250m	×

※1 : 6号 原子炉建屋の屋上T. P. 38.2m(地表から26.2m)からの高さ

※2 : 7号 原子炉建屋の屋上T. P. 38.2m(地表から26.2m)からの高さ

※3 : 5号炉の外部事象防護対象施設を内包する施設であるが、参考として記載した。

※4 : 発電所構内における鉄塔のうち、外部事象防護対象施設に最寄り鉄塔として記載した。

表 1.4.2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果（設備）（1 / 3）

○:Yes、×:No

分類	機能	構築物、系統又は機器*	配置場所	外部事象防護対象施設として 評価済みか	機械的影響	機能的影響
					倒壊により外部事象防護対象施設 を機能喪失させる可能性があるか	屋外にある外部事象防護対象施設 の付属設備か
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管	R/B	×	×	×
	過剰反応度の印加防止機能	・制御棒カップリング	R/B	×	×	×
	炉心形状の維持機能	・炉心支持構造物	R/B	×	×	×
MS-1	原子炉の緊急停止機能	・原子炉停止系の制御棒による系 (制御棒、制御棒駆動系)	R/B	×	×	×
	未臨界維持機能	・原子炉停止系	R/B	×	×	×
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止 機能	・逃がし安全弁 (安全弁としての開機能)	R/B	×	×	×
	原子炉停止後の除熱機能	・残留熱を除去する系統 (残留熱除去系、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注 水系、逃がし安全弁、自動減圧系)、	R/B	×	×	×
		・サブプレッションプール	Rw/B	×	×	×
	炉心冷却機能	・非常用炉心冷却系	R/B	×	×	×
		・復水貯蔵槽	Rw/B	×	×	×
	放射線物質の閉じ込め機能、放射線の遮 へい及び放出低減機能	・原子炉格納容器	R/B	×	×	×
		・原子炉建屋	R/B	○	×	×
		・非常用ガス処理系 (排風機、乾燥装置、フィルタ装置)	R/B	×	×	×
		・非常用ガス処理系 (原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒頂部までの 配管、弁)	R/B 屋外	×	×	×
		・可燃性ガス濃度制御系	R/B	×	×	×
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作 動信号の発生機能 安全上特に重要な関連機能	・主排気筒(非常用ガス処理系排気管の支持機能)	屋外	×	×	×
		・安全保護系	C/B	×	×	×
		・非常用所内電源系 (ディーゼル機関、発電機、始動用空気系、冷却水 系)	R/B	○	×	○ (ディーゼル発電設備 排気管、 排気消音器、ミスト管(燃料ディ タンク、非常用ディーゼル発電機 機関本体、潤滑油補給タンク、燃 料ドレンタンク))
		・非常用所内電源系 (ディーゼル発電設備吸気系)	R/B	○	×	×
		・D/G本体設備に係わる空調系 (D/G非常用送風機)	R/B	○	×	×
・非常用所内電源系 (発電機から非常用負荷までの配電設備及び回路)		R/B, C/B, T/B	○	×	×	
・軽油タンク		屋外	○	×	×	
・非常用ディーゼル発電機燃料移送系		屋外	○	×	×	
・中央制御室及びその遮へい		C/B	×	×	×	
・中央制御室換気空調系 (放射線防護機能及び有毒ガス防護機能)		C/B	○	×	×	
・原子炉補機冷却水系	T/B	○	×	×		
・原子炉補機冷却海水系	屋外(地下)	×	×	×		
・取水路(屋外トレンチ含む)	屋外(地下)	×	×	×		
・直流電源系	R/B, C/B	×	×	×		
・計測制御電源系	R/B, C/B	×	×	×		

※: 間接関連系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

表 1.4.2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果（設備）（2 / 3）

○:Yes、×:No

分類	機能	構築物、系統又は機器*	配置場所	外部事象防護対象施設として 評価済みか	機械的影響	機能的影響
					倒壊により外部事象防護対象施設 を機能喪失させる可能性があるか	屋外にある外部事象防護対象施設 の付属設備か
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能 (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。)	・原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分) ・主蒸気系	R/B	×	×	×
	原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する機能	・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	×	×	×
		・使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む)	R/B	○	×	×
		・新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能) ・放射性気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホールドアップ装置)	R/B T/B	×	×	×
	燃料を安全に取り扱う機能	・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン	R/B	×	○	×
安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	・逃がし安全弁 (吹き止まり機能に関連する部分)	R/B	×	×	×	
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	・非常用所内電源系空調 (D/G制御室空調系 (DG/Z送風機・排風機))	R/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調 (C/B計測制御電源盤区域送風機・排風機)	C/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調 (Hx/A非常用送風機)	T/B (Hx/A)	○	×	×
	燃料プール水の補給機能	・残留熱除去系	R/B	×	×	×
		放射性物質放出の防止機能	・放射性気体廃棄物処理系 (オフガス系) 隔離弁	T/B	×	×
	主排気筒 (非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分)	・主排気筒 (非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分)	屋外	×	○	×
		・燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	○	×	×
		・原子炉建屋原子炉棟 ・非常用ガス処理系	R/B R/B	×	×	×
事故時のプラント状態の把握機能	・事故時監視計器の一部 (格納容器エリアモニタ)	C/B	×	×	×	
制御室外からの安全停止機能	・制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	R/B	×	×	×	

※: 間接関連系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

表 1.4.2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果（設備）（3 / 3）

○:Yes、×:No

分類	機能	構築物、系統又は機器*	配置場所	外部事象防護対象施設として 評価済みか	機械的影響	機能的影響		
					倒壊により外部事象防護対象施設 を機能喪失させる可能性があるか	屋外にある外部事象防護対象施設 の付属設備か		
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2以外のもの)	・原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管、弁	R/B	×	×	×		
	原子炉冷却材の循環機能	・原子炉再循環系	R/B	×	×	×		
	放射性物質の貯蔵機能	・サブレッションプール水サージタンク	屋外	×	×	×		
		・復水貯蔵槽 ・液体廃棄物処理系 ・固体廃棄物処理系	Rw/B	×	×	×		
		・固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶)	固体廃棄物貯蔵庫	×	×	×		
		・固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	×	×	×		
		・新燃料貯蔵庫 ・新燃料貯蔵ラック	R/B	×	×	×		
	電源供給機能 (非常用を除く)	・タービン ・発電機及び励磁装置 ・復水系 ・給水系 ・循環水系	T/B	×	×	×		
		・送電線	屋外	×	×	×		
		・変圧器	屋外	×	×	×		
		・開閉所	開閉所	×	×	×		
	プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く)	・原子炉制御系 (RWM含む) ・原子炉核計装	C/B	×	×	×		
	プラント運転補助機能	・補助ボイラー設備 ・計装用圧縮空気系 ・復水補給水系	補助ボイラー建屋 T/B	×	×	×		
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放散防止機能	・燃料被覆管	R/B	×	×	×		
	原子炉冷却材の浄化機能	・原子炉冷却材浄化系 ・復水浄化系	R/B T/B	×	×	×		
MS-3	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	・原子力発電所緊急時対策所	免震重要棟 R/B(5号炉)	×	×	×		
		・試料採取系	R/B	×	×	×		
		通信 連絡 設備	所外 通信	・無線系	マイクロ波 無線鉄塔	×	×	×
				・有線系	送電鉄塔 免震重要棟 (屋外設備含む)	×	×	×
			所内外 通信	・有線系 ・無線系 ・衛星系	R/B (5号炉) (屋外設備含む)	×	×	×
			所内 通信	・有線系	各建屋 (地下設備含む) 屋外設備	×	×	×
					屋外	×	×	×
		・放射能監視設備 (モニタリングポスト)			可搬型SA設備保管場 所	×	×	×
		・放射線監視設備 (放射能観測車)			R/B	×	×	×
		・事故時監視計器の一部			気象観測装置	×	×	×
		・消火系			給水建屋	×	×	×
					水処理建屋	×	×	×
					ろ過水タンク (屋外配管含む)	×	×	×
					泡消火設備	×	×	×
			・安全避難通路、非常照明		各建屋内	×	×	×

※: 間接関連系は、当該系の機能遂行に直接必要ない構築物、系統及び機器であるため、記載を省略した。

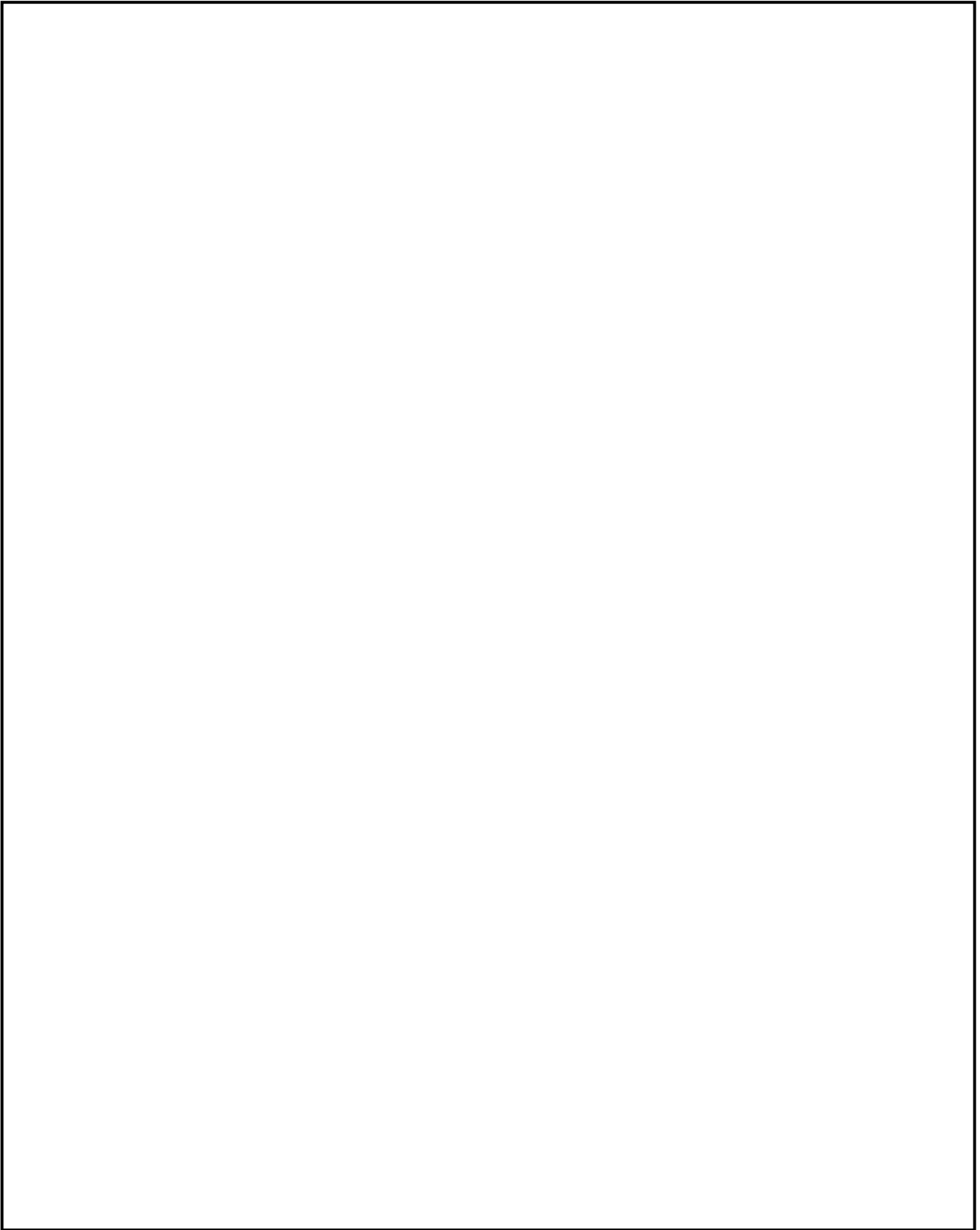


図1.4.3 倒壊により外部事象防護対象施設が損傷する可能性がある施設の抽出

数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について

1. はじめに

一般的に、大気現象の水平方向の広がりについては「水平スケール」と呼ばれ、寿命や周期は「時間スケール」と呼ばれる。図1は雷雨とその関連事象の時空間スケールの関係を示したものである。個々の積雲の時空間スケールは1 km・10分程度であり、発達・組織化（マルチセル化・スーパーセル化）すると10～100 km・数時間～半日程度にまで大きくなる。それに対し、竜巻の時空間スケールは数分・100 m程度である。

竜巻の発生メカニズムを考える際、時空間スケールの階層構造が重要である（図2）。ある大気現象は、スケールのより小さな現象を内包しており、竜巻の場合、竜巻の漏斗雲内の気流は数十メートル～数百メートル規模（マイクロスケールと呼ばれる（Orlanski 1975）；図2では“MISOCYCLONE”と記載されている）の現象であるのに対し、竜巻を引き起こすもとの積乱雲である親雲のスケールは数キロメートル～数十キロメートル規模（メソスケールと呼ばれる。図2では“MESOCYCLONE”と記載されている）である。台風、低気圧、前線等のいわゆる総観場は、数百キロメートル～数千キロメートル規模（総観スケールと呼ばれる。図2では“MASOCYCLONE”と記載されている）として扱われる。また、竜巻内部には吸い込み渦（図2では“Suction Vortex”と記載されている）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。

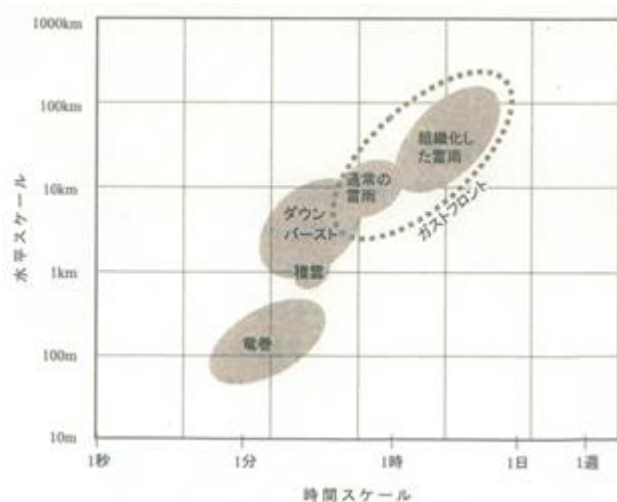


図1 雷雨とその関連現象の時空間スケール（大野 2001）

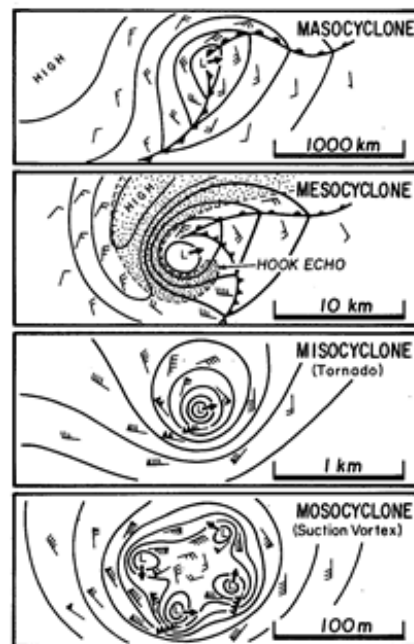


図2 竜巻発生時の渦の多重構造（Fujita 1981）

このように、竜巻の発生にはさまざまなスケールの現象が介在し、異なるスケールの現象が相互作用しているため、竜巻の発生頻度や強度の地域性は複数の時空間スケールで議論する必要がある。気象学における現状として、観測データの欠如や数値シミュレーション技術の不十分さゆえにマイクロスケールの現象の理解が難しく、未知なメカニズムもあると認識されている。一方、総観場の観点では、さまざまなパターンで竜巻が発生していることがわかっており、「日本海側では台風性竜巻の発生が確認されていない」ことや、地域に応じて総観場の割合が異なる等の分析結果が得られている。しかし、例えば、寒冷前線起因の F3 竜巻が実際に発生している（1990 年茂原竜巻や 2006 年佐呂間竜巻等）が、寒冷前線自体は国内どこでも通過しうるため、ある地域において F3 竜巻が発生し難いことを総観場の分析結果だけで示すのは難しい。

竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会 2013）では、基準竜巻風速 V_{BI} の設定の際に国内最大規模の竜巻ではなく竜巻検討地域内における記録等を参照する場合には、その明確な根拠を提示する必要があると記載されている。そのため、総観スケールの気象場の分析結果のみではなく、メソスケールあるいはマイクロスケールの気象場の特徴から地域性が見られる理由、および竜巻検討地域内の記録を参照して V_{BI} を設定できる根拠をより気象力学的に明らかにすることが必要である。ただし、上述のように、マイクロスケールでの議論は極めて困難である。

そこで、マイクロスケールで発生する竜巻現象を包含する気象場（以下、環境場と呼ぶ）として、親雲の水平スケールに対応するメソスケールの気象場を対象として、F3 規模以上の竜巻の発生に適した環境場が生起する頻度についてその地域性の有無を検討する。以下、第 2 節では竜巻の発生メカニズムについて簡単に触れ、竜巻発生環境場を議論する上で重要な視点について述べる。第 3 節では、発生環境場の指標として活用されている突風関連指数について、本検討で用いる突風関連指数の概要を述べる。第 4 節では、気象モデルを用いて顕著な竜巻の数値シミュレーションを行い、気象場や突風関連指数の解析結果を考察する。この結果をもとに、第 5 節において過去 50 年間の気象解析データを用いて、突風関連指数の地域性について分析し、F3 規模以上の竜巻発生に適した環境場の生成のし易さを観点とした地域性の有無について考察する。第 6 節では北海道網走支庁佐呂間町にて発生した F3 竜巻の特殊性、および竜巻検討地域設定に対する取り扱いについて述べる。

なお、メソスケールでの地域性を検討するに際し、ヨーロッパ中期予報センターの長期再解析データをもとに、気象モデルを用いたダウンスケーリングと呼ばれる手法により当該スケールに対する空間分解能（水平解像度 5km）を有する気象データを作成した。今回、1961 年～2010 年の 1 時間毎のデータを使用した。その検討フローを図 3 に示す。

過去の既往文献や、国内外で発生した大きな竜巻を対象とした発生環境場に関する解析結果をもとに、不確かさも考慮して突風関連指数の閾値を設定し、長期間にわたる気象データにおいて、その閾値を超過する頻度を算出し、得られた頻度分布において定性的に十分に差があるかどうかを観点として地域性の有無を考察した。

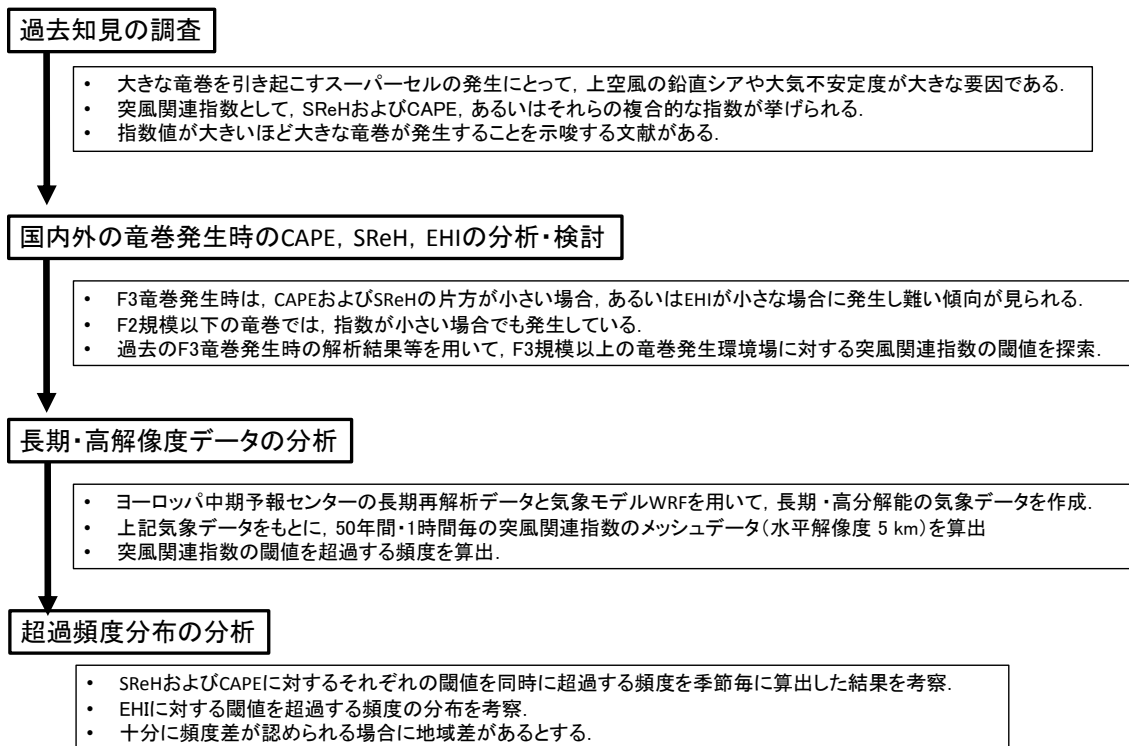


図3 メソスケールでの分析フロー

2. 竜巻の発生メカニズム・分類とメソスケール分析の有効性

2.1 竜巻の発生メカニズム

竜巻の発生メカニズムは二つに大別されると考えられている（新野 2007）。一つは、スーパーセルと呼ばれる特徴的な構造を有する巨大積乱雲に伴うもの（図 4 に例示した模式図参照）であり、もう一つは、気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線（図 5 に例示した模式図参照）に伴うものである。

スーパーセルを伴う竜巻では、大気下層における鉛直シア（風向が上下で逆転する、あるいは風速が上下で大きく異なる場合に生じる）に伴って水平軸を有した渦管が形成され、それが上昇気流によって数キロメートル上空まで持ち上がる。その際、メソサイクロンと呼ばれる直径 3・4km～10km 程度の鉛直軸回りの強い渦が積乱雲中にでき、その下部に竜巻が発生する（Klemp and Wilhelmson 1978；図 4 参照）。このように、メソサイクロンの形成がこの種の竜巻の最大の特徴である（新野 2007）。図 4 に示すように、鉛直シアによりスーパーセル内では降水粒子の落下域（下降流域）と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲にまで発達し、長時間持続しうる。国内で発生した F2 規模以上の竜巻に対し、スーパーセルあるいはミニチュア（ミニ）スーパーセルが存在したことを観測・解析した成果も得られている（Suzuki et al. 2000, Mashiko et al. 2009 等）。また、水平風速のマイクロスケールの空間スケールを有する竜巻漏斗雲の形成メカニズムについては、水平渦が

上昇気流により引き伸ばされることの影響、あるいはメソサイクロンが地表面付近の上昇気流への影響等が指摘されている (Noda and Niino 2010) が、多くは未解明であり、レーダ観測や数値実験による研究が行われている。しかし、メソサイクロンが強いほど竜巻強度が大きくなるという関係性が、最先端のドップラーレーダを用いた詳細観測により分かっている。(Burgess et al. 2002)

一方、局地前線に伴う竜巻では、気温・湿度、風向・風速が水平方向に鋭く変化する局地的前線面において、水平シア流の不安定や傾圧的作用等により生成した鉛直軸周りの渦が鉛直方向に引き伸ばされることによって発生する (Lee and Wilhelmson 1997)。スーパーセルとは大気成層が大きく異なり (Doswell and Evans 2003)、降水粒子が地上に達する段階になると下降気流が上昇気流を打ち消すため (Byers-Braham の概念)、積乱雲がこれ以上発達せず、衰弱・消滅する。そのため、強い竜巻が生じにくいと考えられている。局地的に水平スケールは数キロメートル以下であり、メソスケールのうち小さなスケール (メソスケール)、あるいはマイクロスケールにあたる。この種の渦は、上記のサイクロンに対してマイソサイクロンと呼ばれている。

2.2 竜巻の分類

上記にて説明した発生メカニズムの観点から、メソサイクロンの形成が大きな竜巻の発生と深く関わっていることがわかる。米国では、メソサイクロンが形成される竜巻は、スーパーセル型と呼ばれる F2~F5 規模を想定した顕著な竜巻として分類され、F1 規模以下の竜巻は局地前線等に伴う非スーパーセル型と分類されている (Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003)。国内にて発生した F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻(6 事例)¹もメソサイクロンを伴うスーパーセル型であったと報告されている (表 1)。

そこで、飯塚・加治屋 (2011)、Bluestein (2013) 及びその他の検討 (Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003) と同様に、メソサイクロンの有無で竜巻を分類することとし、メソサイクロンを有する場合を「スーパーセル型」、そうでない場合を「非スーパーセル型」と定義する。

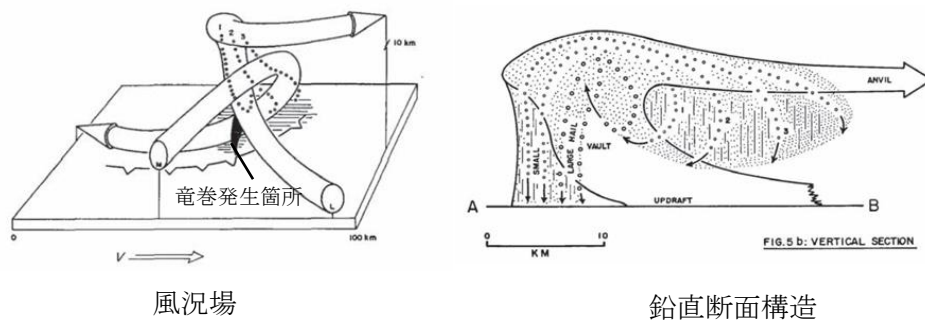
なお、スーパーセル型・非スーパーセル型竜巻の同定に関する国内の検討例として、飯塚・加治屋 (2011) による分析が見られ、2006 年~2009 年間の 3 ヶ年においてスーパーセル型竜巻の竜巻強度は、F2 及び F3 (3 事例)、F1 (6 事例)、F0 (8 事例)、F 不明 (2 事例) であったのに対し、非スーパーセル型竜巻では、F2 及び F3 竜巻 (0 事例)、F1 (9 事例)、F0 (11 事例)、F 不明 (5 事例) であったと報告している。分析期間は短いものの、国内で発生した F3 竜巻のスーパーセル型の竜巻強度の傾向を考慮すれば、大きな竜巻は米国と同様に基本的にスーパーセル型に分類できるといえる。

¹ 気象庁データベースにおける括弧つき F2-F3 竜巻 ((F2-F3) と記載された竜巻) は過去に 5 事例 (1960 年代に 4 事例、1990 年に 1 事例) 報告されている。これらの竜巻については解析を実施した文献が見あたらなかったため、表 1 には記載していない。

2.3 メソスケールでの分析の有効性

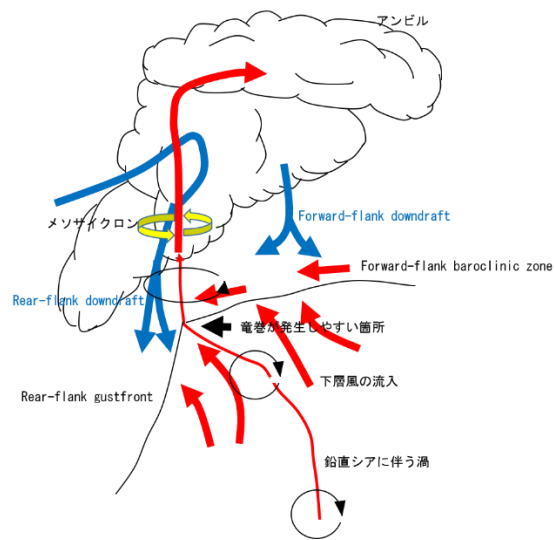
空間スケールの観点では、メソスケール気象場の分析はスーパーセル型竜巻の発生しやすさの傾向・地域性を分析する目的には十分であるが、空間スケールの小さく、竜巻強度も小さい非スーパーセル型竜巻に対しては向かない。また、竜巻強度の観点では、大きな竜巻（国内最大強度の F3 を含む F2 以上の規模の竜巻）の発生のしやすさがメソスケール気象場の分析により検討することができる。したがって、設計基準を考える際には、スーパーセル型竜巻の発生を観点とした地域性を検討することが妥当である。

そこで、3 節以降では、突風関連指数と呼ばれる竜巻の発生のしやすさを指数化した量を用いて、大きな竜巻の発生のしやすさについて分析し、その地域性について検討する。その際、スーパーセル型竜巻はメソサイクロンを有する点が特徴的であり、その発生はメソスケールにおける風の鉛直シアや大気不安定性と深く関わっている (Bluestein 2013, Klemp and Wilhelmson 1978, Rotunno and Klemp 1985, Trapp 2013) ことから、SReH 及び CAPE, あるいは EHI と呼ばれる突風関連指数を用いる。



風況場

鉛直断面構造



メソサイクロンの形成メカニズム

図4 スーパーセル型雷雨の構造 (Browning 1964, Bluestein 2013 に加筆)

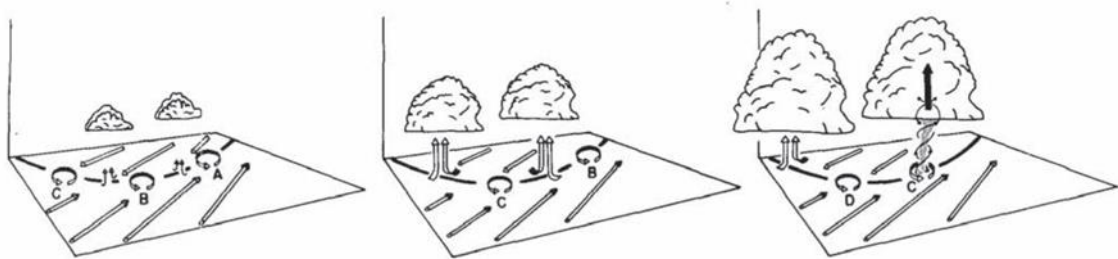
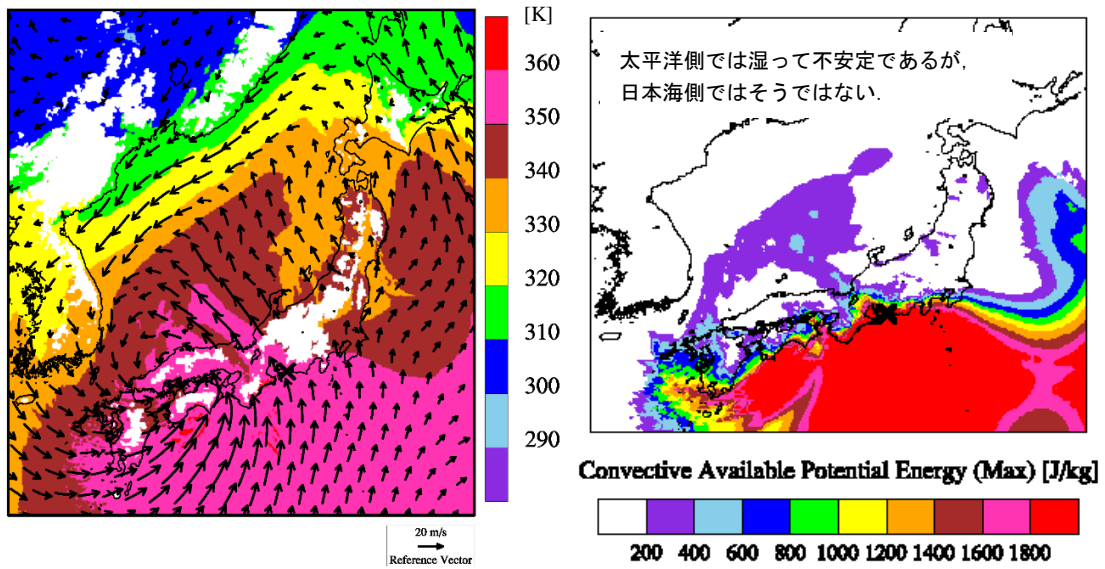
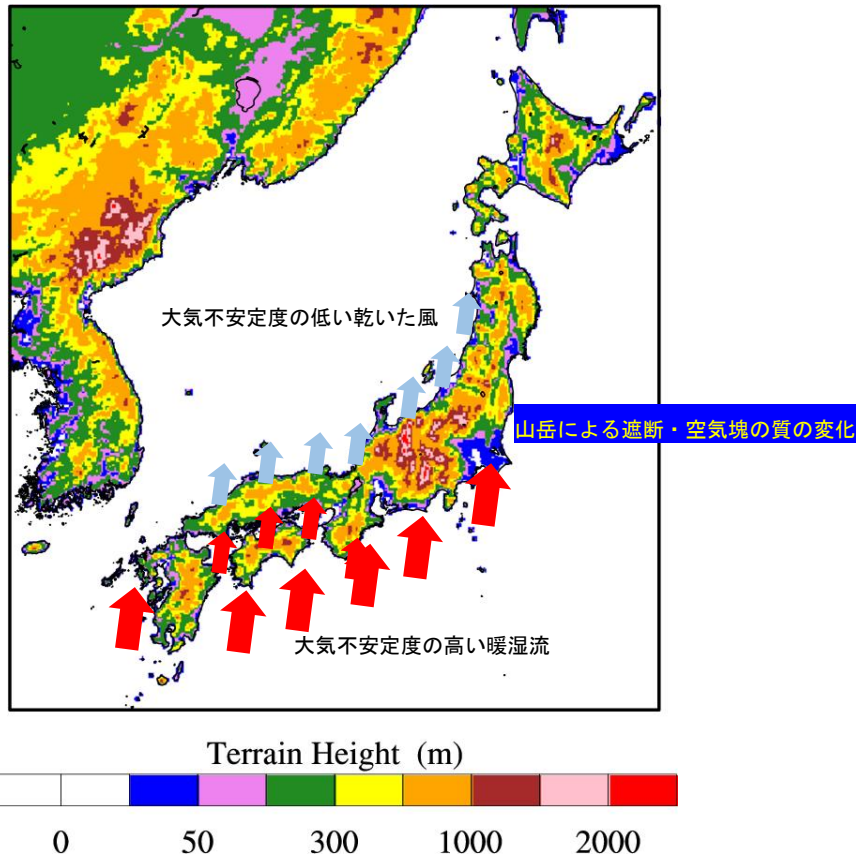


図5 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する模式図 (Wakimoto and Wilson 1989)
(上向き黒い⇒が上昇気流を表す)



500 m 高度における温位 (カラー) および風向・風速

大気不安定度 (CAPE) の分布

図6 (上) 総観スケールでの気流場の模式図 (カラーは標高を表す) および
(下) 1999年9月に豊橋にて発生したF3竜巻の事例

表 1 過去に国内にて発生した F3 規模竜巻の概要

発生日	発生場所 (県・市町村)	Fスケール	主な総観場	メソサイクロンの存在を 報告した資料・文献
1971/7/7	埼玉県浦和市	(F3)	台風	Fujita et al. (1972)
1978/2/28	神奈川県川崎市	F2-F3	寒冷前線	村松 (1979)
1990/12/11	千葉県茂原市	F3	暖気の移流	鈴木・新野 (1991)、Niino et al. (1993)
1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	坪木ら(2000)
2006/11/7	網走支庁佐呂間町	F3	寒冷前線	Kato and Niino (2007)
2012/5/6	茨城県常総市	F3	気圧の谷	Yamauchi et al. (2013)

3. 突風関連指数

突風関連指数はこれまで数多く提案されており、気象庁における現業においても竜巻探知・予測に活用されている（瀧下 2011 等）。ここでは、国内外で最も知見が蓄積された指数として SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ； Davies-Jones et al. 1990), CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流位置有効エネルギー； Moncrieff and Miller 1976) を用いる。図 7 および図 8 にそれぞれ、両指数の算出概念を表す。概して、SReH は風の鉛直シア（高度方向の風向・風速差）に伴って発生する大気の水平渦度が親雲に取り込まれる度合、CAPE は大気の不安定度合の指標である。値が大きいほどその度合が高くなる。大気下層の空気塊を「持ち上げて」乾燥断熱線および湿潤断熱線を求め、空気塊が自由対流高度に達した際に積乱雲の発達するポテンシャルとして CAPE を計算する。



図 7 SReH の算出概念

(左：水平渦度生成に関する模式図、右：水平渦度の親雲への輸送に関する模式図)

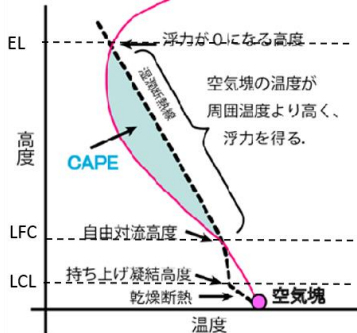


図 8 CAPE の算出概念

両指数の算出式は以下のとおりである。

$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度3km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz \quad (1)$$

$$\text{CAPE} = \int_{\text{LFC}}^{\text{EL}} g \frac{\theta_e'(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz \quad (2)$$

ここで、式 (1) の \mathbf{V} は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は鉛直シアに伴う水平渦度であり、 \mathbf{C} のストームの移動速度は Bunkers et al. (2000) にしたがって、長期再解析データから得られる地上高 6km の平均風速と、シアベクトル(地上高 5.5~6km 層の水平風ベクトルと 0~0.5km 層の水平風ベクトルの差) から算出する関係式にて求めた。式 (2) の g は重力加速度、 θ_e はストーム周囲の相当温位、 θ_e' は持ち上げ空気塊の相当温位であり、 dz は鉛直方向の層厚である。LFC は自由対流高度と呼ばれ、前線周辺の風の水平方向の収束、太陽による地表面加熱、地形による強制上昇等によって、空気塊がこの高度まで何らかの要因で持ち上げられると ($\theta_e < \theta_e'$ となり) 自身の浮力だけで上昇し、平衡高度 EL ($\theta_e = \theta_e'$ となる) に達するまで積乱雲が発達する (図 8)。なお、温位とは、式 (3) に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。気温は高度によって変わるが、温位は同じ空気塊では常に一定 (断熱過程では温位は保存される) な物理量であるため、空気塊のあたたかさ、浮力特性、および不安定性を把握するのに用いられる (付録 A 参照)。

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱}) \quad (3)$$

二つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく (不安定であり)、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いと、大きな積乱雲の発生につながる。竜巻が発生する積乱雲の中では、水蒸気が降水粒子に変化しているため、その際に発生する潜熱の影響が考慮された相当温位が保存される。乾燥している気象場では相当温位と温位は等しい。

式 (1) を見ればわかるように、SReH は、上端高度の違いによって値が変わる。上端を地上から 3 km とした場合、その殆どが地上から 1 km までの大気によるヘリシティであるという指摘 (Rasmussen 2003) があるが、1 km 高さは夏場では境界層高さ (雲底高度) 程度と低めであるため、本検討では多くの既往検討と同様に 3 km とする。また、持ち上げる空気塊の性質によって CAPE の値は変わる。地表から 500 m 程度上空までの平均的な性質を持つ空気塊を持ち上げたときの MLCAPE (Mean Layer CAPE) がよく用いられる。本検討では、地表から 500 m 上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げる。このようにして求められた CAPE は MUCAPE (Most Unstable CAPE) と呼ばれる。大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合、MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある (付録 B 参照)。

本検討では、SReH と CAPE に加え、EHI と呼ばれる SReH と CAPE の複合指数を用いた分析も行った。Davies (1993) は EHI 算出に MLCAPE を用いたが、本検討では MUCAPE を用いて以下のように EHI を算出した。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160000} \quad (4)$$

4. 国内で発生した F3 竜巻および日本海側 F2 竜巻の数値シミュレーション

竜巻発生時の気象場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。気象モデルとして WRF (Weather Research and Forecasting) モデル (Skamarock et al. 2005) バージョン 3.2.1 を用いた。WRF モデルは，気象力学・物理現象を数値モデル化したものであり，（竜巻の親雲の水平スケールに対応する）メソスケール（水平方向 2 km ～ 20 km 程度）の気象要素を解析できるコミュニティモデルとして世界的に利用されている（付録 C 参照）。主な計算条件は表 2 に記すとおりである。電力中央研究所による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件を採用しており，ネスティングと呼ばれる技法を用いて，水平解像度 15 km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の解析結果を得る。これにより，粗い水平空間分解能（ECMWF ERA-Interim：約 70 km，ECMWF ERA-40：約 250 km）の初期・境界値データから詳細メッシュの気象場を解析できる。なお，30 分間隔で計算結果を出力し，当時の天気図や気象レーダ画像等を参考にして竜巻発生時刻と解析結果における降雨域の通過時刻との違いや，対応する降雨域の有無を確認することにより，計算結果に大きな問題がないことを確認した。気象庁の竜巻等の突風データベースでは，1988 年以降の事例に対しては天気図に加え，レーダ画像も掲載されている。1988 年以降の事例については WRF モデルによる解析結果の適切性をレーダ画像と天気図から判断した。1987 年以前の事例については F3 竜巻については天気図から判断した。基本的に，発生時刻から±1 時間内に擾乱が竜巻発生地点周辺を通過することを適切性の判断基準とした。

表 2 WRF モデルセットアップの概要

水平グリッド間隔	15 km (親領域), 5 km (子領域)
鉛直層数	35
積分時間間隔	90秒 (親領域), 30秒 (子領域)
モデル上端気圧	50 hPa
初期・境界値データ	ECMWF-Interim (1989年～), ERA40 (~1988年)
ネスティング	フィードバック有
積雲対流スキーム	Kain-Fritsch (親領域のみ)
雲物理スキーム	Morrison 2-moment (両領域)
接地層スキーム	2-D Smagorinsky (両領域)
境界層スキーム	YSU (両領域)
地表面スキーム	Noah LSM (両領域)
放射スキーム (長波)	RRTM (両領域)
放射スキーム (短波)	Dudhia (両領域)

分析対象事例は、表 3 に示すとおり、過去に発生した F3 竜巻（1987 年以前の F2-F3 竜巻は除く）、1988 年以降に日本海側で発生した F1-F2, F2 竜巻とした（F3 竜巻は 5 事例, F2-F3 竜巻は 1 事例, F2 竜巻は 3 事例, F1-F2 竜巻は 1 事例）。1987 年以前に発生した竜巻については、（初期値・境界値データとして使用している ECMWF ERA40 の水平空間分解能が約 250 km と粗いために、竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べて乖離する可能性がある¹ため）この資料では対象としていない。ただし、F3 竜巻に対しては 1987 年以前の竜巻に対しても解析を行い、計算結果の適切性も確認している。なお、対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

¹ 5 章では WRF モデルで解析された 1961 年から 50 年間のデータを用いるが、発生時刻や発生箇所に多少の違いがあったとしても事象を漏れなくカウントできれば地域性の検討には問題ない。

表 3 分析対象事例の概要

発生日時	季節	発生地点	Fスケール	計算開始日時	SReH	MaxCAPE
2012/05/06 12:35	暖候期	茨城県常総市	F3	2012/05/06 03時	270	2115
2006/11/07 13:23	寒候期	北海道網走支庁佐呂間町	F3	2006/11/07 03時	714	813
1999/09/24 11:07	暖候期	愛知県豊橋市	F3	1999/09/24 03時	403	2459
1990/12/11 19:13	寒候期	千葉県茂原市	F3	1990/12/11 09時	649	1201
1971/07/07 07:50	暖候期	埼玉県浦和市	F3	1971/07/06 15時	337	1746
1990/02/19 15:15	寒候期	鹿児島県枕崎市	F2-F3	1990/02/19 03時	745	373
1991/06/12 13:30	暖候期	富山県魚津市	F2	1991/06/12 03時	227	1358
1990/04/06 02:55	寒候期	石川県羽咋郡	F2	1990/04/05 15時	484	889
1989/03/16 19:20	寒候期	島根県簸川郡	F2	1989/03/16 09時	329	430
1999/11/25 15:40	寒候期	秋田県八森町	F1-F2	1999/11/25 03時	363	1222

表 3 中の SReH と最大 CAPE の値は、発生地点を中心とした東西・南北 100 km 四方内の最大値である。ここで、最大 CAPE を求めた理由と方法は以下のとおりである。雲物理過程により擾乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると、発生前の大気不安定な状況が解消されるため、竜巻発生地点の CAPE 値は周囲に比べて低くなる傾向がある。つまり、解析データでは、ある格子点（メッシュ）で竜巻を伴う擾乱が発生している時、その格子点に対する CAPE 値は周辺のメッシュ値に比べて小さめになりうる（瀧下 2011 等）。これは、CAPE 値の大きさをもって竜巻の規模を定量的に検討する際に問題となる。そこで、Rasmussen and Blanchard (1998)を参考に、各格子点に対して、地上～500 m 高度までの平均風向を算出し、その風向に対して当該地点から風下側に扇形の影響範囲を設け、影響範囲内の CAPE 値の最大値を求めるように工夫した（図 9）。その際、扇形の半径は 15 km、中心角として平均風向を中心に± 45 度の範囲をとった。この最大値が最大 CAPE にあたる。このように算定することにより、周辺の CAPE 値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを考慮できる。

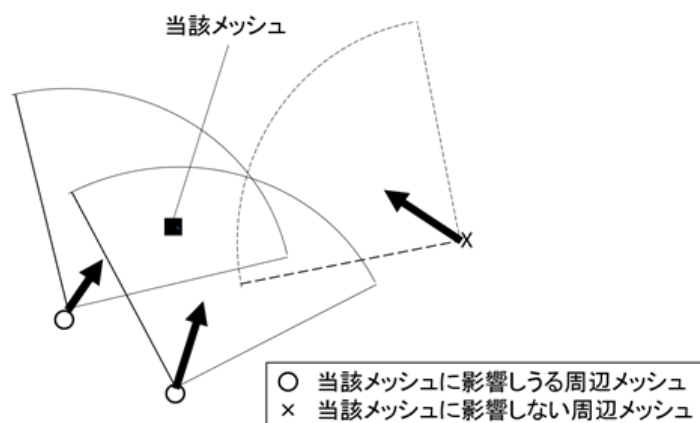


図 9 最大 CAPE 値の抽出方法の概念図

以下では、解析した気象場として、500 m 高度における風向・風速と相当温位の分布図、突風関連指数の解析結果として SReH および最大 CAPE の分布図を示す。全て 5 km 水平解像度の計算結果である。

4.1 2012/05/06 F3 事例（気圧の谷・寒気移流）

太平洋側から南西風が吹き込む一方、（中層では）大陸・日本海側側から寒気を伴う北よりの風が吹いており（図略）、風のシアと大気不安定度が高まっている。SReHの値は東日本の太平洋側で非常に高いが、関東平野周辺ではCAPEが非常に高く、3個の竜巻がほぼ同時に発生した。

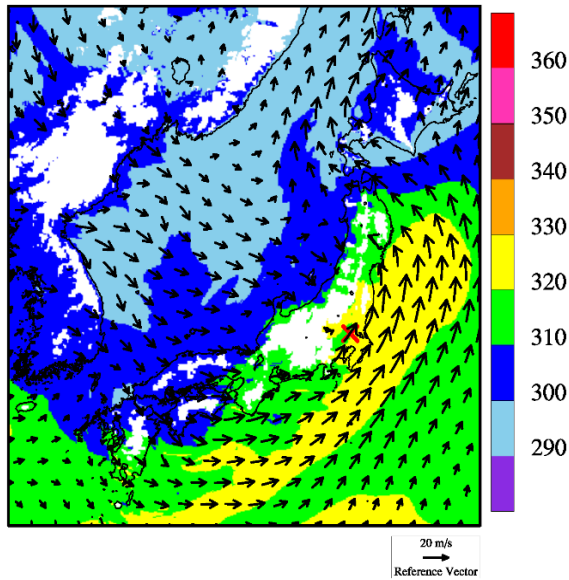
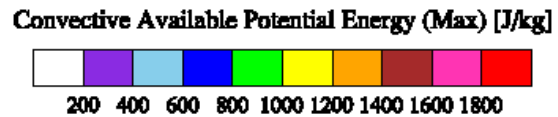
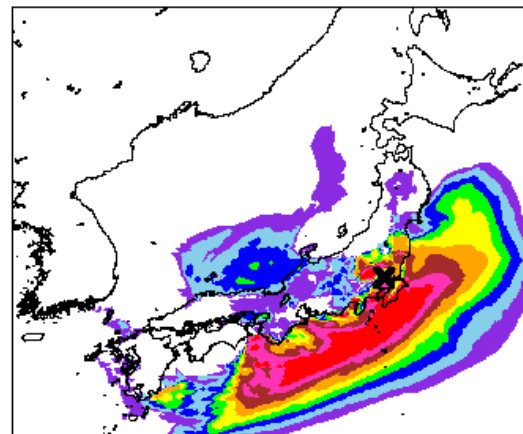
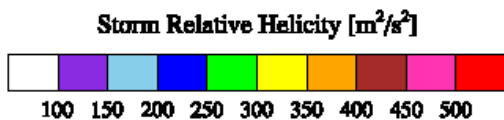
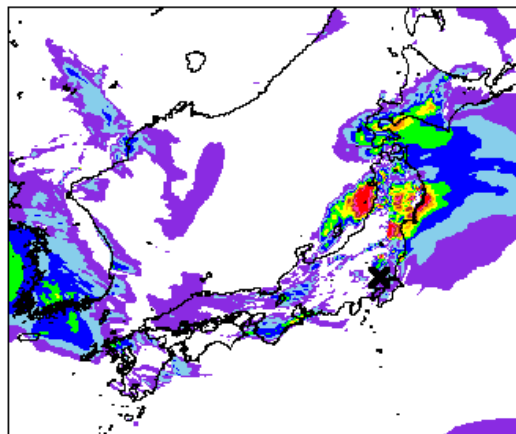


図 10 2012/05/06 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大CAPE



4.2 2006/11/07 F3 事例（寒冷前線・暖気の移流）

寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風（寒色系）が、東側では南よりの暖かい風（暖色系）が吹いており、気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にある。特に、道東・オホーツク地方には太平洋から暖かく、不安定な空気塊が流入している。大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており、非常に高い風のシア（高い SReH）と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお、同日に、周辺地域において 2 個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み、大気がやや不安定になっている（CAPE が高めている）が、SReH が低く、道東・オホーツク海地方の状況とは異なる。

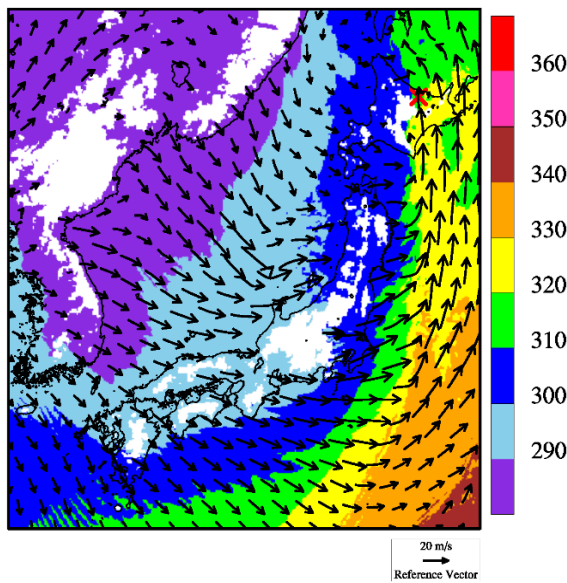
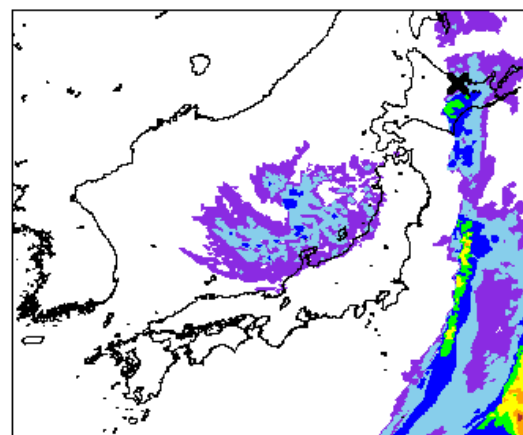
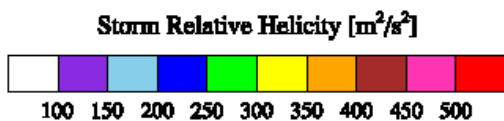
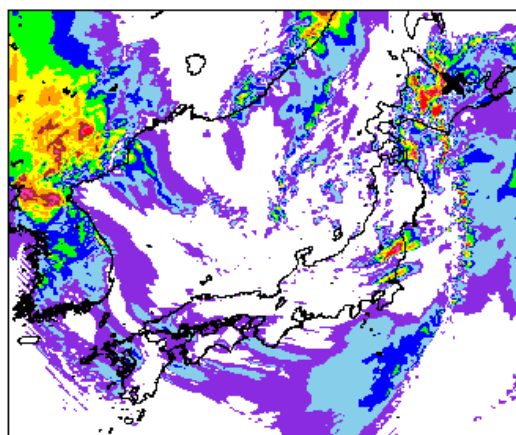


図 11 2006/11/07 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大 CAPE



4.3 1999/09/24 F3 事例 (台風)

台風を中心は隠岐の南西沖にあり、四国東部・紀伊半島の沿岸部および濃尾平野では、台風中心から遠く離れているが、太平洋側からの非常に不安定な暖湿流が流れ込み (CAPE が非常に大きく)、SReH も高くなっている。濃尾平野では 4 個の竜巻 (2 個の F1, 1 個の F2, 1 個の F3) が発生した。台風中心が日本海側にあり、日本海側の SReH は太平洋側に比べて決して小さくはないが、不安定度は格段に小さいのが見てとれる。

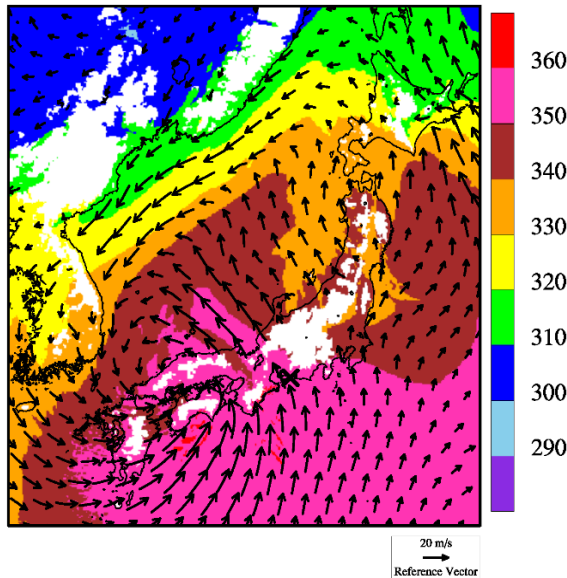
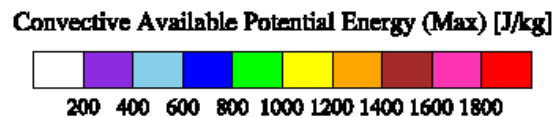
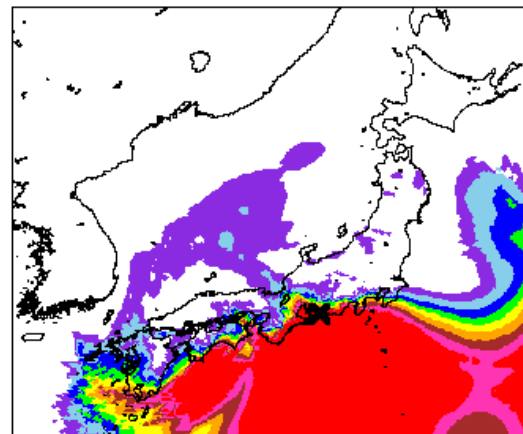
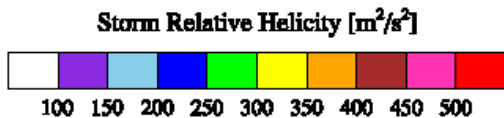
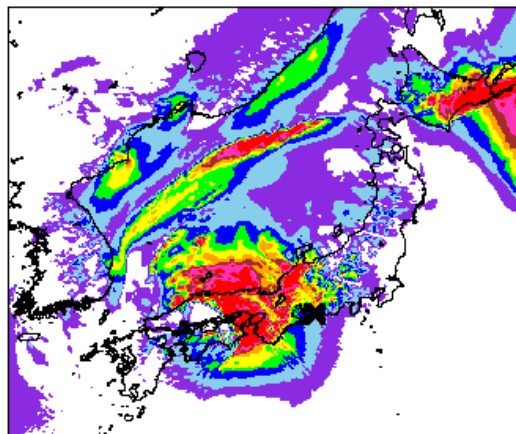


図 12 1999/09/24 F3 事例における気象場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



4.4 1990/12/11 F3 事例（暖気の移流・気圧の谷，寒冷前線）

房総半島と日本海に低気圧があり，房総半島の低気圧からは南西方向に寒冷前線が伸びている。そのため，寒冷前線および房総半島にある低気圧を境に温位差が大きくなっている（寒色系と暖色系（緑色）の境が明瞭である）。房総半島には低気圧中心に向かって暖かく，不安定な空気塊が流入しており，房総半島では局所的に SReH の値も高い（×でやや見づらいが）。房総半島周辺では大小 7 個の竜巻が発生した。

日本海側の低気圧をとりまくように，特に北側で SReH が非常に高くなっているが，温位が低く，CAPE の値も小さくなっている。一方，福島県沖に CAPE の高い領域が見られるが，SReH の値は大きくなく，相当温位も比較的 low，房総半島周辺とは状況が異なる。

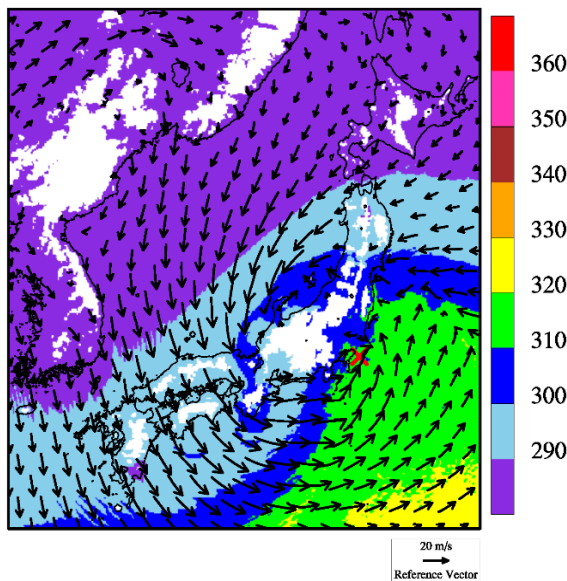
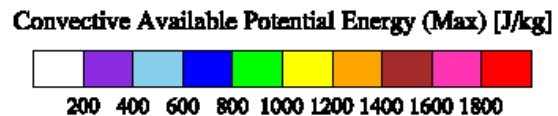
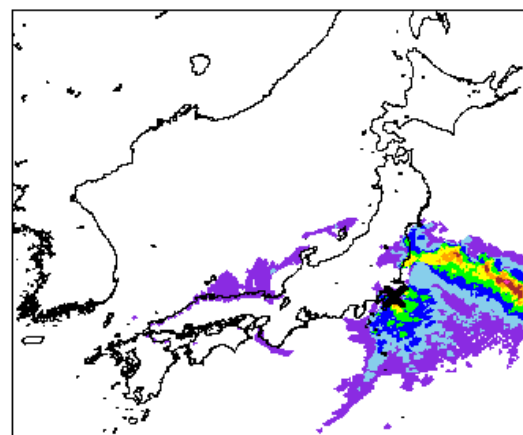
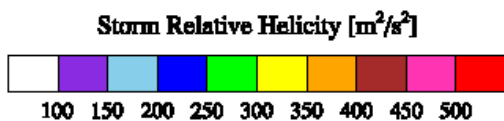
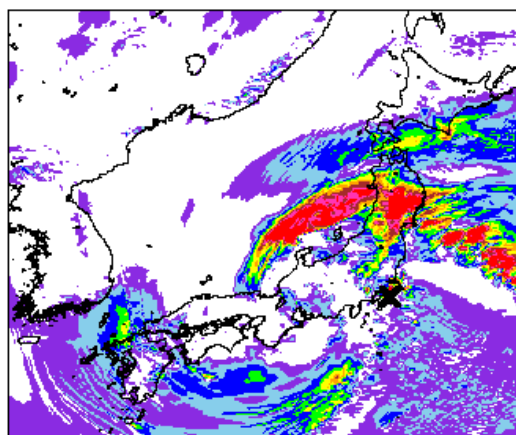


図 13 1990/12/11 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE



4.5 1971/07/07 F3 事例（台風）

台風を中心は紀伊半島の南西沖にあり，中部から東日本にかけては，太平洋側から非常に CAPE が高く，不安定な空気塊が流入している。SReH は，1999/09/24 F3 事例（豊橋竜巻）ほど大きくはないが，発生地点周辺では SReH が比較的高くなっており（×でやや見づらい），SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。

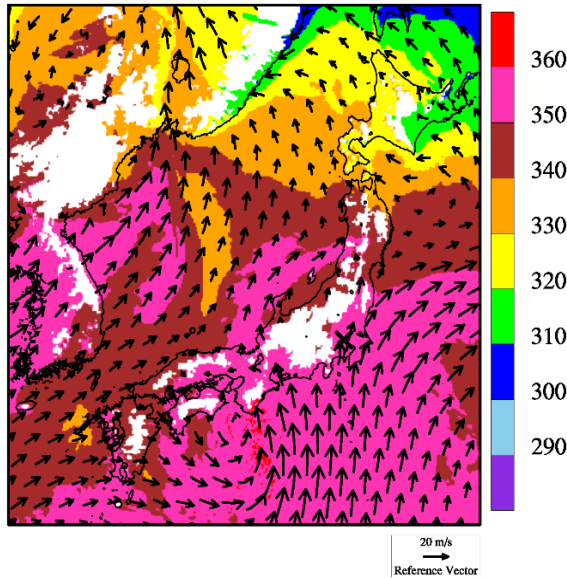
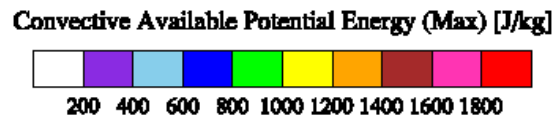
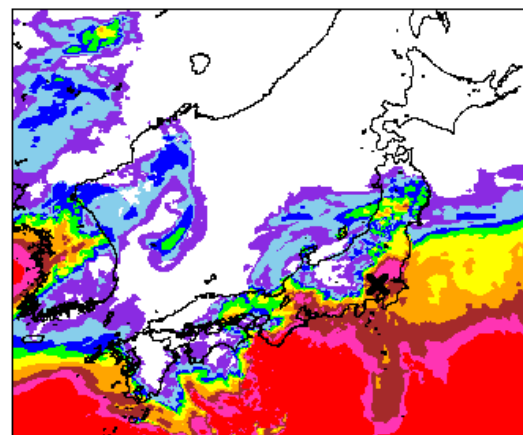
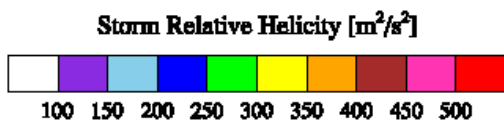
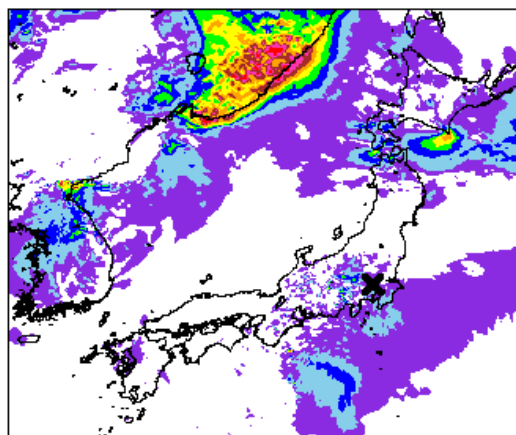


図 14 1971/07/07 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE



4.6 1990/02/19 F2-F3 事例（寒冷前線・暖気の移流・その他（低気圧））

朝鮮半島東部の沖合にある低気圧から寒冷前線と温暖前線が伸び、九州から近畿にかけては比較的暖かい気流が太平洋側から流入している。その中でも発生地点周辺には最も暖かい空気塊が流入しており、鹿児島県南部では局所的に CAPE の値がやや高くなっている。しかし、CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方、寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが、F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。

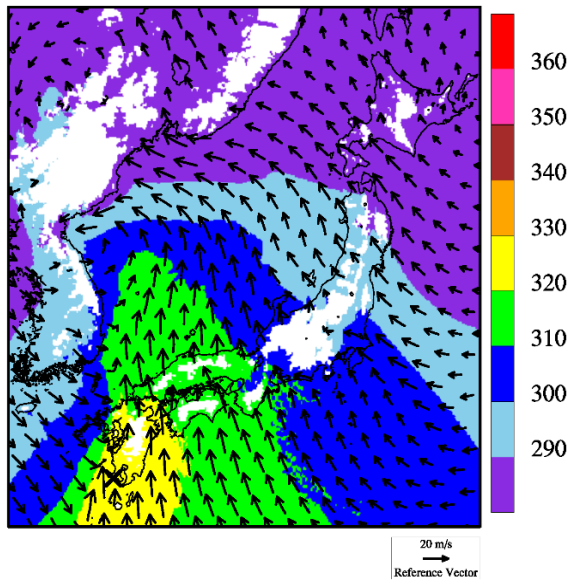
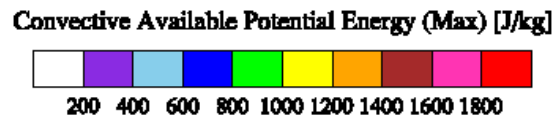
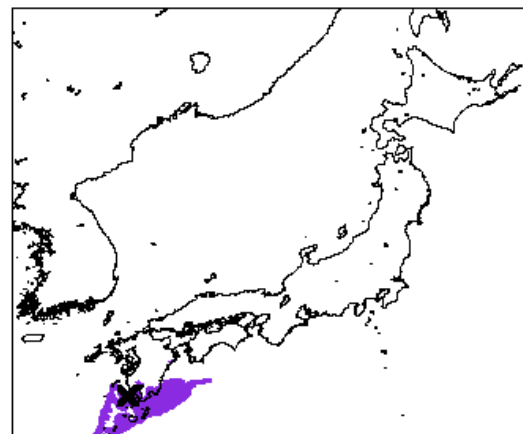
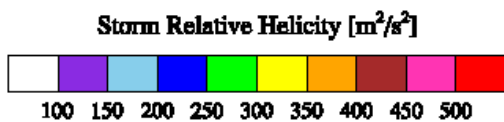
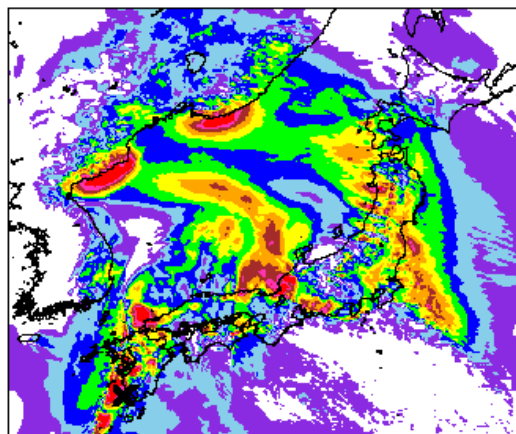


図 15 1990/02/19 F2-F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大 CAPE



4.7 1991/06/12 日本海側 F2 事例（寒冷前線・局地性擾乱）

日本海側沿岸に沿って寒冷前線があり，その北側では西南西の風が吹いている。空気塊の暖かさとしては太平洋側と同等のもの（茶色）が，対馬海峡から日本海に入り込んでおり，青森県沖まで到達している。ただし，大気不安定度は暖候期にしては大きくなく，寒冷前線南側の九州から近畿にかけての不安定度（CAPE 分布の赤い領域）と比べるとかなり小さい。SReH の値も特段高い傾向は見られず，F3 発生時の環境場とは様相が異なる。

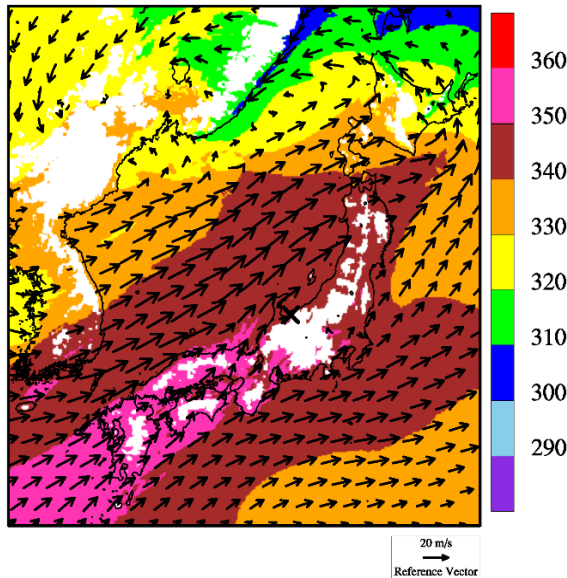
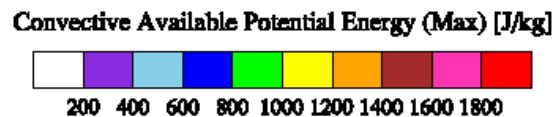
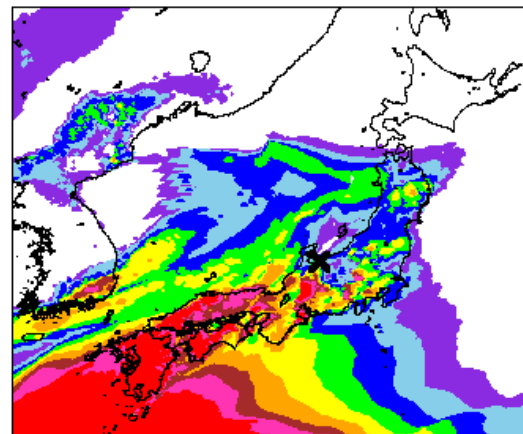
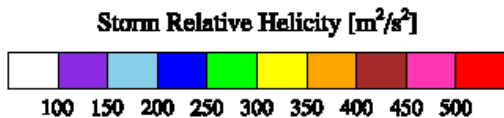
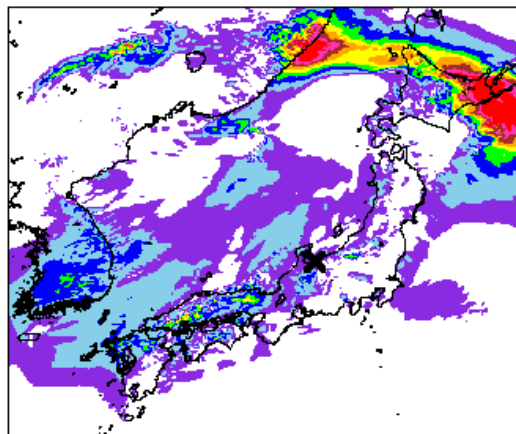


図 16 1991/06/12 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE



4.8 1990/04/06 日本海側 F2 事例 (オホーツク海低気圧・気圧の谷)

オホーツク海にある低気圧と九州の南西海上にある高気圧との間で、西高東低の気圧配置となっており、朝鮮半島東部から季節風が能登半島から敦賀湾に向かって流れ込んでいる。冬季によく見られる状況といえる。能登半島周辺での不安定度の高さは、海上で寒気が暖められて大気が不安定になったことが原因であり、SReH も高めである。特に能登半島周辺では高い。不安定化のメカニズムは異なるが 2006/11/07 F3 竜巻 (佐呂間竜巻) と似た環境場になっている。ただし、SReH が佐呂間竜巻に比べて 4 割程度低く、これが F3 規模に達しなかった理由の一つであると考えられる。

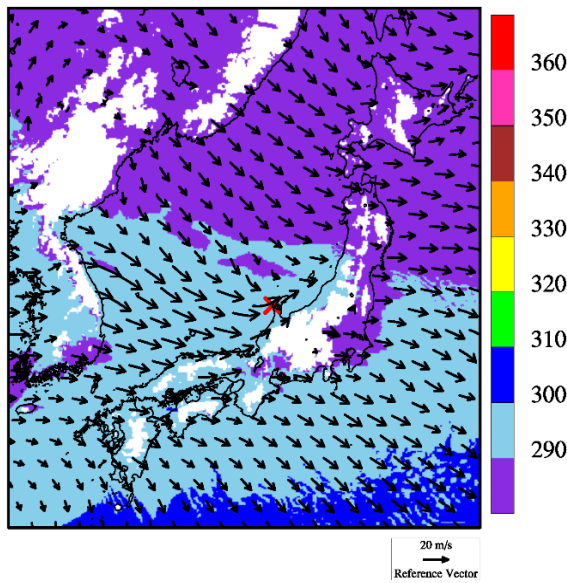
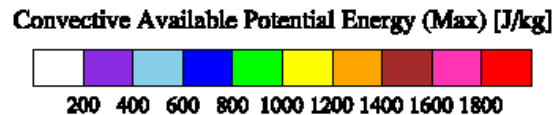
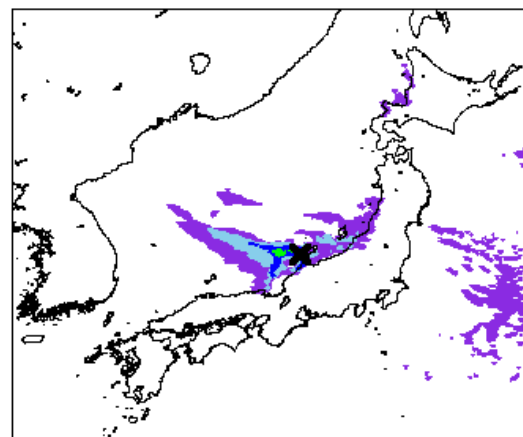
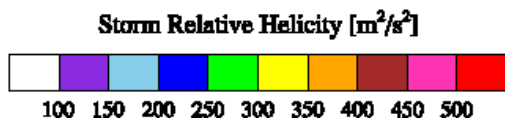
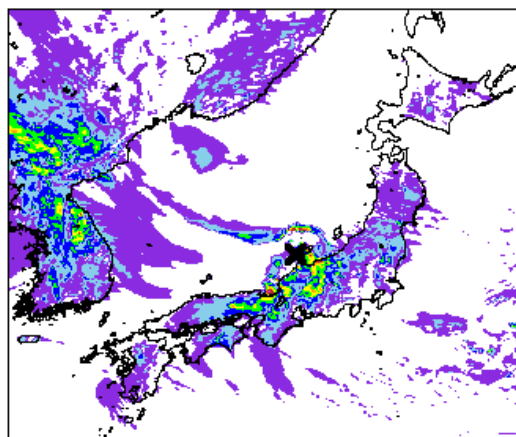


図 17 1990/04/06 F2 事例における気象場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



4.9 1989/03/16 日本海側 F2 事例（局地性擾乱・寒気の移流）

西高東低の弱い冬型の気圧配置にあり、朝鮮半島から寒気が流入している。島根県の沖で渦状の流れが形成されており、SReH がかなり高くなっている。しかし、やや不安定な大気になっているものの、他の日本海側 F2 事例よりもさらに不安定度が低くなっており、環境場の観点では、F3 規模まで発達するには不安定度合が欠如していたと考えられる。

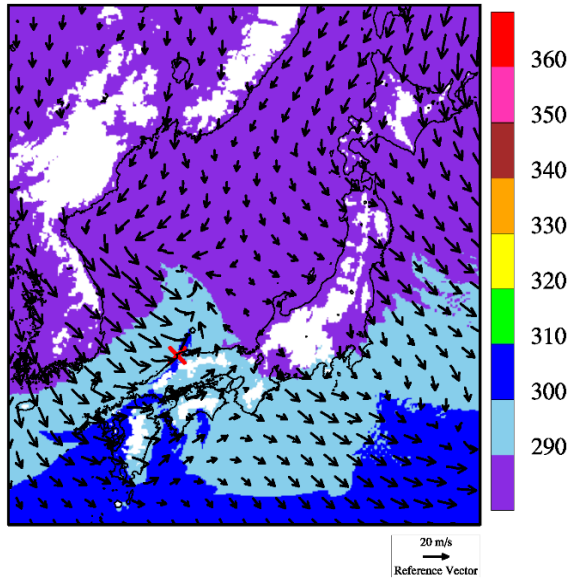
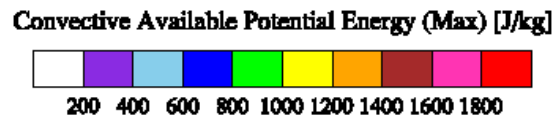
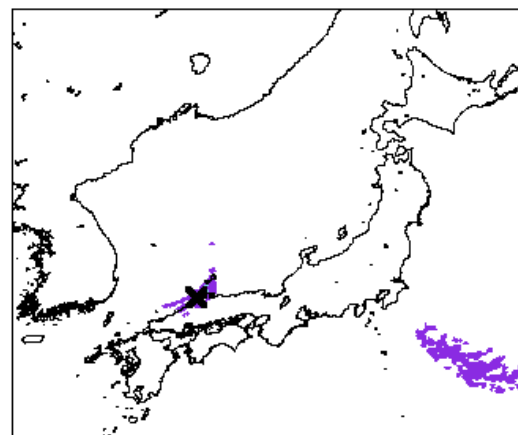
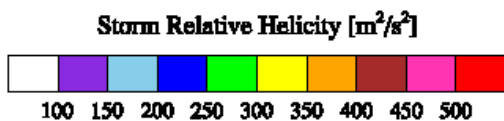
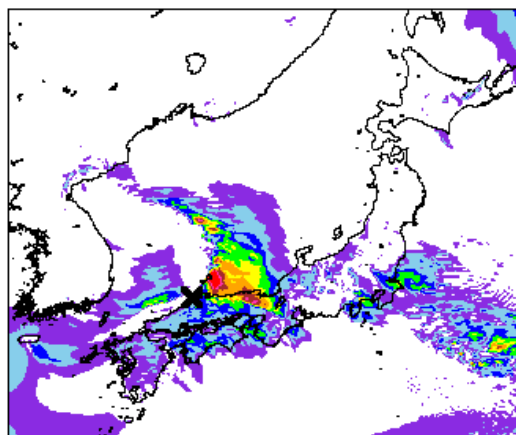


図 18 1989/03/16 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大 CAPE



4.10 1999/11/25 日本海側 F1-F2 事例 (日本海低気圧・寒冷前線)

北海道の西海上にある低気圧から延びた寒冷前線が日本海沿岸を通過した際に発生した。寒冷前線上では温位のコントラスト (青色と緑色) が明瞭であり, 寒冷前線に沿った地域の中でも発生地点周辺は SReH が比較的高く, CAPE の高い範囲の北端部に位置している。CAPE の大きさは, 寒候期に発生した F3 竜巻事例を上回ったが, SReH は低かった。

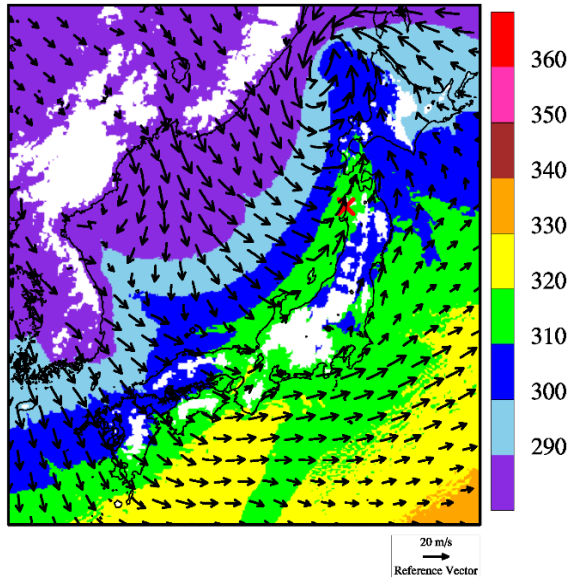
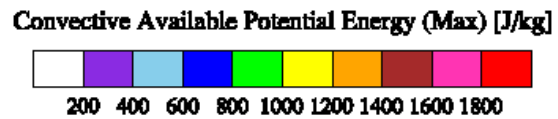
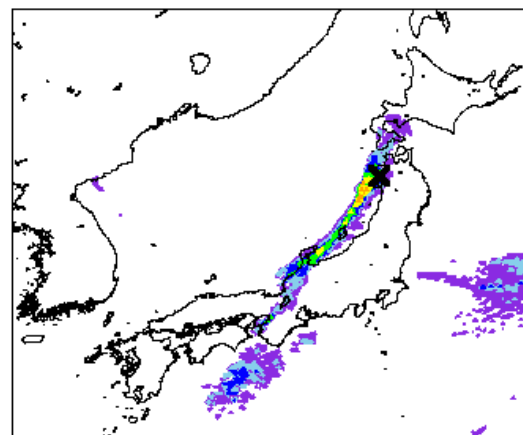
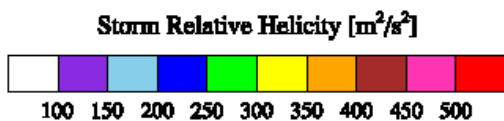
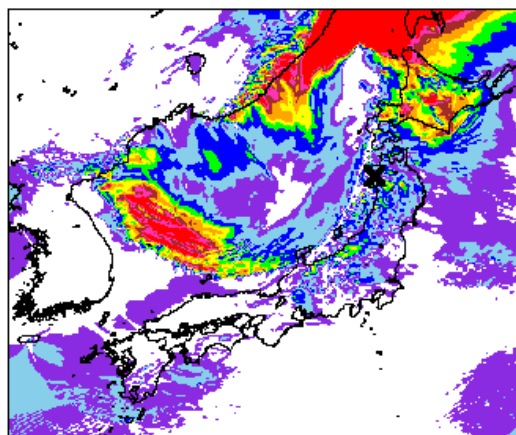


図 19 1999/11/25 F1-F2 事例における気象場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



4.11 SReH・CAPE と竜巻強度との間の関係性

10 事例を分析した結果から以下の傾向が見られる。

- ① F3 竜巻事例では共通して、SReH と最大 CAPE の両方が大きく、太平洋側からの暖湿流の流入が見られた。寒候期（11 月～4 月）に発生した事例では CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さいが、SReH が非常に大きく、大気不安定度の小ささを補っているようである。
- ② 今回分析した F2-F3 竜巻時の発生環境場は、CAPE（大気不安定度）が F3 竜巻発生時に比べてかなり低かった。F2 規模と F3 規模とで風速レベルで違いが大きく、本検討において F2-F3 竜巻を F3 竜巻と混合して扱うべきではない。
- ③ F2 竜巻でも SReH は F3 竜巻事例と同レベルの大きさになりうる。冬季の西高東低型の気圧配置下での日本海上での気団変質時、寒冷前線通過時、暖候期の場合は対馬海峡から日本海に向かって空気塊が流れ込む時に大気がやや不安定な状況が見られたが、多くの事例で大気不安定度は F3 竜巻発生時よりも小さかった。不安定度が大きかった事例もあるが、その場合 SReH が大きくなかった。つまり、両指数が共に大きくなる状況は見られなかった¹。

図 20 は表 3 における SReH と最大 CAPE の値を竜巻のカテゴリ別にプロットしたものである。F3 竜巻においては、暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており（5 章参照）、寒候期では暖候期に比べて値が小さいが、SReH が非常に大きい傾向が見られる。

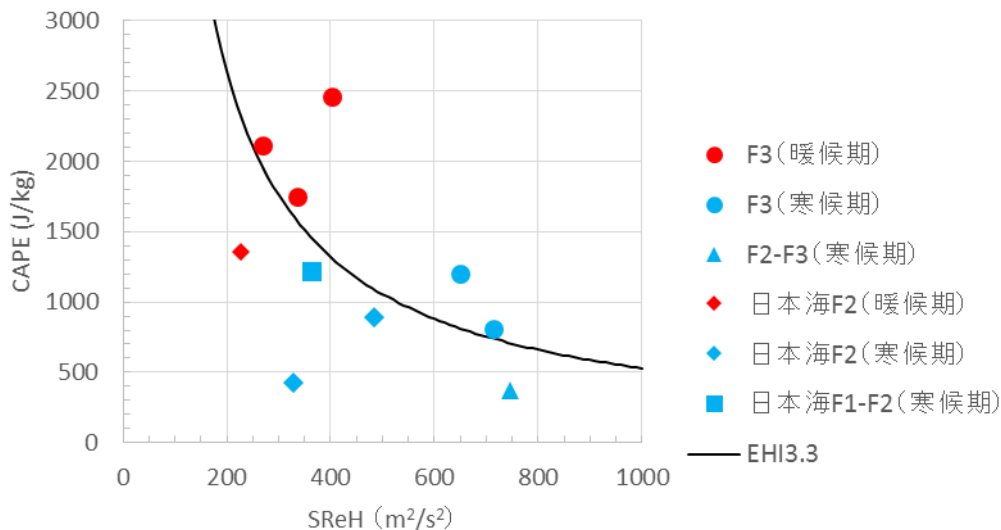


図 20 SReH と最大 CAPE の関係

事例数が少ないことが課題であるが、日本海側の F2 規模竜巻の発生環境場では小さな指

¹太平洋側の F2, F2-F3 竜巻はこの点で日本海側の F2 竜巻と異なるようである。太平洋側からの暖気流の流入下で起こるため、F3 竜巻と同レベルあるいは大きな指数になるケースが見られる。実際、小さな竜巻が F3 竜巻発生時の前後あるいはほぼ同時に発生することが F3 竜巻 5 事例中 4 事例見られた。

数値の下でも竜巻が発生しているという点において、F3 規模竜巻の発生環境場との違いが見られる。SReHとして $250 \sim 300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 程度以上、(最大) CAPE として 1600 J/kg (暖候期) あるいは 600 J/kg (寒候期) 程度以上の環境場において F3 竜巻が発生しているとみなすことができる。EHI に対しては、3.3 程度を超える場合に F3 竜巻が発生している。この場合、季節に分けずに通年単位で分析できる可能性がある。

国内外の関連研究をレビューしたものを付録 B に記した。現時点では各研究とも課題がある状況であるが、特に米国での成果では、F3 規模以上とそれ以外といった大きな竜巻とそれ以外を区別することにおいては両指数が活用できそうである。そこで、次節では、国内最大規模 F3 あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場を対象に、その生起頻度の地域性について検討する。

5. 竜巻発生環境場の生起頻度分析

前節において過去に発生した竜巻に対する環境場を分析したところ、国内で(太平洋側で)発生した F3 竜巻では、SReH と(最大 MU) CAPE の両方が大きな値をとる傾向が見られた。ここでは、SReH と CAPE それぞれに対してある閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度を分析することにより、国内最大規模 F3 あるいはそれ以上の規模の竜巻発生を観点とした地域性について議論する。(杉本ら 2014a) また、参考として EHI に対しても同様に検討することとする。

5.1 用いる気象データ

突風関連指数の地域性を見出すには、詳細なメッシュ間隔でかつ長期間のデータが必要である。そこで、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データ ERA-Interim (1989 年以降; 水平分解能約 70 km) および ERA40 (1989 年まで; 水平分解能約 250 km) をもとに、気象モデルを用いて数値的に気象場を解析したデータセット(橋本ら 2011)を用いる。当データセットは、気象庁と電力中央研究所が共同で作成した JRA-25 再解析データ (Onogi et al. 2007) よりも $5 \text{ km} \cdot 1$ 時間毎と時空間解像度が細かく、豪雨事例の再現性も高まっている(橋本ら 2013)。本検討では、1961 年から 2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータを用いる。詳細メッシュでかつこれほど長期間のデータセットは他に類をみない。

ECMWF の再解析データは、地球温暖化予測を目的として世界的に広く活用されており、最も精度が高いものと認識されている。しかし、空間分解能が非常に粗いため、物理的ダウンスケーリング手法として、WRF モデルを用いた長期再解析により 5 km メッシュの気象場を算出してデータセットを作成し、本データセットで解析されている上空風、気温、気圧等の気象データを用いて、SReH と CAPE の値を 1 時間毎・ 5 km メッシュで算出した。50 年間にわたるデータサンプル数は各メッシュに対して約 4.4×10^5 個存在することとなる。

5.2 季節間の傾向差

F3 竜巻の発生環境場の特徴として、寒候期（11月～4月）に発生した竜巻のCAPEが暖候期（5月～10月）に比べて小さく、SReHが高い傾向にあった。こうした季節に応じた指数の特徴の違いについて考察する。

図21は、SReHの閾値を $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE（最大CAPEではない）の閾値を 250 J/kg に設定し、各指数に対する超過頻度（全体の母数に対する割合（%））を各モデル格子点に対して月別に算出したものである。ここでは小さな閾値を設定している¹。SReHに対しては、日本海および沿岸域では冬季に頻度が大きく、大きな値をとる傾向が示唆されている。また、関東平野、および日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。7月は全体的に低くなっている。一方、CAPEに対しては、寒候期で低い値をとり、暖候期で高い値をとる傾向が見られ、緯度依存性も見られ、Chuda and Niino (2005)の分析結果と整合している。この緯度依存性は、熱帯域ほど暖かく、高い雲ができやすいことと関係している。CAPEについては、季節・緯度依存性が強く、南に行くほど、暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっている。加藤(2008a)でも指摘されているように超過頻度を検討する上ではこの特徴を踏まえる必要がある。そのため、以下の検討では、季節に応じた最大CAPEの閾値を設定して超過頻度を求めている。

ところで、閾値が変わると図21で見られる頻度分布もそれに応じて変わるが、相対的な頻度大小関係はある程度保持される。国内最大規模F3の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが、CAPEの値は基本的に南ほど高い値をとるため、CAPEの地域性とは整合しない（例えば、沖縄ではF3竜巻は発生していない）。また、SReHにおいても整合しない（例えば、日本海側でF3竜巻は発生していない）。少なくとも片方の指数だけではF3竜巻発生地点の地域傾向を説明することはできない。したがって、SReH・CAPEの関係性（図20）から両方の指数を考慮した場合に説明づけられるか否かがポイントとなる。

5.3 同時超過頻度分布に見られる傾向

前節における検討結果（図20）を踏まえ、SReHの閾値を $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPEの閾値を 1600 J/kg （暖候期）あるいは 600 J/kg （寒候期）として、同時超過頻度を算出する。また、竜巻発生時には降水現象を伴うものと考えられることから、降水量の閾値 2 mm/hr を条件に追加した。なお、降水量の閾値については頻度値の大小に若干影響を及ぼすが、結果の解釈には全く影響しないことを確認している。

暖候期・寒候期別に同時超過頻度を算出した結果を図22に示す。また、図23は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」で確認されたF2-F3竜巻およびF3竜巻の発生箇所を示したものである。暖候期においては、同時超過頻度0.01%前後の地域が茨城県以西の太平洋側および九州の沿岸域の平野部に広がっており、超過頻度の高い地域はF3規模の竜巻の発生箇所を包含している。つまり、超過頻度の高い地域でF3規模以上の竜巻発生に適し

¹閾値を小さく設定するという事は、スーパーセルだけではなく、小さな雷雨発生の環境場も捕捉することを意味する。

た環境場が整いやすいことが示唆されている。それに対し、日本海側，東北太平洋側，および北海道・下北半島といった北日本での超過頻度の値は，1～2 オーダ以上小さな値となっている。

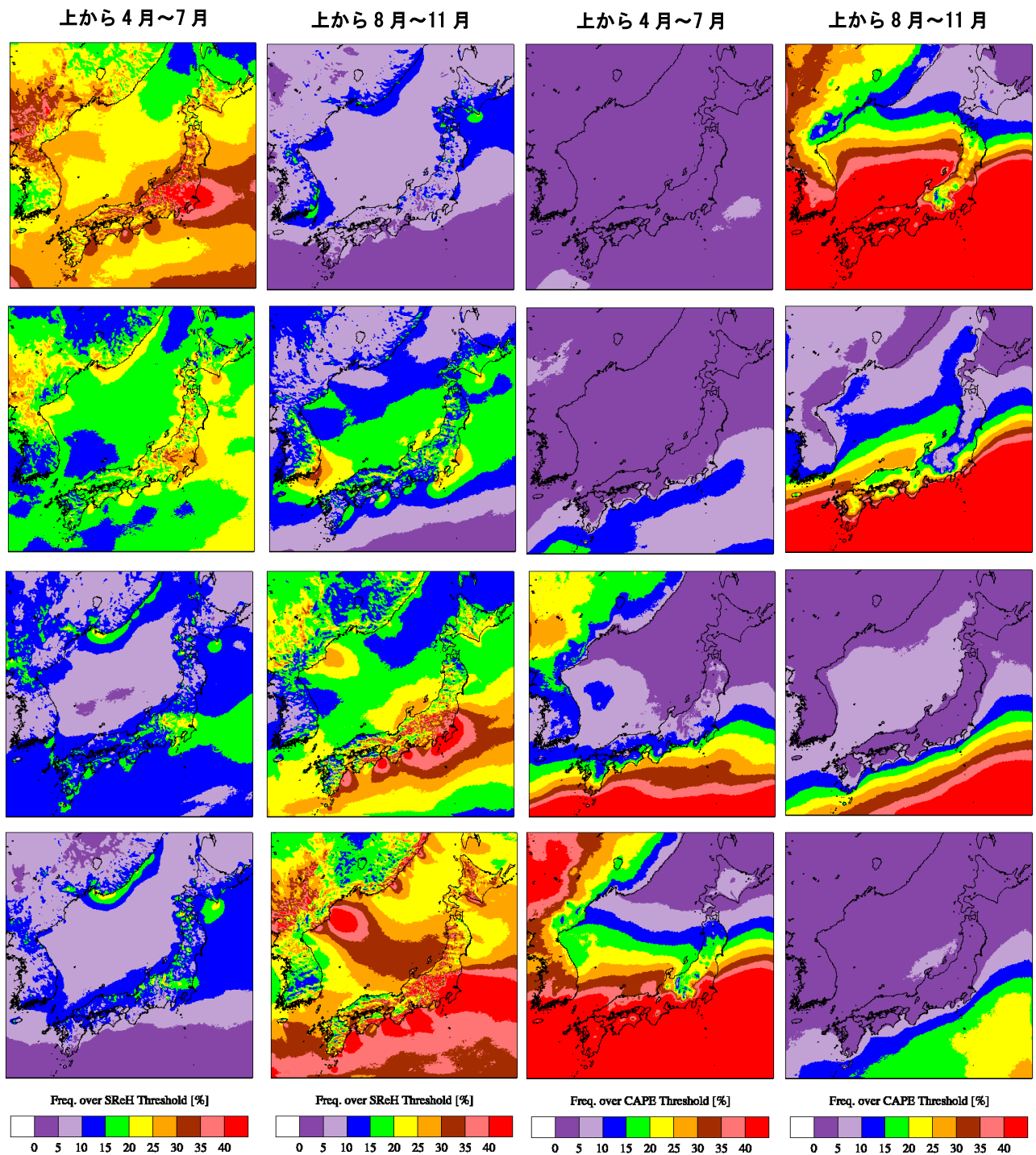


図 21 月別の SReH（左側 2 列）および CAPE（右側 2 列）の超過頻度分布

また、寒候期の超過頻度分布では，頻度が高い地域が南側にシフトしているが，F3 竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていることに対応している。全体的に暖候期に見ら

れる傾向と同様であり、また F3 規模竜巻の発生数に季節間の差が見られないことも反映されている。このように、過去の F3 竜巻発生時の環境場の解析結果を踏まえて設定した SReH と CAPE の閾値を両方超過する頻度の分布は、実際の F3 竜巻の発生箇所の傾向と整合している。

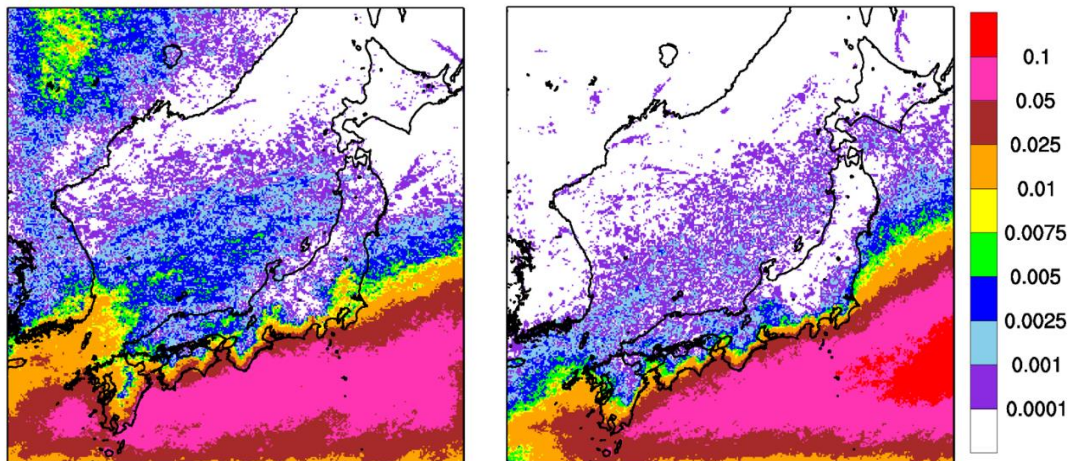


図 22 同時超過頻度分布（単位：%，F3 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）
（実績ベースの閾値（SReH：250 m²/s²，最大 CAPE：1600 J/kg（暖）600 J/kg（寒）））

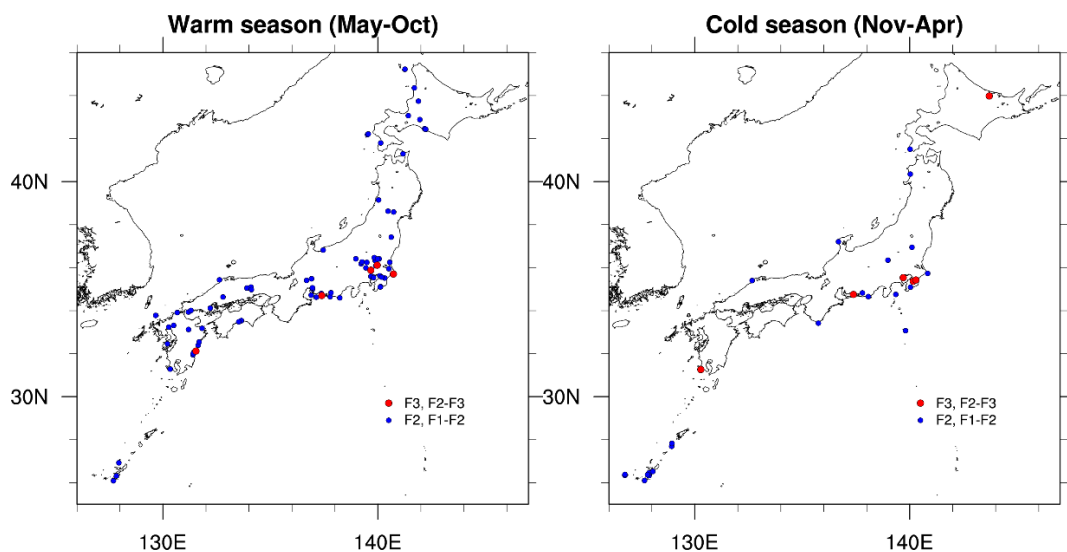


図 23 F3 竜巻（F2-F3 を含む）および F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所
（左：暖候期，右：寒候期）

同時超過頻度分布は、閾値を「超過する」という意味において、F3 規模あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場の生起しやすさを表現していると解釈できる。この分布では、高標高山岳（九州山地，四国山地，中国山地，中央アルプス等）の南北で頻度が大きく異なっており、これら山岳によって太平洋側からの暖気流が遮断される効果

(図 6 参照) が大きな竜巻の発生に影響していることも示唆されている。

EHI を用いた場合、図 22 に見られる両季節の傾向の中間的な傾向が見られる。図 24 は、EHI の閾値を 3.3 (図 20 参照) にした際の超過頻度分布である。通年単位で閾値を設定しているため、中間的な傾向を示すのは妥当である。また、SReH と CAPE の両方の指数を用いる方法においても問題がないことを示唆している。つまり、米国とは異なり (付録 B 参照)、国内においては、SReH あるいは CAPE の片方が異常に大きく、EHI がある程度高い値を示すような事例が稀であるからである。

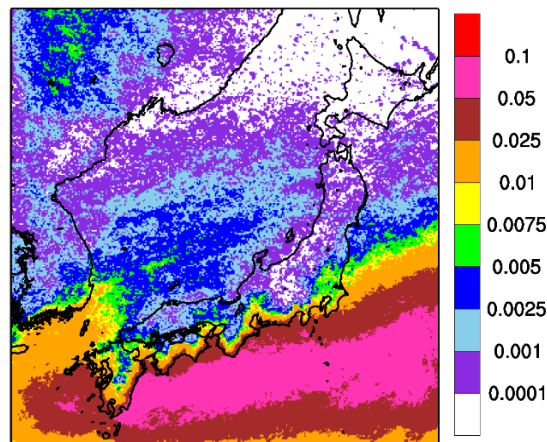


図 24 超過頻度分布 (単位は % ; 通年 ; EHI の閾値 : 3.3)

5.4 F3 規模の最大風速を考慮すべき地域

図 22 より国内最大規模の F3 竜巻が発生するのに適した環境場が形成される頻度には地域差があることがわかった。この分布形態から実際に F3 規模の竜巻を考慮すべき地域を特定するには確率論的な議論が必要である。つまり、国内の竜巻影響評価ガイドで記載されている超過確率 10^{-5} 、米国の評価ガイド等 (Ramsdell and Rishel 2007, U.S. NRC 2007) で記載されている超過確率 10^{-7} を参考として必要となる風速レベルを考慮する必要がある。

図 25 は、ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間 (1961 年～2012 年 6 月) 擬似発生数を分析し、F スケール毎に発生率 (対象 F スケールの発生数/擬似発生数) を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから、この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさを概ね把握することができる。Dotzek et al. (2005) と同様、F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが、F3 規模の発生率は、茨城県以西太平洋側・九州沿岸では、その他の地域に比べ 1 オーダ程度発生率が高くなっており、突風関連指数の分析結果と整合していることがわかる。日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では、F3 竜巻が発生していないため、もっと頻度が小さくなることが予想できる。また、F2 規模になると地域差が小さくなり、F0 規模ではむしろ太平洋側の方が若干少なくなることも見てとれる。

九州電力川内発電所を対象とした竜巻影響評価において、(海岸線に対して陸側・海側 5 km

の竜巻検討地域に対する) ハザード評価結果では、F3 規模竜巻 (風速 93 m/s) に対する超過確率は、大凡 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ にある。上記のように、日本海側を含む北日本では F3 規模竜巻の発生しやすさ、および発生数は、太平洋側に比べて少なくとも 1 オーダは低いことを考慮すると、F3 規模竜巻の風速が生起する確率は、超過確率にして $10^{-7} \sim 10^{-8}$ を下回る。この超過確率レベルは米国の評価ガイドに規定されているレベルを下回っている。そのため、北日本・日本海側の地域では、F3 規模竜巻の風速レベルは基準竜巻風速としては想定範囲外の範疇に入ると考えることができる。

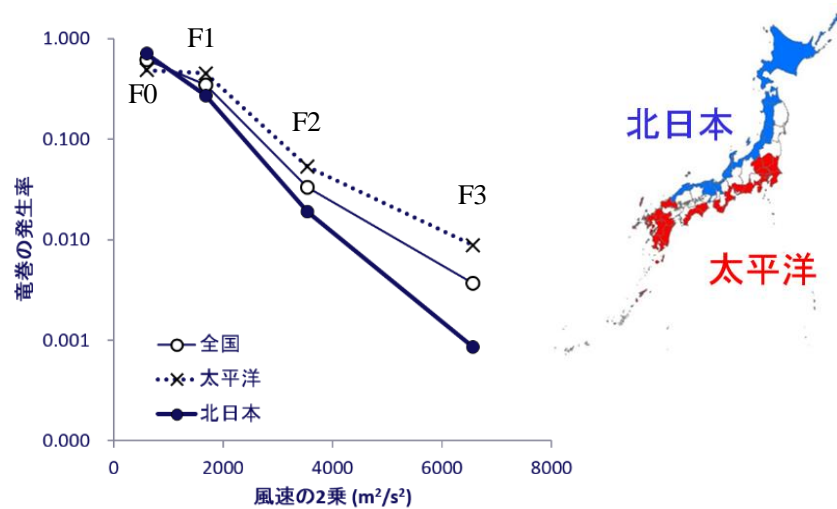


図 25 各 F スケールの発生率

5.5 閾値が同時超過頻度の分析結果に及ぼす感度

小さな閾値を設定すると、雷雨 (非竜巻)・小さな竜巻の発生を勘案することとなるため、全体的に頻度値が上昇し、(発生実績と同様に) 地域性が明瞭でなくなる。一方、非常に大きな閾値を設定すると、F4・F5 規模の非常に大きな竜巻に着目することになり、高頻度域は太平洋側のさらに限定された地域になる。杉本ら (2014b) は、国内最大規模の F3 規模が発生する環境場として適切な閾値を、SReH については $150 \sim 550 \text{ m}^2/\text{s}^2$ の範囲 ($100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 刻み)、最大 CAPE に対しては、 $200 \sim 1500 \text{ J/kg}$ (100 J/kg 刻み) の範囲の値の組み合わせで検討した。最適とみなされた組み合わせに対する結果は図 22 に示した結果に概ね沿ったものとなっている (付録 E)。

突風関連指数を用いたメソスケール分析はスーパーセル型竜巻に適するため、非スーパーセル型竜巻を含む F2 規模の竜巻を含めた分析に SReH や CAPE といった突風関連指数を用いる適用性は微妙ではあるが、ここでは F2 規模以上の竜巻の発生頻度を念頭においた閾値について考えてみる。図 20 の結果から両指数の閾値を

SReH : $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$

最大 CAPE : 1000 J/kg (暖候期), 350 J/kg (寒候期)

とする¹。ただし、暖候期については 参考にできる竜巻が 1 事例しかないため、650 J/kg の 閾値についても検討する。EHI を用いる場合、島根県で発生した 1989/03/16 F2 事例以外 は 1.5~2.0 前後の EHI に入っているが、1989/03/16 F2 事例では 0.8 強にとどまっ ている。そこで、1.5 と 0.8 を EHI の閾値として超過頻度の算出を試みる。

同時超過頻度の算出結果を図 26 に示す。F3 規模以上の竜巻を対象とする場合よりも頻 度は全体的に上がっている。図 22 では奄美・沖縄方面では本州（茨城県以西）太平洋側に 比べて頻度がやや低くなる傾向が推測されるが、図 26 では奄美・沖縄地方でも値が高い傾 向が推測され、実際の発生箇所（図 23）に整合している。

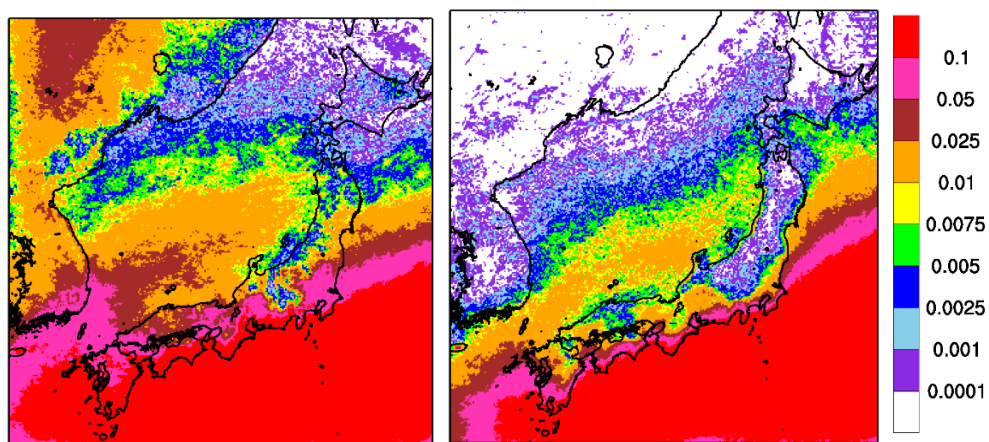


図 26 同時超過頻度分布（単位：%，F2 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）
 (SReH の閾値：200 m²/s²，最大 CAPE の閾値：1000 J/kg（暖）350 J/kg（寒）)

暖候期においては、福島県から宮城県の太平洋側および本州日本海側沿岸での頻度が高 まり、中部地方以西では内陸も含めて頻度が高く、東日本も内陸深くまで頻度が高くなっ ている。実際の F2 規模以上の発生箇所の多くを含包できている。しかし、北海道の石狩地 方以北で F2 竜巻が計 4 個発生しているが、同時超過頻度はかなり低い。CAPE の閾値を 1000 J/kg から 650 J/kg 程度まで落とすと対応性は高まり（図 27），能登半島以北の日本海側・ 北日本における頻度は本州・中日本以南に比べて少し低い程度となって、全体的に地域間 の差は薄れる。図 25（F2 規模以上の場合，全国平均からの差は，太平洋側とそれ以外の 地域ともに 1 オーダの差はない）を踏まえると，図 27 の方がベターと考えられる。

¹太平洋側 F2・F1-F2 竜巻の場合は F3 規模に対する閾値を同時に超過する竜巻がいくつか存在する。その 一部は F3 竜巻（茂原竜巻，豊橋竜巻，つくば竜巻）とともに発生したものである。環境場としては F3 竜 巻が発生しうる状況下でも，マイクロスケールの気象メカニズム等で小さな竜巻が発生することがあると 解釈できる。つまり，閾値は，環境場（親雲スケールの気象場）を観点とした，対象規模の竜巻が発生す るための「必要条件」であるといえる。

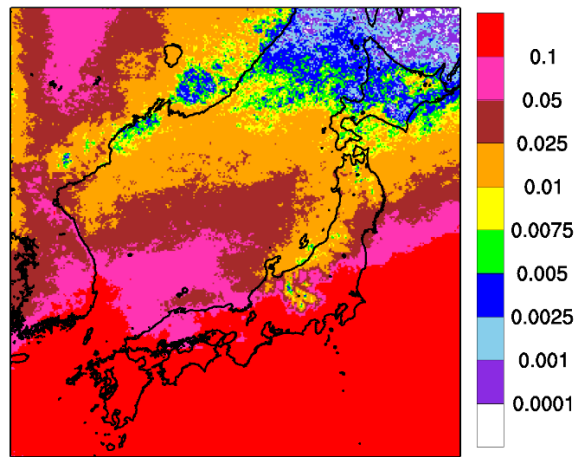


図 27 同時超過頻度分布 (単位：%, 暖候期)

(SReH の閾値 : $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 最大 CAPE の閾値 : 650 J/kg)

オホーツク地方で頻度が高く、F2 規模程度の竜巻が発生する環境場は東北・道南地方に匹敵した確率で形成されうるといえる。

寒候期においても福島県から宮城県の太平洋側、襟裳岬から道南方面の沿岸部、および本州・道南の日本海側沿岸で頻度が大きくなっている。道南より北側の日本海側沿岸で頻度が増えていないのは実態と整合している。中央アルプス以北の中央山地で頻度は低目である。この地域で竜巻は 2 箇所発生している (図 23) が、共に F1-F2 規模の小さな竜巻である (図 28)。

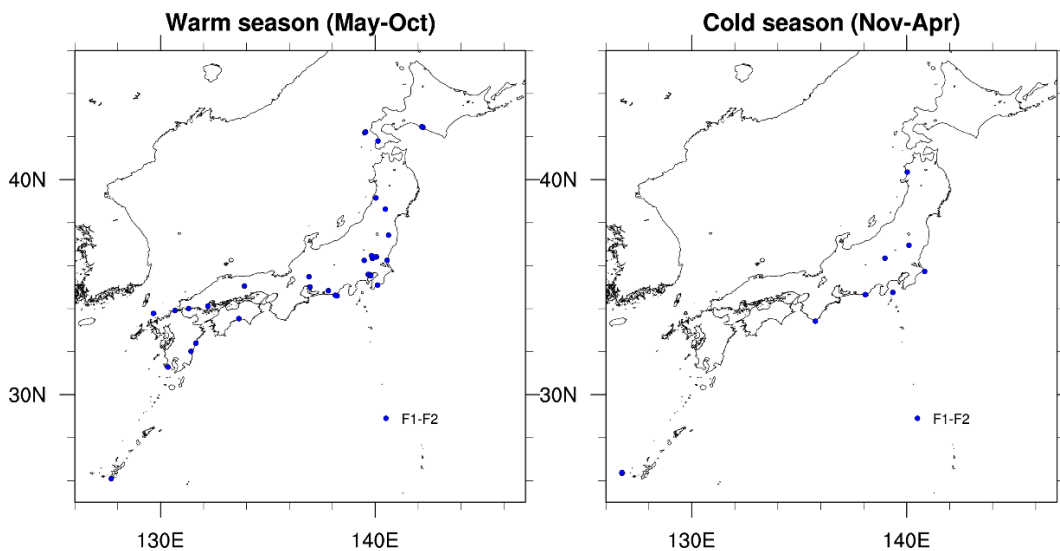


図 28 F1-F2 竜巻の発生箇所

第 4 節における個別竜巻の分析事例において、暖候期に対しては 1988 年以降に発生した F2 あるいは F1-F2 竜巻が 1 事例しかない。図 26 に示した東北太平洋側沿岸から道南・道東にかけての頻度において、暖候期の方が低いというのは海水温の高さの季節性との整合性にも欠けるため、最大 CAPE の閾値は 1000 J/kg よりも小さくした方がよいと思われる

る。図 27 で用いた閾値 650 J/kg の妥当性の判断は今後発生するであろう F2 規模の竜巻の発生を踏まえた分析結果をもとに再度検討する必要があるが、概ね発生状況の地域性は表現できている。

EHI を用いた場合、EHI 1.5 では、図 26 の暖候期、寒候期の状況を平均的に見た時の頻度分布に大凡あてはまる（図 29 左図）。1989/03/16 F2 事例を参考に 0.8 まで閾値を下げると、地域性は殆ど見られなくなる（図 29 右図）。上述のように、暖候期の分布は図 26 よりも閾値を下げた図 27 の分布の方がよい傾向が見られることから、EHI 1.5 の結果は頻度を過少に評価している可能性がある。しかし、閾値を 0.8 まで落とした結果では、茨城県以西太平洋側+九州沿岸と、それ以外の地域との差がかなり小さく、落としすぎのようである。いずれにしても、F2 規模以上の竜巻を対象とする場合、F3 規模以上を対象とする場合とは異なって季節間での発生数の差があり（図 23）、EHI を用いた通年評価をすることについては議論の余地が大きい。

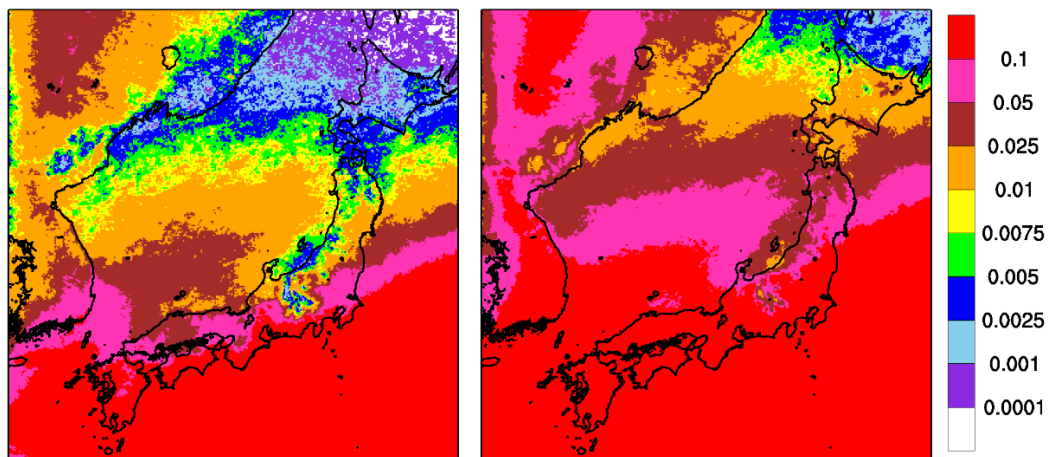


図 29 超過頻度分布（単位は %；通年；EHI の閾値：（左）1.5，（右）0.8）

6. 佐呂間竜巻に対する考察

図 22 の同時超過頻度分布において、北海道では超過頻度が非常に低いですが、網走支庁網走支庁佐呂間町では F3 竜巻が発生している。ここではこの竜巻に対する考察および影響評価における取り扱いの方向性について述べる。

佐呂間竜巻の発生メカニズムについて過去の知見を踏まえ、図 30 のように模式的に示した。図 11 に示したように、当竜巻発生時においては、太平洋側からの暖気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で、高い SReH を伴う寒冷前線が通過しており、図 20 に示すように、SReH、CAPE とともに一定の高さを保持していた。この意味で、太平洋側で過去に発生した F3 竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有する。ただし、CAPE については、図 11 に示したように、SReH とは異なり、降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。一方、加藤（2008b）が以下のように指摘しているように、この竜巻に対しては周辺地形によるマイクロスケールの影響を無視できない。

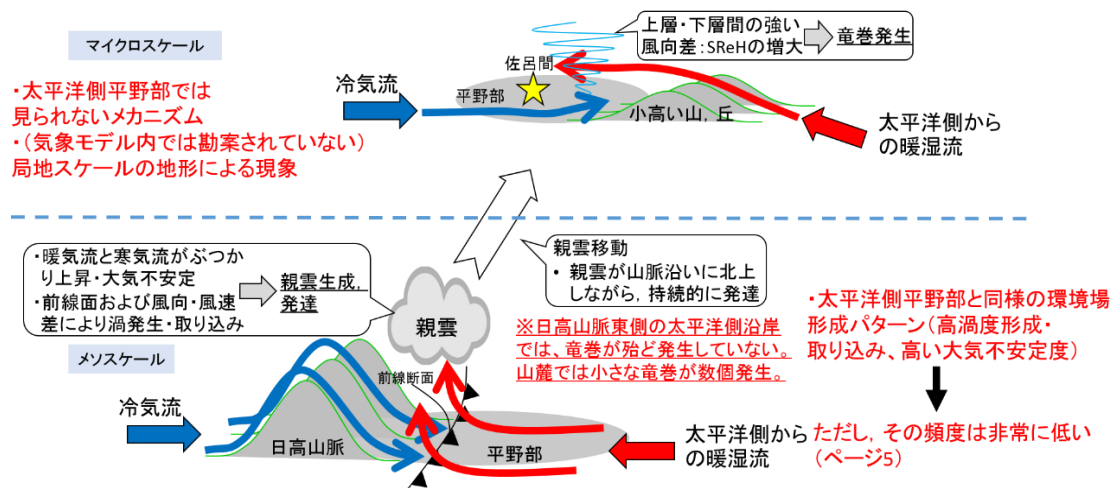


図 30 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

「下層での鉛直シアの強化は、ガストフロントの前面下層の気圧低下による水平風加速に加えて、強い鉛直渦度生成領域の風上（南南東）側に南南西～北北東に伸びる最大標高 600 m 以上で幅 10 km ほどの尾根による山岳波の影響を少なからず受けている。実際の竜巻発生位置の風上側にも同様な尾根が存在していることから、佐呂間竜巻は地形の影響を受けて発生したと考えられる。」

このマイクロスケールの効果は環境場では考慮できない（解像できない）ため、両指数の値は、特に SReH では図 20 でプロットした結果よりも高まっている可能性が高い¹。

前節でも議論したように、オホーツク地方は北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが、F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成されがたい、つまり F3 規模に到る程度に大気不安定な空気塊の流入と高渦度を有した総観場の通過が同時に発生する頻度が極めて低い。佐呂間竜巻が地形影響を受けていることを踏まえると、竜巻発生を観点とした気候としては、この地域で F3 規模の竜巻発生に適した環境場は極めて生起しがたく、佐呂間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には（特に最大 CAPE においては）微妙な環境場であった²が、近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に到ったと解釈するのが妥当と考えられる。

上述のように、竜巻発生環境場に関する同時超過頻度分布（図 22）、および発生率の分析結果（図 25）をもととした超過確率の議論では、竜巻検討地域の設定および基準竜巻風速 V_{B1} の設定に佐呂間竜巻を特段考慮する必要はない。それはこの竜巻が基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的・小さな空間スケールを有する地形影響を受けたものであるからである。むしろ、この影響については、竜巻影響評価ガイドにおける設計竜巻 V_D の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿っている。

¹ MLCAPE の値は非常に小さく（瀧下ら 2011）、MUCAPE の値は大きめであることから、尾根を乗り越えた先の佐呂間町上空における（寒冷前線起因の）冷気流の上側で、大気が局所的に不安定になっている可能性は否定できない。

² 佐呂間竜巻は季節の変わり目に発生したが、暖候期の傾向が強かった（図 26 参照）といえる。

佐呂間竜巻のような竜巻が発生するかどうかについては、当時の気象場（総観場（寒冷前線）、気流場、大気不安定度）と周辺地形の類似性を確認すればよい。確認のポイントとしては、これまでに説明した気象場の分析結果を踏まえれば以下の2点である。

- ・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域である。
- ・近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入方向に尾根状の丘・山が存在すること。

この条件を満たせば、寒冷前線通過時に、暖かい空気塊が尾根を乗り越えて寒冷前線起因の冷氣流の上側に流入できる。このような確認を行う必要があるのは、東北太平洋側や北海道オホーツク地方・道南地方等太平洋に面した地域に立地した発電所である。発電所は沿岸部に立地しているため、佐呂間竜巻で影響を及ぼしたような尾根形状の島が沖近くに存在するかがポイントとなる。日本海側沿岸部に立地した発電所においては、高標高山岳の影響が大きいため（図6）、不安定性の非常に大きい暖湿流が流れ込むような状況は生じがたい。

7. まとめと今後の課題

以上、数値気象モデルおよびモデル解析データをもととした竜巻検討地域の設定方法について、特に検討地域における最大竜巻規模を基準竜巻風速 V_{B1} として採用できるかどうかを観点として、竜巻発生環境場の分析を行った。その結果、以下の結果が得られた。

- ・ F3 規模の竜巻、F2-F3 規模の竜巻（1988年以降）、日本海側 F2 規模の竜巻（1988年以降）、および日本海側 F1-F2 規模の竜巻（1988年以降）を対象に、WRF モデルと ECMWF 再解析データを用いた気象解析を行い、5 km 解像度での気象場と突風関連指数（SReH・CAPE）の分布を分析した。
- ・ 上記竜巻事例に対して竜巻発生地点周辺における SReH と CAPE の両指数の値を分析し、F3 規模以上の場合と F2 規模以上の場合の両方に対して、地域性を考える際の妥当な閾値について検討した。
- ・ F3 規模以上の竜巻を対象とした閾値を同時に超過する頻度の分布を50年間の長期再解析データをもとに算定した。その結果、茨城県以西の太平洋側沿岸および九州沿岸の平野部で頻度が高く、実際の竜巻発生箇所とも整合していた。一方、その他の地域では、上記太平洋側地域に比べて1~2 オーダ以下の頻度であった。
- ・ 総観スケールでの気流場では、日本列島の高標高山脈によって太平洋側から流れ込む不安定性の高い暖湿流が遮断され（図6）、この気流パターンがF3規模の大きな竜巻が日本海側で発生せず、茨城県以西の太平洋側沿岸域において発生するという実績と関係していると考えられる。大きな竜巻はさまざまな総観場区分に発生しているが、総観場区分で「局地性」と判定された竜巻は、スケールの小さな非スーパーセル型であり、上記太平洋側沿岸域と対応していない。一方、総観場として「台風性」と判定された大きな竜巻の発生箇所は対応している。そのため、台風性の大きな竜巻の発生箇所を検討地域の設定の参考にすることは一つの方法として考えられる。

- ・ 同時超過頻度分布の特徴は、擬似竜巻発生数を用いた F3 竜巻の発生率の地域差と対応していた。2つの突風関連指数を用いた分析は地域性検討に有効であると考えられる。また、超過確率の観点では、 10^{-7} の超過確率以上の風速を検討対象とするのであれば、F3 竜巻の風速レベルを考慮すべき地域は上記太平洋側・九州の沿岸域に限られる。
- ・ 佐呂間竜巻に関連して、オホーツク地方は気候的には F2 竜巻が一定以上の生起確率で発生しうる地域であるが、F3 規模以上の竜巻発生環境場は極めて形成されがたい地域である。佐呂間竜巻に対しては周辺地形の影響を少なからず受けたことが報告されており、基準竜巻設定ではなく、設計竜巻設定時にこの竜巻と類似したものが発生する可能性を定性的に考慮するのが評価ガイドに沿っている。
- ・ EHI を用いた評価は、F3 規模以上の場合では概ね良好であるが、F2 規模以上の場合では、季節間の発生数の違いが大きいため、通年レベルでの評価が難しいようである。現時点では、季節を分けて SReH と最大 CAPE を用いて評価の方がベターだと思われる。
- ・ メソスケールで分析した結果は、竜巻の発生メカニズムの観点において、大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件を把握する上で有効である。総観場傾向から設定した検討地域は、メソスケールでの分析結果と整合した。
- ・ メソスケールでの検討によって得られた必要条件的な傾向は、突風関連指数の分析においては、実際には大きな竜巻が発生しなくとも発生しうる環境場であった事例を排除していないため、実態よりも広い範囲で大きな竜巻が発生しうる地域を評価する点において保守的な評価を行っているといえる。

今後の課題として、将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できないため、最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

参考文献

- Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. Mon. Wea. Rev., 843-856.
- Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J. Atmos. Res., 21, 634-639.
- Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. Wea. Forecasting, 15, 61-79.

- Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Doswell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. *Wea. Forecasting*, 17, 456-471.
- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. *Atmos. Res.*, 67-68, 117-133.
- Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. *Geophys. Res. Letters*, 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scale. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.
- Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.

- Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.
- Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
- Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3408-3436.
- Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the advanced research WRF version 2. *NCAR Tech. Note*, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- Suzuki, O, H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
- Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere*. Cambridge, 346 pp.
- U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1.
- Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
- 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- 大野久雄, 2001: *雷雨とメソ気象*. 東京堂出版, 309 pp.
- 原子力規制委員会, 2013: 原子力発電所の竜巻評価ガイドの制定について. 原管研発第13061911号, 2013年6月19日制定
(http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628_jitsuyoutatsumaki.pdf).
- 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究 -, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究 (III) - スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究 -, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014a: 国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について. 2014年度保全学会年次学術講演会, 395-402.
- 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014b: 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討. 2014年度日本気象学会春季大会講演予稿集, B464.

瀧下洋一，2011：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について－突風に関する防災
気象情報の改善－．測候時報，78，57-93.

新野 宏，2007：竜巻．天気，54，933-936.

橋本篤，平口博丸，豊田康嗣，中屋耕，2011：温暖化に伴う日本の気候変化予測（その1）
－気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用性評価－．電力中央研究所報
告 N10044，22pp.

橋本篤，平口博丸，田村英寿，服部康男，松梨史郎，2013：領域気候モデルを用いた過去
53年間の気象・気候再現．電力中央研究所報告，N13004，18 pp.

付録 A 温位について

気体の状態方程式によれば、同じ気圧下で密度が小さいほど気体の温度は高くなる。したがって、ある空気塊が周囲よりも高温であれば、その空気塊は浮力を得て上昇する。この時、下層での空気塊の気温が高いからといって、ある高い高度に断熱的に持ち上げた空気塊は、その高度の周囲の気温より高いとは限らない。同じ高度（気圧）で気温の高低を比較してはじめて、空気塊が浮力を受けるかどうか分かる。温位を用いれば、本文の式(3)のように、1000 hPa という基準気圧（高度）での気温を算出するため、二つの空気塊の相対的な暖かさや浮力の発生有無を容易に判断できる。

1 万メートル程度上空における飛行機の客室内の気温を例にとる。客室内は与圧されて 800 hPa 程度の気圧となっており、温位は 310 K 程度とする。それに対し、飛行高度での気圧（100～200 hPa）での気温が約-70 °C とすると温位は 360 K 程度である。外気をそのまま取り込むと、温位は保存するため、客室内では温位 360 K に対する気温は約 60 °C となるため、外気を取り込んだ際に空気を冷やす必要がある（吉崎・加藤 2007）。上空ほど気温は低いため、パラドックス的に感じるが、このように温位を用いれば空気塊の暖かさについて容易に把握・比較することが可能である。温位が高いほど暖かく、上昇しやすいということから、大気不安定性を論じるのに温位や相当温位が使われるのはそういう理由である。

参考文献

吉崎正憲, 加藤輝之, 2007: 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店, 187 pp.

合させた EHI の方が区別できていることが見てとれる (図 B-2)。ただし、F2 規模以上の竜巻が発生した範囲のうち値の小さな EHI で F1 規模以下の竜巻が発生しているケースもある。全ての竜巻・非竜巻を対象とすると、EHI のヒストグラムの結果では、竜巻発生指標としての EHI の有効性が低いと考えられるという報告もある (櫻井・川村 2008)。上記で取りあげた各文献を踏まえれば、突風関連指数の適用性は F0・F1 規模以上か非竜巻かという小さな竜巻の発生有無の区別には向かず、F2 規模以上か否かの区別では適用性が高まり、むしろ F3・F4 規模以上か否かといった大きな竜巻の発生有無を議論するのに適しているといえる。なお、Rasmussen and Blanchard (1988) では、F3 規模以上の高強度の竜巻とそれ以外を区別することについては検討していない。

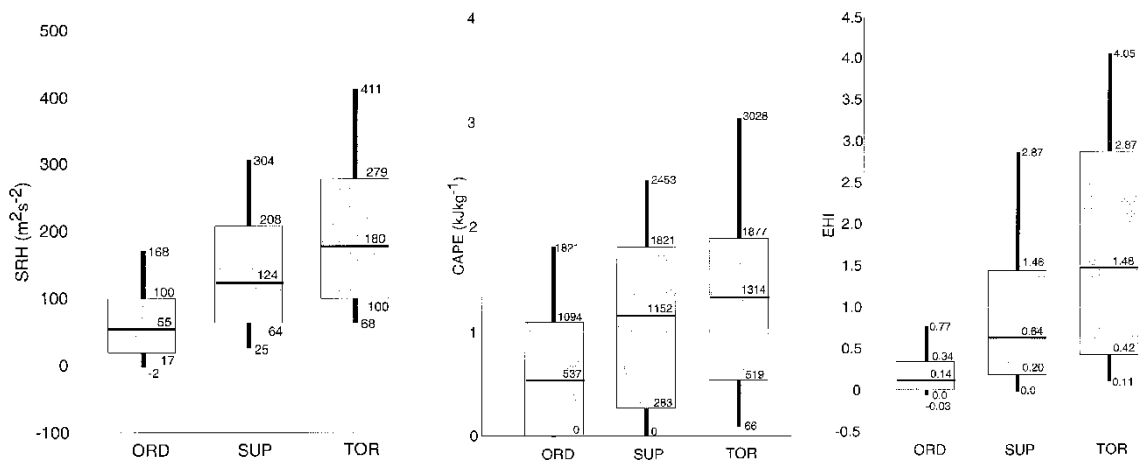


図 B-2 各突風指数 (左: SReH, 中: CAPE, 右: EHI) に対する箱ひげ図 (箱は値の小さい方から 25%から 75%の範囲を表し、箱中の太線は中央値を示す。TOR は F2 規模以上の竜巻, SUP は F1 規模以下の竜巻, ORD は非スーパーセル雷雨を表す。)

Rasmussen (2003) は、SReH を求める際の地上からの層厚について検討し、これまでガイドライン的に使われてきた 0-3km SReH (Davies-Jones et al. 1990) の殆どは、地上から 1 km までの大気 (0-1km SReH) に起因するため、SReH 算出の層厚を 0-1km とすることを提案している。その他、SReH を求める際のストームの移動ベクトル算出方法についてもいくつか方法がある。指数の算出手法に関連して、CAPE についてはより複雑である。特に、数値モデルによる解析値・予測値を算出する場合、対流不安定が解消されることにより CAPE 値が小さく見積もられる場合がある (瀧下 2011)。そのため、Rasmussen and Blanchard (1998) では、その影響を軽減する算出方法を用いている。また、CAPE を算出する際の持ち上げ空気塊の性質によりさまざまな種類の CAPE がある。例えば、地上数キロまでの大気の平均的な性質を持たせることもあれば (MLCAPE と呼ばれる)、最大の不安定度になる高さの空気塊を持ち上げることもできる (MUCAPE)。MLCAPE がよく用いられることが多いが、一般的に MUCAPE の方が値は高く (Chuda and Niino 2008)、米国の SPC (Storm Prediction Center) のような実運用の場で MUCAPE が SCP (= MUCAPE/1000 × 0-3km SReH/100 × Bulk Richardson Number/40) の算出に用いられる場合がある (※今回の検討でも MUCAPE を用

いている)。特に、下層に寒気があり、その上に暖気がある安定した条件下のケース（佐呂間竜巻の佐呂間町付近では地形影響でその傾向が増大していると考えられる）では MLCAPE にもとづく不安定度は非常に小さくなる。このように、SReH や CAPE の算出方法についても議論すべき余地がある。

ゾンデデータを用いる解析は、竜巻発生地点との距離差が大きいことが課題である。そこで、数値気象モデルによる解析・予測による格子点データを用いた分析もなされている。米国の水平解像度 40 km 予報データ（1 時間毎）を用いた分析では (Thompson et al. 2003), SReH, CAPE, EHI の全体的な傾向として Rasmussen and Blanchard (1988) と同様の結果が得られているが、F2 規模以上の竜巻に対する EHI の中央値が 2 程度と大きくなる等、Davies (1993) に近い結果となっている。SCP では F2 規模以上とそれ以外の差が顕著であり (図 B-3), CAPE や SReH に関連した複合関連指数として EHI 以外の指数の検討の余地がある。

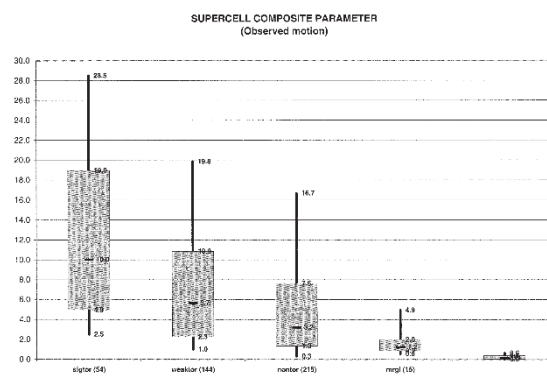


図 B-3 SCP に対する箱ひげ図 (sigtor は F2 規模以上, weaktor は F1 規模以下, nontor は非竜巻, mrgl はややスーパーセル化したストーム, nonsuper は非スーパーセルストームを表し、括弧内の数字は事例数を表す。箱ひげ図の意味は図 B-2 と同じ。)

飯塚・加治屋 (2011) は、気象庁のメソ客観解析データ（水平解像度 10 km・鉛直総数 16 層・3 時間毎）のデータを用いて、2006 年 2 月から 3 ヶ年の間に発生した 141 個の竜巻・非発生事例を分析した。その際、発生地点から 40 km 範囲内に存在する格子点に対する突風関連指数の最大値をピックアップしている。他文献と同様に CAPE や SReH 単独では竜巻・非竜巻の区別、あるいはスーパーセル竜巻・非スーパーセルの区別が明瞭でないが、EHI のような複合パラメータではより明瞭になっている (図 B-4)。図 B-4 では F スケール別の傾向も示されているが、F1 規模と F2・F3 規模 (F3 は佐呂間竜巻のみ) との間に差はなく、米国の結果とはやや異なる。現象論の観点では、大きな竜巻はスーパーセル化が明瞭となり、大きな空間スケールの現象が駆動力 (large-scale forcing) となって発生するため、数 km から十数 km 程度の空間代表性を有する格子点データやラジオゾンデデータをもととした突風関連指数で十分に議論ができる一方、小さな竜巻は大きな竜巻を伴わない場合は large-scale forcing の影響が小さい、局地的な擾乱に伴う頻度が多くなるため、突風関連指数との関連性が薄れていると解釈できる。

瀧下 (2011) は、気象庁の数値予報資料 (MSM) (気象庁メソ客観解析データと空間分解能等は同じ仕様だが解析データではなく、予報データである) を用いて、2004 年から 3 ヶ年

に発生した竜巻やダウンバースト発生時の SReH, CAPE, EHI の関係を調べた (図 B-5)。発生地点を中心とした 50 km 四方内の最大の値を採用している。この図から、最も大きく、唯一の F3 竜巻である佐呂間竜巻の環境場において (ML) CAPE が非常に小さく (それゆえ、EHI も非常に小さく)、また、F1 竜巻と F2・F3 竜巻で特段の違いが見られないことから、指数で竜巻強度を判断するのは困難であると結論づけている。

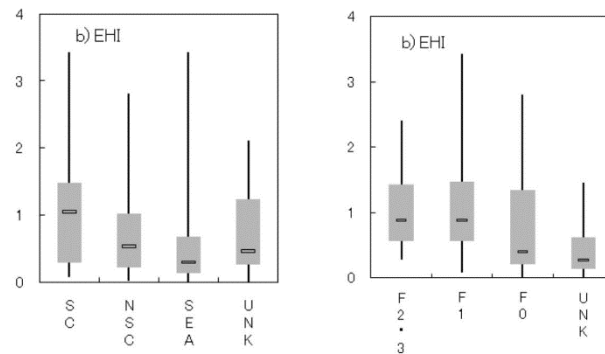


図 B-4 EHI に対する箱ひげ図 (左: 竜巻種別, 右: F スケール別; SC はスーパーセル型竜巻, NSC はノンスーパーセル型竜巻, SEA は海上竜巻, UNK は陸上竜巻でスーパーセル判定ができなかった竜巻を表す。)

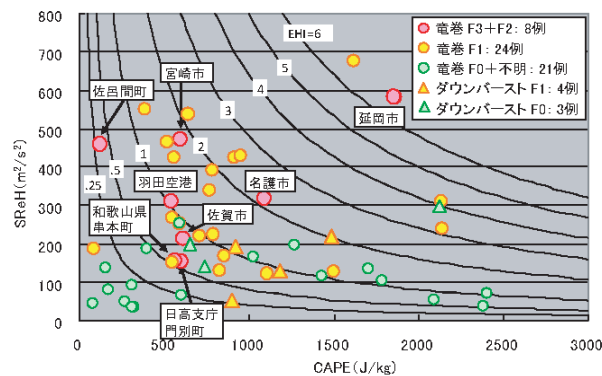


図 B-5 竜巻およびダウンバースト事例における分析例

F1 竜巻と F2・F3 竜巻の区別については、これまで挙げた文献同様、やはり困難なようである。しかし、佐呂間竜巻において CAPE 値が非常に小さい点についてはその解釈に注意しなければならない。同種のデータを用いた飯塚・加治屋 (2011)は、850 hPa 以下の総数は 7 層しかなく、ゾンデ観測データよりも鉛直分解能が粗いため、結果の解釈には注意を要することを指摘している。つまり、CAPE 算出において、適切な空気塊を持ち上げていない可能性は否定できない。また、加藤 (2008a)が指摘するように、佐呂間竜巻発生時には、佐呂間町の南東側にある山を暖気流が乗り越え、佐呂間町付近では下層では冷たい西よりの気流と、その直上に東よりの暖気流が流れ込み、鉛直シアが増大していたと考えられる。

このような場合、地表面付近がやや安定傾向となるため上述のように、MLCAPE の値は非常に小さくなる。MUCAPE の場合は地表面付近の大気が冷たい場合に、その上空で発生しうる elevated convection を考慮できるが、佐呂間竜巻に対して結果的に CAPE 値が大きくなる（本文参照）。つまり、算出方法に検討の余地が大きいため、佐呂間竜巻といった 1 つの F3 竜巻事例をもって、SReH、CAPE 系の突風関連指数の限界を断じることは難しい。

B-2 今後の研究の方向性

以上のように、検討時点でのデータの品質等々が低かった等、各文献ともに検討の余地があり、今後は各文献の知見を全て踏まえた解析方法・データをもって分析・考察することが重要である。大局的には、スーパーセル化が顕著な（F3 規模程度以上の）大きな竜巻とそれ以外の竜巻の発生環境場は、EHI 値の差が有意である傾向が見られることから、SReH 値と CAPE 値とから地域レベルでの傾向を議論できる可能性がある。また、こうした突風関連指数の活用は、F2 規模以上とそれ以外の比較が限度であり、F1 規模以上とそれ以外というように、小さな竜巻の発生予測への指数の活用は向かないと考えられる。

欧米や国内の気象学会では、突風関連指数の有効性について現在も検討がなされている。もととするデータ品質の観点では、これまで離れた箇所の高層ゾンデデータや空間解像度の粗い解析・予測データをもとに分析されてきた点が課題であり、高精度な解析データをもって、これまでの文献・知見が正しいかどうか確認する必要がある。その際、過去文献において指数値の算出に工夫されている点を可能な限り採用するとともに、SReH、CAPE をはじめとした単一指数もしくはそれらの組み合わせ（加藤 2008b）に加え、EHI、SCP、STP 等の複合パラメータの説明性の高さについて広範に適用性を検討することが求められる。

現時点では、時空間解像度の高い長期気象解析データ（水平解像度 5km・10 分毎データ）をもとに、CAPE に対する算出方法を工夫した上で、SReH、CAPE の特性、加藤（2008b）と同様に SReH と CAPE を組み合わせて用いた方法、および EHI について検討し、SReH と CAPE を用いる方法と EHI を用いる手法とでは、F3 規模以上の竜巻が発生する地域性を観点とした解析結果に大差がないことを確認した（本文参照）。

参考文献

- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO., Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1. Wind shear and instability. *The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards*. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.

- Johns, R. H., J. M. Davies, and P. W. Leftwich, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combination of wind and instability parameters. *The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards*. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
- Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243-1261.
- 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (III) -スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究-, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究 (I) -竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究-, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について -突風に関する防災気象情報の改善-. *測候時報*, 78, 57-93.

付録 C 気象モデルの概要

気象モデルとは、物理・力学的法則に基づいて、物理量の時間変化を計算機により数値的に解くために各諸過程を概念化したもので、気象庁による日々の気象予報もこの気象モデルを用いて実施されている。図 C-1 のように計算対象領域を 3 次元格子で覆い、各格子点上で気圧、風などの物理量を定義する。観測データや気象庁等の解析・予報結果をもとに計算開始時刻の物理量を決めて、計算領域境界部の値を時々刻々変化させながら(図 C-2)、運動方程式、熱力学方程式、連続式、および水分量の保存式等を数値積分すると、将来時刻における気象要素の値が計算される。各方程式中の運動量や熱・水のソース・シンク項は各物理過程によって生み出される(例えば、水蒸気から水滴が生成されるとその潜熱が熱力学方程式中のソースとなる)が、気象モデルでは図 C-3 に示すような物理過程がモデル化され、力学系の各保存式のソルバーと連携している。

この種の気象モデルは、放射性汚染気塊の輸送量計算にも使用されており、WSPEEDI-II (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information; 世界版緊急時環境線量情報予測システム第 2 版)では、本検討に用いた WRF モデルの前身に位置づけられる MM5 (PSU/NCAR Mesoscale Model version 5 ; Dudhia 1993) が気象場の入力情報の作成に用いられている(山澤ら 1997)。WRF モデルは、MM5 の力学系・物理モデル共に大幅な改良が加えることにより開発されたものであり、現在米国においては気象の現業・研究の両面で活用されている。また、わが国を含めた諸外国においても広く活用されている。

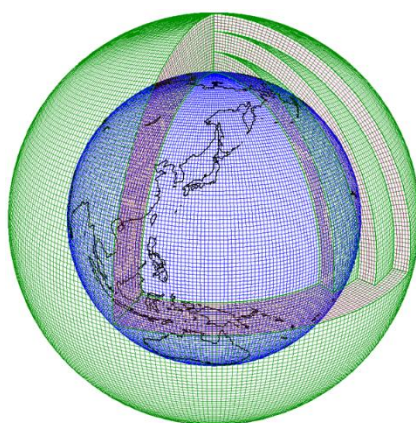


図 C-1 計算グリッド構造の例

(気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html> より)

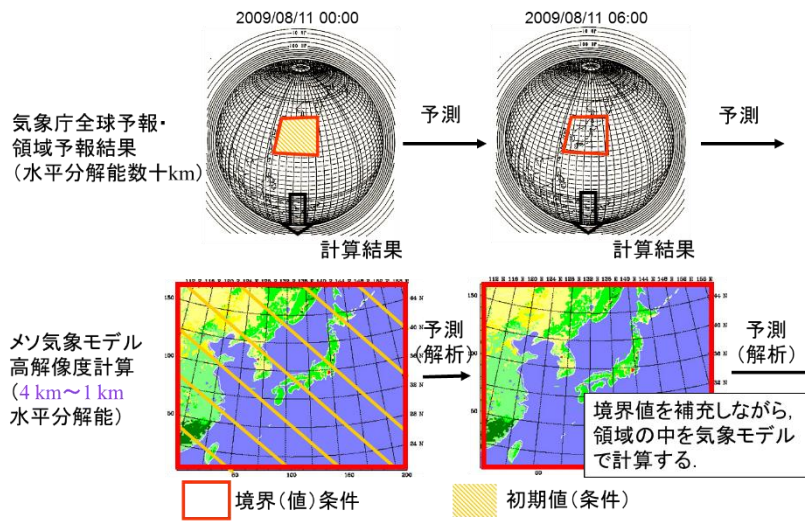


図 C-2 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図 (気象庁全球モデルを例に)

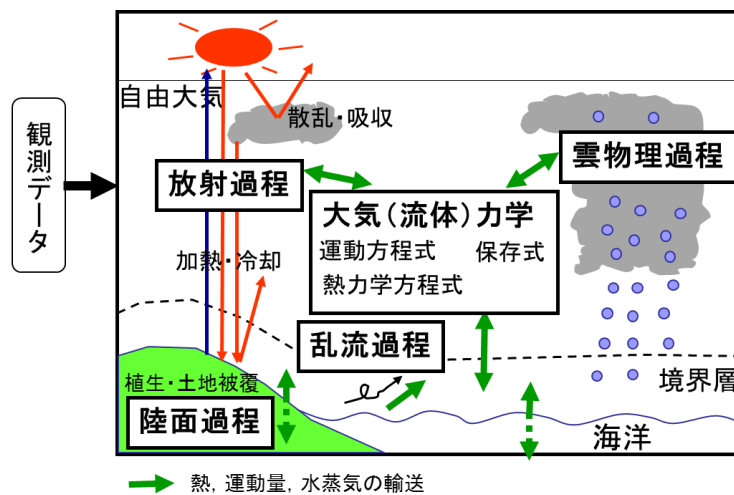


図 C-3 気象モデルを用いた計算の模式図

参考文献

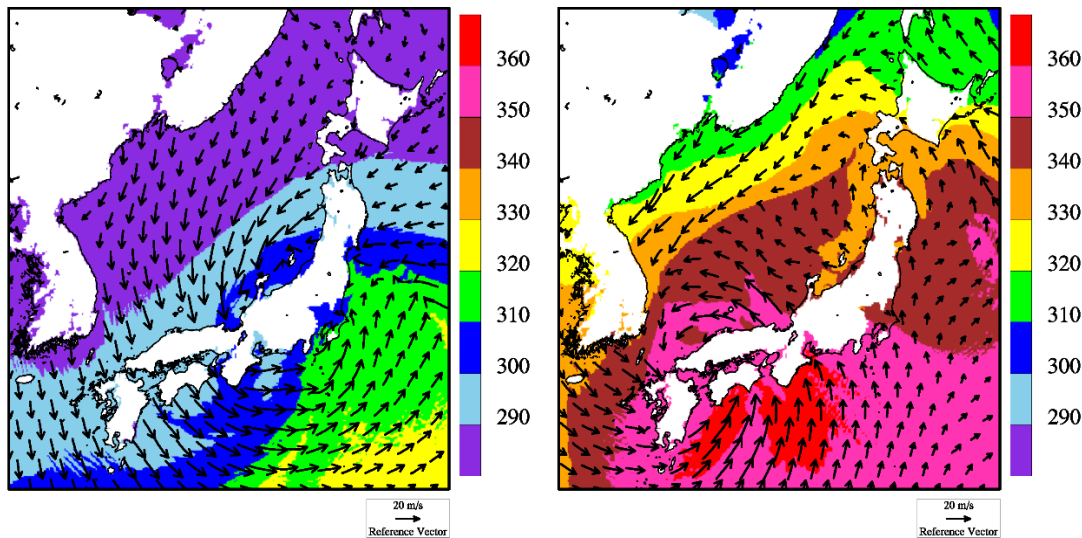
Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513.

山澤弘実, 茅野政道, 永井晴康, 古野朗子, 1997: 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI の開発と検証. 日本原子力学会誌, 39, 881-892.

付録 D 高標高山岳が及ぼす影響

1990年12月11日に千葉県茂原市で発生した日本最大級F3竜巻時(総観場:暖気の移流、気圧の谷、寒冷前線)の海拔100m高度における気象場(風向・風速および相当温位の分布)を図D-1左図に示す。太平洋上は(相当温位の高い)暖かく湿潤な大気状態にあり、12月の冬季としては暖かく湿った大気(緑色)が太平洋側から千葉県南東部房総半島沿岸に発生した地点に流れ込んでいることが解析されている。この大気は内陸部に中心をもつ低気圧の大きな渦に沿って日本海側へ運ばれているが、日本海側では、相当温位が低くなり、不安定性が解消されていることがわかる。

このような高い山岳の南側と北側で空気塊の性質が変わることはいずれのF3規模の竜巻でも見られている(例えば、図D-1右図)。太平洋側から流入した大気下層の空気塊が山岳を越えようとした場合、空気塊の上昇に伴い気温が低下し、昇り斜面上空で空気塊が飽和して降水粒子が生成され、湿潤不安定な状態が解消されることもある。この場合、空気塊が山岳を乗り越えたとしても乾燥・安定化の進んだ空気塊になるため、太平洋沿岸部で竜巻を引き起こした大気が、例えば日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えて日本海側に流入して大きな竜巻を引き起こすことは考えられない。つまり、台風等の接近・通過時の渦度が高い時間帯に同時に太平洋側から暖かく湿った空気塊が特に開けた平野部(関東平野、濃尾平野、宮崎平野等)に流入するというF3規模竜巻の発生シナリオが日本海側ではあてはまりにくいことを示唆している。



図D-1 海拔100m高度における風向・風速および相当温位(単位:K)
(左:1990/12/11 F3事例, 右:1999/09/24 F3事例)

付録 E 閾値の感度

突風関連指数に不確実性が存在するのは確かである。そこで、今回設定した閾値に対してばらつき分を考慮し、ばらつき分が超過頻度分布にどのような影響を及ぼすかについて確認した。

(a) EHI

今回用いた閾値 3.3 に対し、3.0 および 3.6 (もともとの値の±1 割程度) の閾値にした場合の超過頻度分布を図 E-1 に示す。閾値を 3.6 にした場合、関東平野内での F3 竜巻の発生箇所を包含できておらず (図 E-2 参照)、値として大きすぎることをわかる。一方、閾値を 3.0 にすると、対馬海上からの暖気流入に対応して島根県沖に高い値 (超過頻度分布の 0.01% 前後以上) が見られるようになる。いずれの閾値においても、日本海側沿岸域・北日本と太平洋側沿岸域との差は維持されている。

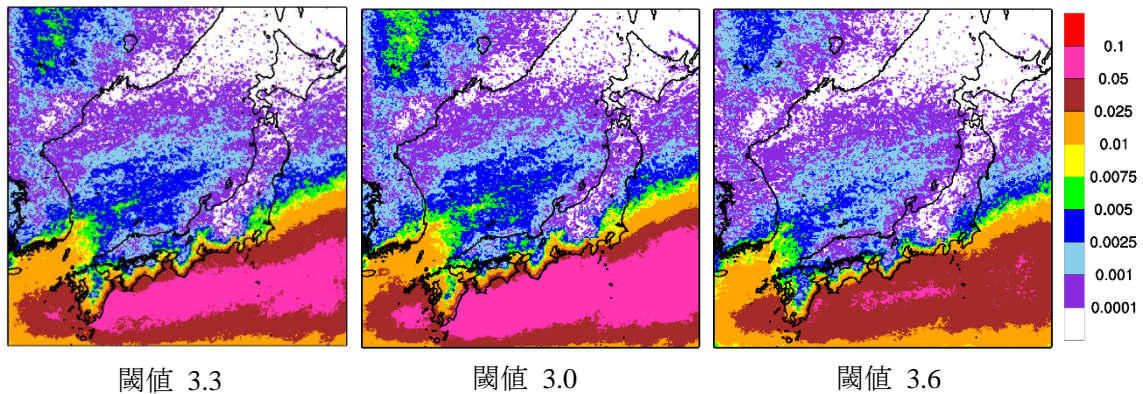


図 E-1 同時超過頻度分布 (単位は %。EHI の閾値は左から、3.3, 3.0, 3.6 である。)

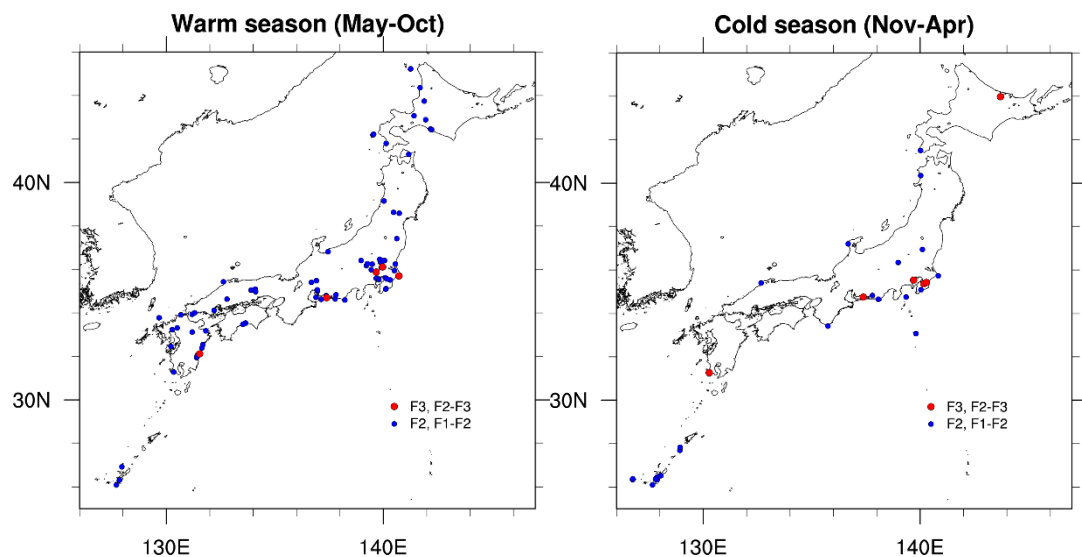


図 E-2 F3 竜巻 (F2-F3 を含む) および F2 竜巻 (F1-F2 を含む) の発生箇所 (左: 暖候期, 右: 寒候期)

(b) SReH と CAPE (暖候期)

今回用いた閾値は、SReH が $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE が 1600 J/kg である。そこで、SReH を $200 \sim 300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ($50 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 刻み)、CAPE を $1550 \sim 1650 \text{ J/kg}$ (50 J/kg 刻み) で変化させ、各組み合わせで検討した。図 E-3 は 5 ケース分プロットしたものである。閾値を小さくするほど、頻度は全体的に大きくなる。

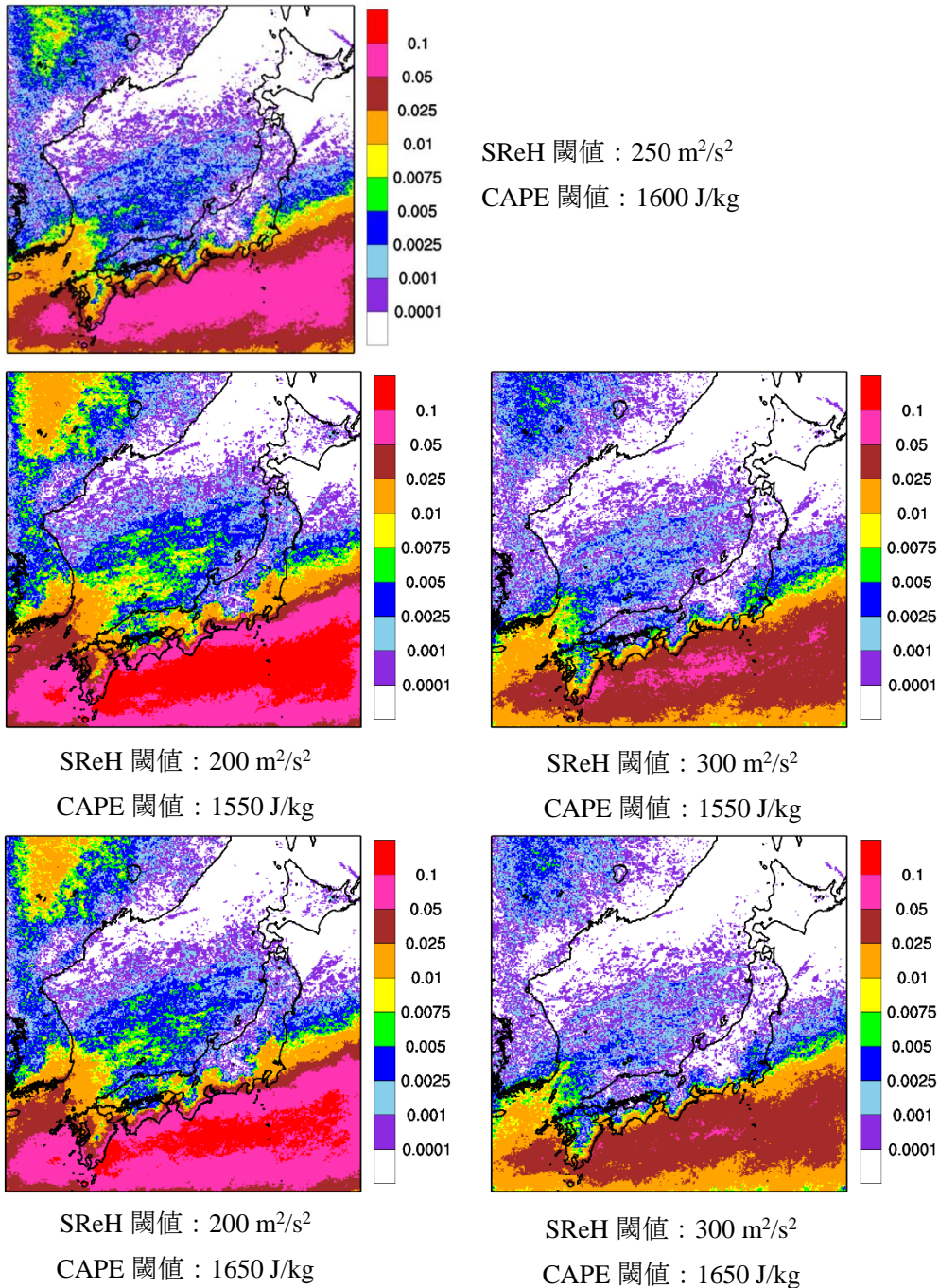
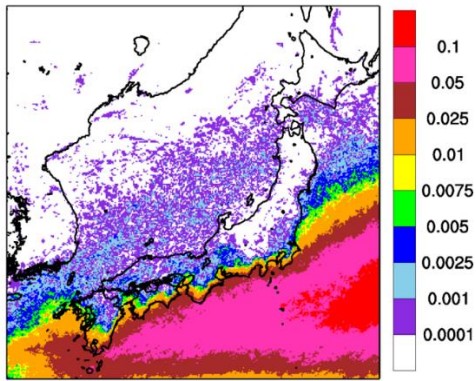


図 E-3 同時超過頻度分布 (暖候期, 単位は %)

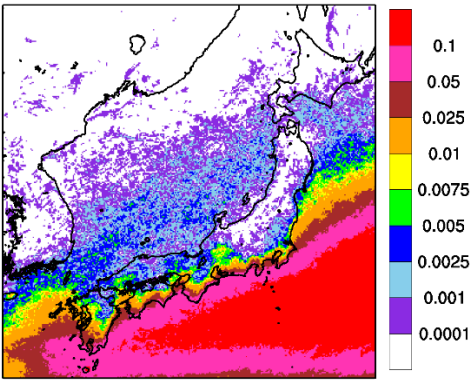
今回設定した閾値（SReH の閾値：250 m²/s²，CAPE の閾値：1600 J/kg）に対する頻度分布の 0.01 % 前後よりも大きな地域が，発生箇所を包含していることがわかる。特に，いずれかの閾値を大きくすると，EHI の場合と同様に，関東平野内の F3 竜巻の発生箇所を包含できない傾向にある。特に SReH の感度が高い。SReH と CAPE の両方の閾値を小さくした場合（SReH：200 m²/s²，CAPE の閾値：1550 J/kg）においては，全体的な頻度は高まり，内陸部深くまで頻度が高まっており，閾値を小さくしすぎていることがわかるが，それでも日本海側沿岸・北日本と茨城県以西太平洋側との差異は維持されている。

図 E-4 は寒候期に対する図であるが，今回設定した閾値（SReH の閾値：250 m²/s²，CAPE の閾値：600 J/kg）に対しては，0.025 % 前後より大きな値をとる地域が F3 竜巻の発生箇所を包含している。暖候期ほど閾値に敏感ではないが，暖候期に対する感度分析の傾向が寒候期に対しても見られる。

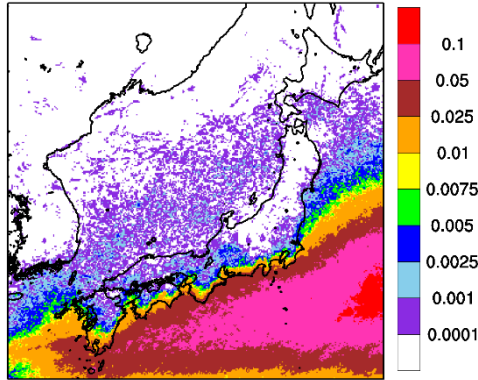
平成 27 年 2 月 3 日の審査会合において用いた閾値は，今回の検討のように感度解析的に閾値を変えて決めたわけではない。あくまで，数は少ないながらも過去の F3 竜巻発生時の環境場を解析し，下限の指数値を決めたが，その結果は F3 竜巻の発生の実態をよく表現できていると考えられる。閾値に幅を持たせた分析結果では，閾値を小さくするほど，小さな竜巻が発生する環境場をカウントするため，超過頻度が大きくなる。暖候期は寒候期に比べて閾値にやや敏感であるが，茨城県以西の太平洋側沿岸域と，日本海側および北日本の沿岸域との差は維持されることを確認できた。これは，EHI を用いる場合でも，CAPE と SReH を用いる場合においても同様である。



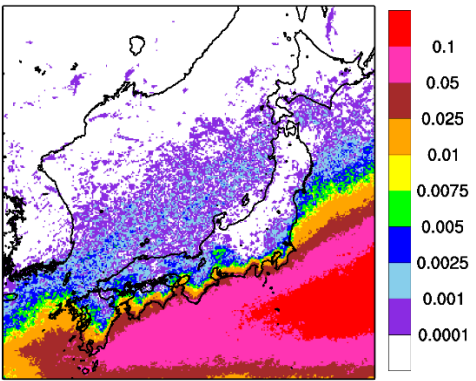
SReH 閾値 : 250 m²/s²
 CAPE 閾値 : 600 J/kg



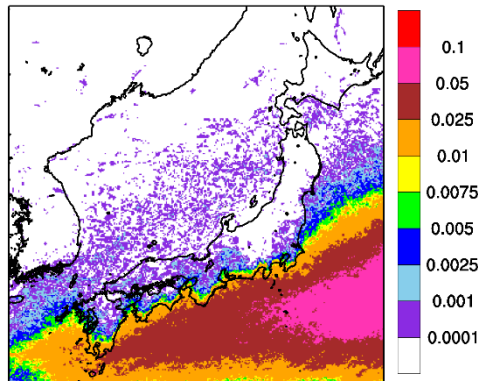
SReH 閾値 : 200 m²/s²
 CAPE 閾値 : 550 J/kg



SReH 閾値 : 300 m²/s²
 CAPE 閾値 : 550 J/kg



SReH 閾値 : 200 m²/s²
 CAPE 閾値 : 650 J/kg



SReH 閾値 : 300 m²/s²
 CAPE 閾値 : 650 J/kg

図 E-4 同時超過頻度分布 (寒候期, 単位は %)

竜巻検討地域において発生した竜巻

竜巻検討地域において1961年から2012年6月に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

	発生日時	発生位置緯度	発生位置経度	Fスケール	現象区別
001	1962年09月28日14時20分	45度13分30秒	141度15分25秒	(F2)	竜巻
002	1965年09月30日02時35分	39度44分33秒	140度4分46秒	F1	竜巻
003	1965年09月30日03時00分	39度19分29秒	140度0分10秒	F0～F1	竜巻またはダウンバースト
004	1968年01月08日09時50分	37度13分48秒	138度19分22秒	F1	竜巻
005	1969年06月22日09時00分	34度37分30秒	131度36分10秒	F1	竜巻
006	1969年11月18日07時08分	38度54分31秒	139度50分7秒	F1	竜巻
007	1971年02月01日00時20分	36度41分10秒	136度40分30秒	F1	竜巻
008	1971年10月17日05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	(F2)	竜巻
009	1971年10月17日05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	F0～F1	竜巻
010	1972年11月21日17時05分	36度53分27秒	137度24分57秒	F1	竜巻
011	1973年05月21日16時30分	36度49分56秒	136度44分45秒	F0～F1	竜巻
012	1973年09月27日23時00分	45度26分20秒	141度2分10秒	F1	竜巻
013	1973年10月22日13時20分	39度41分41秒	140度4分20秒	F1	竜巻
014	1974年08月08日05時05分	40度16分53秒	140度3分24秒	F0～F1	竜巻
015	1974年10月03日19時05分	42度11分20秒	139度31分0秒	(F1～F2)	竜巻
016	1974年10月20日15時00分	41度47分45秒	140度7分47秒	(F1～F2)	竜巻
017	1975年05月31日18時10分	35度25分57秒	132度37分42秒	(F2)	竜巻
018	1975年05月31日18時10分	35度26分6秒	132度37分57秒	F0～F1	竜巻
019	1975年05月31日18時40分	35度25分8秒	132度37分53秒	F0～F1	竜巻
020	1975年09月08日01時30分	42度12分52秒	139度32分58秒	(F1～F2)	竜巻
021	1977年01月13日01時30分	36度34分5秒	136度34分0秒	F0～F1	竜巻
022	1978年08月14日10時40分	45度5分0秒	141度38分0秒	不明	竜巻
023	1979年10月31日13時00分	37度8分21秒	136度41分2秒	F0～F1	竜巻
024	1979年11月02日01時58分	41度30分7秒	140度1分6秒	(F2)	竜巻
025	1984年11月19日22時00分	35度26分4秒	133度19分22秒	F1	竜巻
026	1987年01月11日01時32分	40度2分27秒	139度56分19秒	F0～F1	竜巻
027	1987年01月11日02時00分	40度6分9秒	139度57分57秒	F1	竜巻
028	1989年03月16日19時20分	35度24分0秒	132度40分0秒	(F2)	竜巻
029	1990年04月06日02時55分	37度12分10秒	136度40分56秒	F2	竜巻
030	1991年01月13日14時48分	38度1分25秒	138度12分20秒	不明	竜巻
031	1991年02月15日11時00分	35度33分54秒	135度52分53秒	F1	竜巻
032	1991年09月17日08時50分	42度49分12秒	140度12分50秒	不明	竜巻
033	1991年12月11日20時10分	36度35分59秒	136度38分0秒	F1	竜巻
034	1992年09月13日08時50分	45度26分50秒	141度40分0秒	不明	竜巻
035	1992年09月17日09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	F1	竜巻
036	1992年09月17日09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	不明	竜巻
037	1993年09月26日15時52分	43度57分17秒	141度36分54秒	不明	竜巻
038	1993年10月17日09時30分	36度55分9秒	136度43分51秒	不明	竜巻
039	1993年10月23日17時00分	38度5分30秒	138度12分30秒	不明	竜巻
040	1993年11月24日13時50分	37度13分27秒	138度12分49秒	不明	竜巻
041	1994年03月26日11時40分	38度48分32秒	139度46分19秒	F1	竜巻
042	1994年09月01日16時00分	37度59分6秒	139度2分56秒	不明	竜巻
043	1995年12月01日13時51分	36度26分13秒	136度25分3秒	不明	竜巻
044	1996年09月05日10時20分	39度15分18秒	139度54分1秒	不明	竜巻
045	1996年10月08日23時07分	44度43分7秒	141度48分15秒	F1	竜巻
046	1996年11月30日07時05分	37度23分39秒	138度34分14秒	F1	竜巻
047	1997年01月22日09時20分	37度54分58秒	139度2分0秒	F0	竜巻
048	1998年09月24日15時00分	35度38分26秒	134度55分31秒	不明	竜巻
049	1998年10月31日08時40分	37度19分6秒	136度42分10秒	不明	竜巻
050	1998年11月15日22時30分	38度56分40秒	139度49分22秒	F1	竜巻

051	1999年10月08日09時30分	36度43分56秒	136度40分18秒	不明	竜巻
052	1999年10月29日21時25分	40度13分10秒	140度4分11秒	F0～F1	竜巻
053	1999年11月25日15時40分	40度20分50秒	140度1分37秒	(F1～F2)	竜巻
054	2000年07月25日06時20分	36度8分1秒	136度4分13秒	不明	竜巻
055	2000年07月25日06時30分	36度13分26秒	136度8分2秒	不明	竜巻
056	2001年06月01日13時20分	40度32分7秒	139度56分44秒	F1	竜巻
057	2001年06月19日14時50分	35度37分58秒	136度3分11秒	F1	竜巻
058	2002年09月23日14時30分	36度58分15秒	137度33分15秒	F0～F1	竜巻
059	2002年09月24日13時15分	39度30分6秒	140度4分56秒	F1	竜巻
060	2002年11月04日11時20分	36度21分14秒	136度19分32秒	F0	竜巻
061	2002年11月05日10時30分	35度38分45秒	135度56分16秒	不明	竜巻
062	2003年10月18日16時25分	36度11分51秒	136度7分2秒	不明	竜巻
063	2004年08月15日12時10分	45度27分22秒	141度2分1秒	F0未満	竜巻
064	2005年01月12日07時50分	35度32分0秒	134度3分30秒	不明	竜巻
065	2005年12月05日11時50分	35度23分26秒	132度42分50秒	F1	竜巻またはダウンバースト
066	2005年12月25日19時10分	38度51分16秒	139度47分16秒	F1	竜巻
067	2006年11月09日12時05分	42度3分31秒	139度26分50秒	F1	竜巻
068	2007年08月24日08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
069	2007年08月24日08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
070	2007年10月01日14時25分	43度23分0秒	140度26分30秒	不明	竜巻
071	2007年10月01日14時27分	43度17分8秒	140度20分16秒	不明	竜巻
072	2007年10月01日15時30分	42度26分26秒	139度47分30秒	不明	竜巻
073	2007年10月04日13時36分	44度53分0秒	141度41分0秒	不明	竜巻
074	2007年10月04日16時30分	42度27分15秒	139度50分20秒	不明	竜巻
075	2007年10月11日09時55分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
076	2007年10月11日10時25分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
077	2007年10月16日15時23分	35度36分35秒	133度5分10秒	不明	竜巻
078	2007年11月22日09時00分	36度54分32秒	137度24分56秒	不明	竜巻または漏斗雲
079	2007年12月02日01時30分	38度54分26秒	139度50分18秒	F0	竜巻
080	2008年06月01日12時50分	40度23分20秒	139度58分55秒	不明	竜巻
081	2008年07月30日08時03分	35度34分20秒	134度13分5秒	不明	竜巻
082	2008年07月30日08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻または漏斗雲
083	2008年07月30日08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻または漏斗雲
084	2008年07月30日08時41分	35度33分36秒	134度11分26秒	不明	竜巻または漏斗雲
085	2008年07月30日08時55分	35度34分48秒	134度9分30秒	不明	竜巻
086	2008年07月30日09時01分	35度34分16秒	134度9分26秒	不明	竜巻
087	2008年07月30日09時18分	35度34分6秒	134度8分16秒	不明	竜巻
088	2008年08月14日11時25分	38度55分10秒	139度48分31秒	不明	竜巻
089	2008年08月15日16時20分	35度30分51秒	133度59分38秒	F0以下	竜巻
090	2008年09月14日08時33分	45度28分53秒	141度50分14秒	不明	竜巻
091	2008年09月14日08時47分	45度29分22秒	141度37分30秒	不明	竜巻
092	2008年09月21日11時07分	38度28分16秒	139度28分39秒	不明	竜巻
093	2008年10月01日11時55分	40度1分15秒	139度45分45秒	不明	竜巻
094	2008年10月01日11時55分	40度0分37秒	139度44分9秒	不明	竜巻
095	2008年10月10日09時05分	39度47分5秒	140度0分55秒	不明	竜巻
096	2008年10月10日10時20分	39度44分36秒	140度0分23秒	不明	竜巻
097	2008年10月10日12時07分	39度40分20秒	140度1分7秒	不明	竜巻
098	2008年10月11日00時45分	41度51分7秒	140度7分37秒	F0	竜巻
099	2008年10月15日13時48分	37度51分36秒	138度54分57秒	F0	竜巻
100	2008年10月15日14時47分	38度40分48秒	139度34分48秒	不明	竜巻
101	2008年10月15日16時10分	38度22分2秒	139度26分44秒	不明	竜巻
102	2008年10月26日18時30分	37度56分11秒	139度6分24秒	F0	竜巻
103	2008年10月27日14時55分	36度9分11秒	136度4分16秒	不明	竜巻
104	2008年10月30日12時33分	35度32分51秒	134度12分26秒	不明	竜巻
105	2008年10月30日12時38分	35度35分1秒	134度17分35秒	F0	竜巻
106	2008年10月30日12時50分	35度34分34秒	134度16分10秒	不明	竜巻
107	2008年10月31日07時30分	37度7分33秒	136度42分25秒	不明	竜巻

108	2008年11月02日16時20分	37度44分35秒	138度48分7秒	不明	竜巻
109	2008年11月19日08時36分	36度27分26秒	136度23分41秒	不明	竜巻または漏斗雲
110	2008年11月19日11時45分	37度55分41秒	139度1分4秒	不明	竜巻
111	2008年11月20日08時30分	37度26分19秒	138度34分17秒	不明	竜巻
112	2008年11月20日08時40分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
113	2008年11月20日08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
114	2008年11月20日08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
115	2008年11月20日09時40分	37度27分8秒	138度34分43秒	不明	竜巻
116	2008年11月20日10時00分	36度41分30秒	136度33分4秒	不明	竜巻または漏斗雲
117	2008年11月23日10時20分	36度59分16秒	136度46分25秒	F0~F1	竜巻
118	2009年01月24日11時05分	42度5分27秒	139度23分57秒	不明	竜巻
119	2009年01月24日11時15分	42度0分27秒	139度27分46秒	不明	竜巻
120	2009年02月07日20時15分	39度41分6秒	140度5分11秒	F0	竜巻
121	2009年03月14日17時26分	35度35分53秒	134度13分28秒	不明	竜巻または漏斗雲
122	2009年08月23日18時37分	38度36分36秒	139度34分27秒	不明	竜巻
123	2009年08月23日18時51分	38度37分26秒	139度35分7秒	不明	竜巻
124	2009年09月10日13時30分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
125	2009年09月10日13時35分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
126	2009年09月13日03時40分	38度34分7秒	139度33分9秒	F0	竜巻
127	2009年10月04日12時50分	39度39分55秒	140度4分26秒	不明	竜巻
128	2009年10月27日13時10分	37度2分7秒	137度49分14秒	不明	竜巻
129	2009年10月30日07時26分	40度30分18秒	139度59分57秒	F0	竜巻
130	2009年10月30日09時20分	40度9分56秒	140度0分26秒	F1	竜巻
131	2009年11月03日06時25分	36度52分52秒	137度21分58秒	不明	竜巻または漏斗雲
132	2009年11月03日06時37分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
133	2009年11月03日06時38分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
134	2009年11月03日06時39分	36度53分27秒	137度22分8秒	不明	竜巻
135	2009年11月03日06時43分	36度54分56秒	137度23分51秒	不明	竜巻
136	2009年12月18日02時00分	36度34分20秒	136度33分53秒	F0	竜巻
137	2009年12月18日11時03分	35度34分22秒	134度14分26秒	不明	竜巻または漏斗雲
138	2010年08月25日12時30分	43度57分25秒	141度35分10秒	不明	竜巻
139	2010年08月25日13時05分	43度59分0秒	141度39分15秒	F0未満	竜巻
140	2010年09月07日03時45分	39度46分12秒	140度3分59秒	F0	竜巻
141	2010年09月16日14時30分	35度37分0秒	134度24分5秒	不明	竜巻
142	2010年09月17日10時45分	37度38分56秒	138度44分42秒	不明	竜巻
143	2010年09月17日10時55分	37度38分3秒	138度45分37秒	F0以下	竜巻
144	2010年10月15日04時30分	37度10分5秒	136度40分32秒	F0	竜巻
145	2010年10月15日17時00分	38度3分23秒	139度19分23秒	F0	竜巻
146	2010年10月15日17時05分	38度4分24秒	139度21分9秒	F1	竜巻
147	2010年10月17日12時40分	40度22分52秒	139度59分42秒	F0	竜巻
148	2010年10月17日13時20分	39度51分44秒	140度1分32秒	F0	竜巻
149	2010年10月26日07時00分	43度24分30秒	141度22分0秒	不明	竜巻
150	2010年10月26日07時05分	43度24分30秒	141度19分0秒	不明	竜巻
151	2010年10月26日07時05分	43度8分28秒	140度23分6秒	不明	竜巻
152	2010年10月26日07時10分	43度23分40秒	141度25分50秒	F0未満	竜巻
153	2010年10月26日07時10分	43度24分0秒	141度24分40秒	不明	竜巻
154	2010年10月26日07時38分	43度22分30秒	141度24分15秒	不明	竜巻
155	2010年10月26日08時10分	43度8分38秒	140度23分6秒	不明	竜巻
156	2010年10月26日15時50分	41度51分39秒	140度6分25秒	不明	竜巻
157	2010年11月12日13時15分	40度19分0秒	140度1分47秒	F0	竜巻
158	2010年11月29日09時20分	37度0分3秒	136度46分18秒	F0	竜巻
159	2010年11月29日12時18分	36度15分21秒	136度6分51秒	不明	竜巻または漏斗雲
160	2010年11月29日12時24分	36度15分23秒	136度6分59秒	不明	竜巻
161	2010年11月29日12時25分	36度15分17秒	136度6分37秒	不明	竜巻
162	2010年12月03日15時30分	37度50分58秒	138度55分4秒	F0	竜巻
163	2010年12月03日15時36分	37度52分15秒	138度58分57秒	F0未満	竜巻
164	2010年12月03日15時45分	37度53分11秒	139度2分24秒	F1	竜巻

165	2010年12月09日17時10分	37度12分36秒	138度18分7秒	F0～F1	竜巻
166	2010年12月15日07時56分	36度51分20秒	137度23分5秒	不明	竜巻
167	2010年12月16日08時00分	38度2分43秒	138度37分10秒	不明	竜巻
168	2010年12月17日10時20分	42度52分12秒	140度18分46秒	不明	竜巻
169	2010年12月18日07時18分	35度34分17秒	134度10分6秒	不明	竜巻または漏斗雲
170	2010年12月24日15時57分	35度34分17秒	134度10分4秒	不明	竜巻
171	2010年12月27日01時30分	37度1分3秒	136度44分37秒	F0	竜巻
172	2010年12月29日13時50分	35度46分56秒	135度14分0秒	不明	竜巻
173	2010年12月29日14時00分	35度46分54秒	135度12分6秒	不明	竜巻
174	2011年01月03日14時52分	38度3分48秒	139度16分7秒	不明	竜巻
175	2011年03月09日11時30分	36度13分1秒	136度11分51秒	F0未満	竜巻または漏斗雲
176	2011年03月09日17時25分	35度34分6秒	134度8分57秒	不明	竜巻
177	2011年03月31日09時50分	37度10分31秒	138度13分58秒	F0未満	竜巻または漏斗雲
178	2011年08月13日17時32分	40度29分8秒	139度53分20秒	不明	竜巻
179	2011年08月20日18時30分	43度5分3秒	140度22分46秒	不明	竜巻
180	2011年08月20日18時40分	43度4分56秒	140度23分57秒	不明	竜巻
181	2011年08月20日18時45分	43度4分52秒	140度24分37秒	不明	竜巻
182	2011年08月22日12時05分	45度19分0秒	140度58分47秒	不明	竜巻または漏斗雲
183	2011年09月20日05時50分	45度25分27秒	141度41分35秒	不明	竜巻
184	2011年11月15日16時10分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
185	2011年11月15日16時12分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
186	2011年11月15日16時14分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
187	2011年11月15日16時15分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
188	2011年11月15日16時20分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
189	2011年11月24日12時10分	36度56分25秒	137度23分30秒	不明	竜巻または漏斗雲
190	2011年11月25日06時27分	36度53分45秒	137度23分0秒	不明	竜巻または漏斗雲
191	2011年12月24日12時10分	36度48分30秒	136度42分0秒	不明	竜巻
192	2012年02月01日04時15分	35度21分41秒	132度40分40秒	F0	竜巻

気象庁 「竜巻等の突風データベース」より作成

2.3 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「竜巻影響評価ガイド」という）に基づき、竜巻に遭遇し、かつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法（Wen and Chu 及び Garson et. al）に基づいて竜巻最大風速のハザード曲線を算定し、 V_{B2} を算定した。具体的には、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果（以下、「東京工芸大学委託成果」という）も参考とし以下のとおり算定した。

（1）評価フロー

本評価は、竜巻の発生頻度の分析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率密度分布及び相関係数の算定、ならびにハザード曲線の算出によって構成されている。評価フローを図 1.1 に示す。

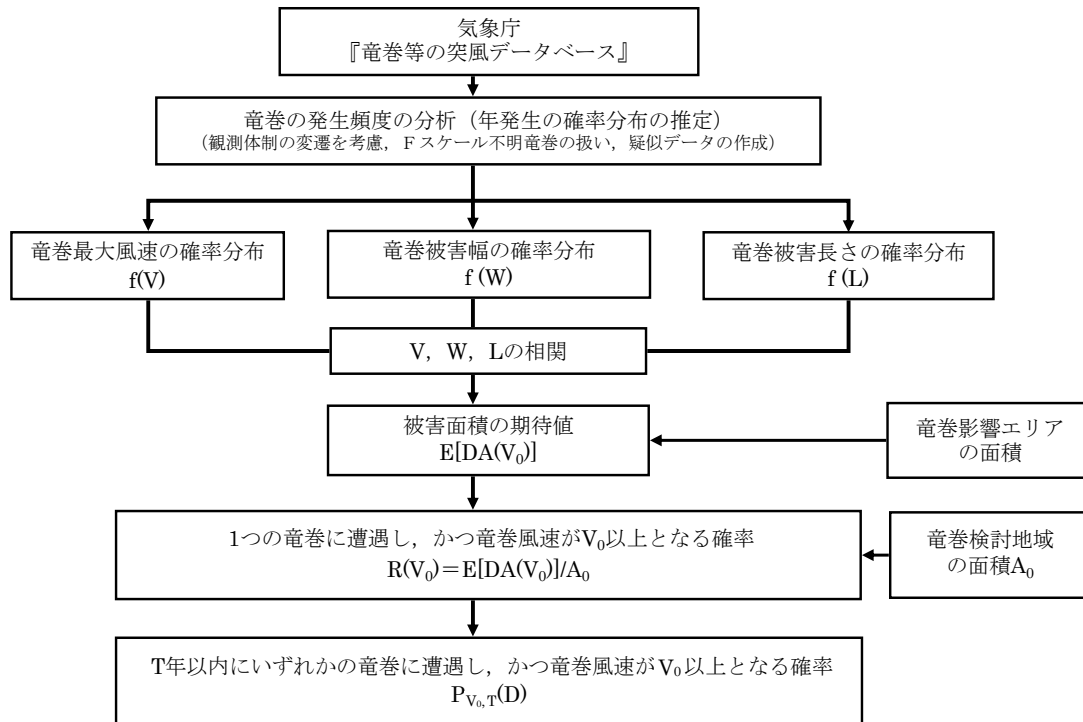


図 1.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

（2）竜巻の発生頻度の分析

①適用データ

気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における 1961 年～2012 年 6 月までの竜巻発生データを用いた。

②竜巻の発生頻度

気象庁「竜巻等の突風データベース」は 1961 年以降のデータ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、年代により観測値の質にばらつきがある。観測体制が強化された2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻の増加が特に顕著である。ただし、これら海上竜巻の多くは、その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮して、解析に用いるデータの観測期間を以下のように設定した。

- ✓観測体制が強化された2007～2012/6（5.5年間）
- ✓観測体制が整備された1991～2012/6（21.5年間）
- ✓観測記録が整備された1961～2012/6（51.5年間）

上記3つの観測期間について、竜巻発生数、年間平均発生数およびその標準偏差をFスケール毎に調査した結果を表2.1に示す。同表の1～3段目までは、1961～、1991～、2007～2012/6の結果をそれぞれ表し、小計はF0からF3竜巻の発生数の合計、総数は不明（陸上・海上）も含めた合計を表す。

1961年以降の51.5年間で、192個の竜巻が観測されているが、このうち5つの竜巻は海側の5km以遠から竜巻検討地域に入ってきた海上竜巻である。陸側5km以遠から当該領域に進入した竜巻は無い。ここでは、ガイド等に基づき、竜巻検討地域に進入あるいは通過した竜巻も発生と見なして解析を行う。

192個の竜巻のうちの約21%（40個）をF1竜巻が占め、不明は半数以上（118個）となっている。不明竜巻の多く（98個）は2007年以降の5.5年間に観測されており、それらの殆ど（91個）が海上竜巻である。F0竜巻についても、その9割以上（24個中22個）が2007年以降の観測である。

一方、F2竜巻については、51.5年間で10個観測されているが、2007年以降の発生例は無く、観測体制の強化に伴う影響をそれほど受けていないことが示唆される。また、F3竜巻の観測例が無いのも、本竜巻検討地域の特徴である。

以上の結果を踏まえ、各観測期間のデータを統合して、擬似的な51.5年間のデータや統計量をFスケール毎に作成した。その基本的な考え方は以下のとおりである。

- i. 被害が小さくて見過ごされやすいF0およびF不明竜巻は、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。
- ii. 被害が比較的軽微なF1竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- iii. 被害が比較的大きく見逃されることが少ないF2,3竜巻については、観測データが整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- iv. 51.5年間の発生数を、i～iiiの観測期間との比率からFスケール毎に推計する。

このようにして得られた結果（以下、疑似データと呼ぶ）を表2.1の4段目に示す。ここでの小計には、陸上での不明竜巻を含めた。その結果、51.5年間に発生し

た竜巻 1187 個のうち、不明も含む陸上竜巻が 333 個、海上竜巻は 853 個と推定された。

竜巻は、被害があって初めてその F スケールが推定されるため、陸上での不明竜巻（上陸竜巻の F 不明を含む）は被害が少ない F0 竜巻に分類するのが合理的である。その一方、海上の F スケール不明の竜巻については、その F スケールを推定することは困難であるが、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上では類似していると考えられる【参考資料 1】。そこで、以下のような仮定の下に、検討地域の竜巻発生数を推計した。

- v. 陸上で発生あるいは上陸した F 不明竜巻は F0 に含める。これにより、全ての陸上竜巻を F0～F3 に分類する。
- vi. 沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、陸上竜巻の発生特性と類似しているとの仮定の下、不明な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する。

このようにして得られた結果を表 2.1 の 5 段目に示す。検討領域における 51.5 年間の竜巻の発生総数は 1187 個、その 8 割以上が F0、1 割強が F1 と推定された。また、F2 竜巻は、実際の観測数は 51.5 年間で 10 個であったが、海上竜巻を考慮したため、疑似データでは 36 個に増加している。

また、図 2.1 に示す日本における竜巻強度分布の変遷より、理想的な竜巻強度分布（縦軸：竜巻の発生率、横軸：風速の二乗）は直線上になる。今回の実施した疑似データ作成方法においても、直線となる期間から F スケール毎の使用データを選定しており、適切な方法と考えられる。

表 2.1 竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値(年)	1.44	0.47	0.78	0.19	-	0.25	2.04	3.73
	標準偏差(年)	2.25	1.75	0.90	0.49	-	0.71	5.92	7.81
	CV(年)	1.56	3.76	1.16	2.52	-	2.83	2.90	2.09
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値(年)	2.14	1.12	0.98	0.05	-	0.56	4.88	7.58
	標準偏差(年)	3.11	2.61	0.91	0.22	-	1.02	8.49	11.07
	CV(年)	1.45	2.34	0.93	4.64	-	1.83	1.74	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値(年)	4.91	4.00	0.91	-	-	1.27	16.55	22.73
	標準偏差(年)	5.55	4.32	1.24	-	-	1.69	11.41	15.10
	CV(年)	1.13	1.08	1.36	-	-	1.33	0.69	0.66
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値(年)	6.44	4.00	0.98	0.19	-	1.27	16.55	22.99
	標準偏差(年)	4.75	4.32	0.91	0.49	-	1.69	11.41	12.36
	CV(年)	0.74	1.08	0.93	2.52	-	1.33	0.69	0.54
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	-	-	-	23.05
	標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	-	-	-	8.97
	CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	-	-	-	0.39

日本における竜巻強度分布の変遷

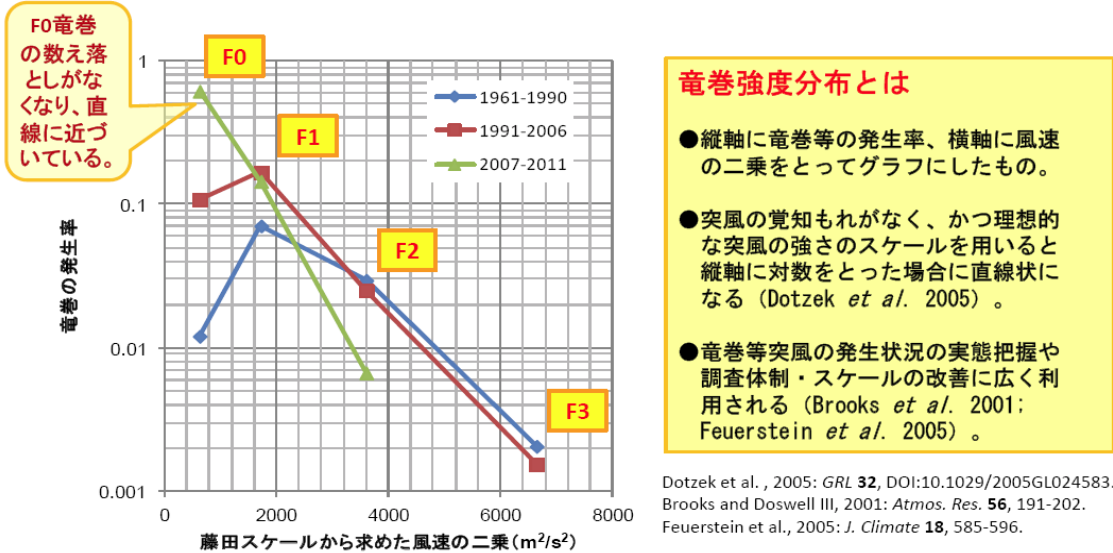


図 2.1 日本における竜巻強度分布の変遷

(出典：気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」第一回資料 3)

③年発生数の確率密度分布の設定

設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから、東京工芸大学委託成果にならってポリヤ分布により設定した。なお、ポリヤ分布は、竜巻影響評価ガイドにおいて推奨されているポアソン分布を一般化したものであり、年発生数の年々変動の実態をポアソン分布よりも適合性が高い形で表現できることを確認している。【参考資料 2】

（3）竜巻の被害幅、被害長さの分析

竜巻発生数と同様にして、3つの観測期間を対象にして、被害幅の観測データを解析した結果を表 3.1 に示す。ここで記載した F 不明とは、被害幅と F スケールの両方もしくは片方が不明であることを表す。また、気象庁のデータベース上で、被害幅が 0m と記録されている竜巻も不明扱いとし、解析対象からは除外した。

本竜巻検討地域では、51.5 年間に 192 個の竜巻が観測されているが、F スケールが分かっているものが 74 個（表 2.1 の 1 段目の小計）、F スケールと幅の両方が分かっているものが 55 個（表 3.1 の 1 段目の小計）である。被害幅の解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べてかなり少ないことが分かる。先に推定した F スケール毎の発生数（表 2.1）との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のようにして 51.5 年間の被害幅の統計量を推定した。

- ① 統計量を確保するために、1961 年以降の観測データを使用し、F スケール別に被害幅データを抽出する。このデータをもとに、F スケール別に被害幅のデータや平均値・標準偏差を求める（表 3.1 の上段）。
- ② 各スケール別の 51.5 年間のデータ数は、①で得られる観測値ではなく、表 2.1 で推定された 51.5 年間の疑似データの発生数とする。
- ③ 具体的には、①で抽出された F スケール別の被害幅データを大きい順に並び替え^{*}、②で設定した 51.5 年間の発生数分だけ繰り返し集積し、51.5 年間の疑似データ（幅のデータ）を作成する。
- ④ 作成された疑似データの平均値や標準偏差を求める。

※：51.5 年間の発生数分だけ繰り返し集積する際に、より大きな被害幅データを集積することで保守的なデータとなるように、大きい順に並べ替えた。

このようにして求めた結果を表 3.1 の最下段に示す。F スケール別の平均値や標準偏差は、繰り返しサンプリングを行っている関係で、最上段の観測値とは若干異なっている（若干大きい）。以上により、F スケール毎の被害幅の発生特性を保持しつつ、発生数との整合性を確保することができる。

被害長さについても、被害幅と同様の解析を行った。結果を表 3.2 に示す。

表 3.1 竜巻の被害幅の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	55	23	26	6	0	32	105	192
	平均値 (m)	124	120	113	190	-			
	標準偏差 (m)	151	125	104	349	-			
	CV	1.22	1.04	0.92	1.84	-			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	42	23	18	1	0	16	105	163
	平均値 (m)	123	120	128	100	-			
	標準偏差 (m)	117	125	116	0	-			
	CV	0.96	1.04	0.91	0.00	-			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	26	21	5	0	0	8	91	125
	平均値 (m)	127	126	132	-	-			
	標準偏差 (m)	116	129	54	-	-			
	CV	0.91	1.03	0.41	-	-			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値 (m)	121	120	113	190	-			
	標準偏差 (m)	131	123	102	323	-			
	CV	1.08	1.02	0.90	1.70	-			

表 3.2 竜巻の被害長さの解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害長さ の統計 (km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	57	23	28	6	0	30	105	192
	平均値 (km)	2.516	1.139	3.550	2.967	-			
	標準偏差 (km)	4.039	1.486	5.243	3.462	-			
	CV	1.61	1.30	1.48	1.17	-			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	41	23	17	1	0	17	105	163
	平均値 (km)	1.502	1.139	2.024	1.000	-			
	標準偏差 (km)	1.943	1.486	2.467	0.000	-			
	CV	1.29	1.30	1.22	0.00	-			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	26	21	5	0	0	8	91	125
	平均値 (km)	1.800	1.219	4.240	-	-			
	標準偏差 (km)	2.300	1.533	3.618	-	-			
	CV	1.28	1.26	0.85	-	-			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値 (km)	1.607	1.149	3.780	2.967	-			
	標準偏差 (km)	2.697	1.466	5.287	3.205	-			
	CV	1.68	1.28	1.40	1.08	-			

(4) 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布，相関係数

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻風速・被害幅・被害長さの確率分布が必要となる。そこで，本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（表 4.1）を用いて各確率密度分布を求める。その際，竜巻影響評価ガイドならびに東京工芸大学委託成果を参照して，確率密度関数が対数正規分布にしたがうものとした。

①竜巻風速の確率密度分布

F スケールの竜巻風速には幅があるため，具体的な風速の設定方法には任意性があり，F スケールの範囲内のある値（中央値等）に設定する方法や F スケールの風速範囲内で一様に分布すると仮定する方法などが考えられる。

図 4.1 に竜巻風速が中央値に集中した場合（黒い実線）及び一様に分布とした場合（赤い実線）について，風速の分布形（超過確率）を推定した結果を示す。●印は，各 F スケール下限値における観測値（疑似 51.5 年間データ）の超過確率を表しており，例えば F1 の下限値（33m/s）以上となる確率は約 0.2 である。また，○印は，F3 が 1 個観測された場合を仮定してプロットをした。

ハザード解析においては，特定の風速以上となる確率が重要であることから，●印で表された観測値ベースの超過確率と適合度が高い分布形が望ましい。図 4.1(a)の○印も含めて評価すると，一様分布の方が中央値の場合よりも適合度が良いと言える。

また，後述のハザード解析において，竜巻風速が中央値に集中した場合及び一様に分布とした場合で計算した結果，図 4.2 の通り風速設定を一様分布とした方が中央値で代表させる場合よりも厳しいハザード曲線となっている。

以上より，ハザードを保守的に評価するとの観点から，風速分布としては一様分布を採用した。風速分布を一様分布とした場合の竜巻風速の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を図 4.3 に示す。

②竜巻の被害幅の確率密度分布

竜巻の被害幅は，竜巻風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。竜巻の被害幅の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を図 4.4 に示す。算定結果は，年超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

③竜巻の被害長さの確率密度分布

竜巻の被害長さは，竜巻風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。竜巻の被害長さの確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を図 4.5 に示す。算定結果は，年超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

ハザード曲線を算定する際、2変量または3変量の確率分布関数を対象とするため、竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数の検討を実施した。相関係数は、1961年以降の観測データで、3変量が同時に観測されているデータを用いるのが理想的であるが、十分なデータ数を確保するため、風速と幅のみが観測されているデータ等、2変量の比較が行える観測データも併せて用いて相関係数を算定した。なお、竜巻風速、被害幅、被害長さの確率密度分布の推定では、発生頻度が重要であるために繰り返しサンプリングを行ったデータを用いたが、以下の理由により、相関係数の推定ではそのような措置を行わず、観測の元データをもとに推定した。

Fスケール不明やF0竜巻では、被害規模が小さいために被害幅や被害長さの観測データがF2竜巻に比べて得られる機会が少なく、ばらつきも大きいものと考えられる。そのようなデータをサンプリングにより増やすと、F2竜巻で見られる相関の高さが反映されない算定結果になることが懸念される。

表4.2に示す算定結果によれば、本竜巻検討地域では、竜巻風速と被害長さには相関係数0.31程度、被害幅と被害長さには、0.46程度の相関が認められた。相関を求めた際のデータ数、平均値、標準偏差余及び相関係数を表4.2に示す。

表 4.1 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の推定結果)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値(年)	23.05	18.82	3.53	0.70	-
		標準偏差(年)	8.97	8.76	1.72	0.92	-
		CV(年)	0.39	0.47	0.49	1.32	-
	被害幅	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値(m)	121	120	113	190	-
		標準偏差(m)	131	123	102	323	-
		CV	1.08	1.02	0.90	1.70	-
	被害長さ	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値(km)	1.607	1.149	3.780	2.967	-
		標準偏差(km)	2.697	1.466	5.287	3.205	-
		CV	1.68	1.28	1.40	1.08	-

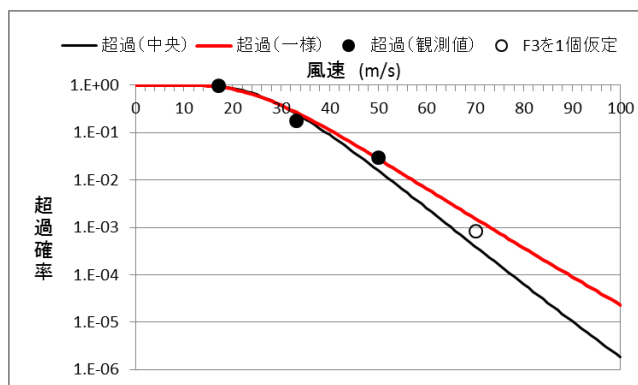
表 4.2(1) 相関係数算定に用いた竜巻風速, 被害幅, 被害長さのデータ数 (単位: 個)

データ数	風速	被害幅	被害長さ
風速	74	55	57
被害幅	55	59	54
被害長さ	57	54	59

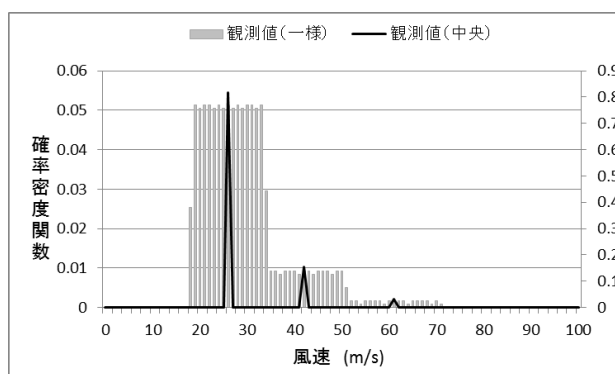
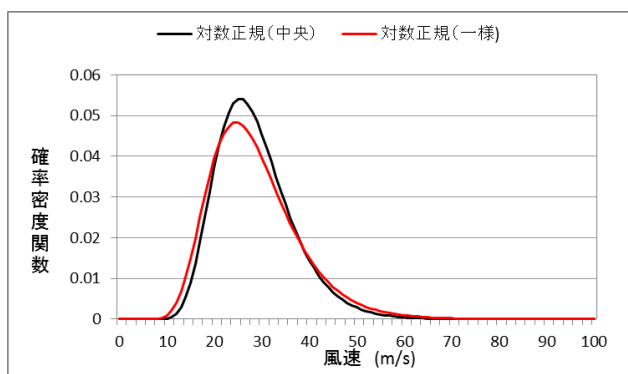
表 4.2(2) 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050*	0.312
被害幅	-0.050*	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

*風速と被害幅は無相関との知見が得られたため, ハザード算定の際には, 相関係数 0 として計算



(a) 超過確率



(b) 確率密度関数 (左：推定値, 右：観測値)

図 4.1 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値の比較

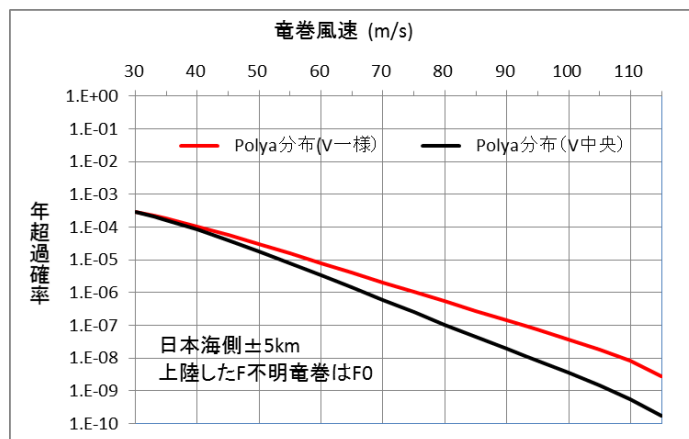


図 4.2 風速設定の違いによる竜巻最大風速のハザード曲線の比較 (海側, 陸側 5km 範囲)

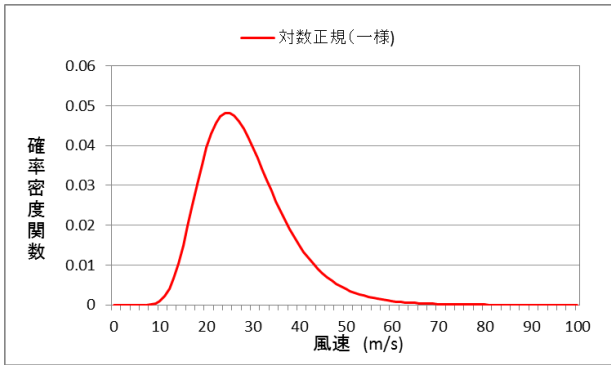


図 4.3(1) 竜巻風速の確率密度分布

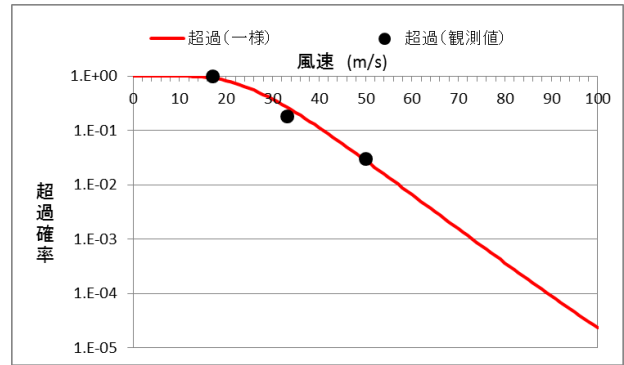


図 4.3(2) 竜巻風速の年超過確率分布

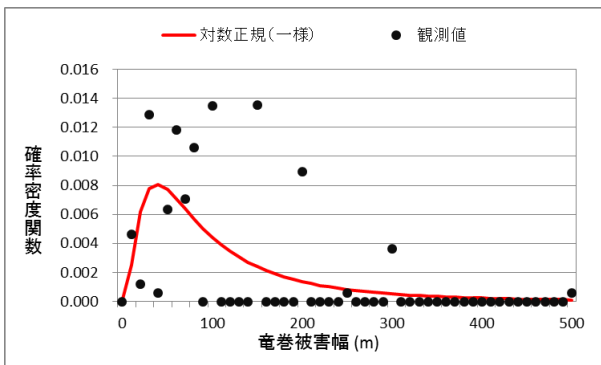


図 4.4(1) 被害幅の確率密度分布

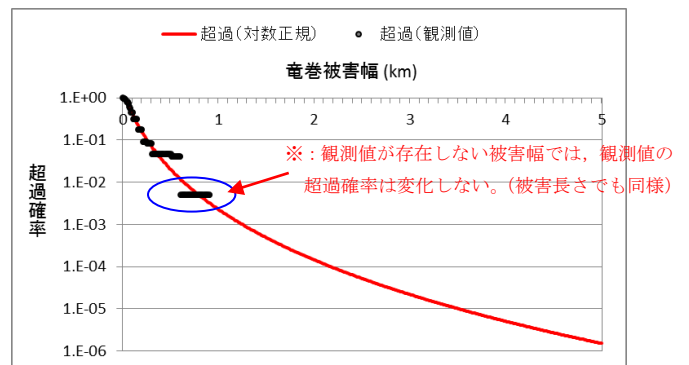


図 4.4(2) 被害幅の年超過確率分布

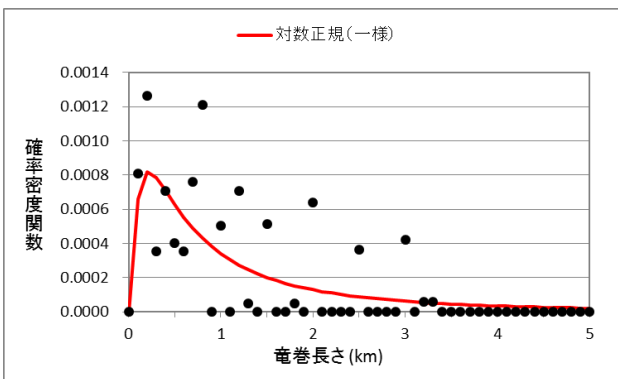


図 4.5(1) 被害長さの確率密度分布

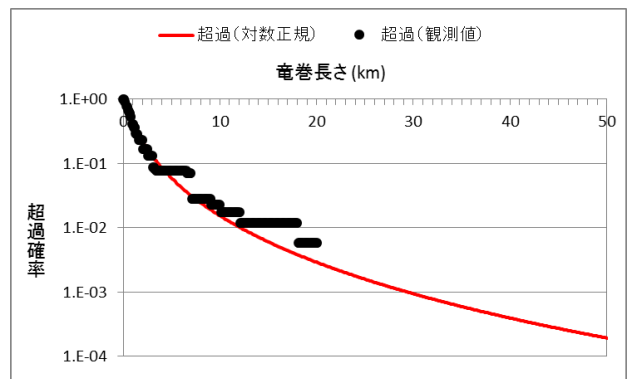


図 4.5(2) 被害長さの年超過確率分布

(5) 竜巻影響エリア

竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所の号炉ごとに設定する。号炉ごとのすべての評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅、被害長さから設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。

図 5.1 に柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉の竜巻影響エリア，図 5.2 に 7 号炉の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉または 7 号炉の評価対象施設を含む長方形エリアの対角線長さが約 260m であることを考慮して、各号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径 300m，面積約 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$ ）として設定する。なお，竜巻影響エリアを円形とするため，竜巻の移動方向には依存性は生じない。

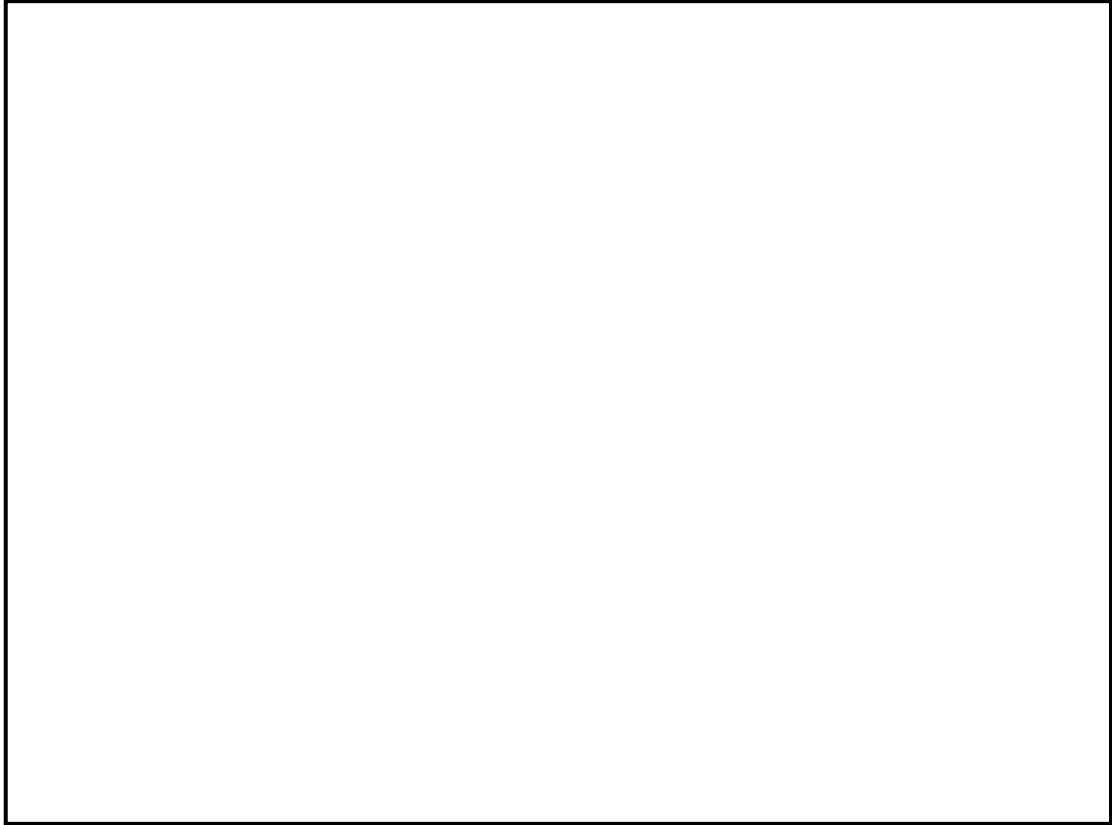


図5.1 6号炉 竜巻影響エリア

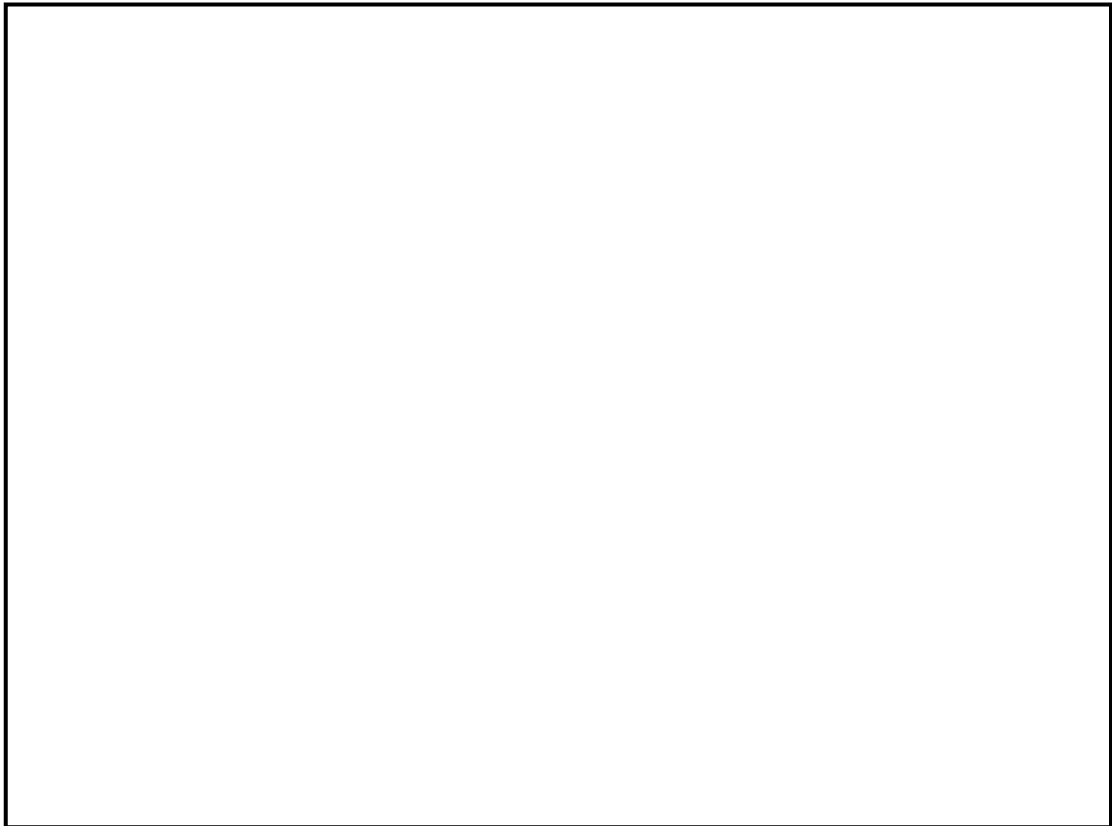


図5.2 7号炉 竜巻影響エリア

(6) ハザード曲線の算定

東京工芸大学委託成果によれば、Wen and Chu が竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上になる確率モデルの推定法を提案している。竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率分布は、(6.1)式に示すポリヤ分布の適合性が良いとされている。本ハザード曲線の算定においても、東京工芸大学委託成果にならって適合性の良いポリヤ分布により設定した。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1} \beta \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (6.1)$$

ここで、

- N : 竜巻の年発生数
- v : 竜巻の年平均発生数
- T : 年数
- σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (6.2)$$

対象とする構造物が、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率は式(6.1)から導出され以下の式(6.3)となる。

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

- D : 対象とする構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象
- $R(V_0)$: リスク評価対象構造物が 1 つの竜巻に増遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (6.3)$$

- $DA(V_0)$: 竜巻による構造物の被害面積
- $E[DA(V_0)]$: $DA(V_0)$ の期待値
- A_0 : リスクの評価対象とする地域の面積

次に、 $E[DA(V_0)]$ の求め方を説明する。

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

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB & ; V_i \geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 & ; V_i < V_0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

ここで、 W は竜巻の被害幅、 L は被害長さ、 A, B は構造物の寸法、 H と G は竜巻の被害幅や被害長さ方向への構造物の投影長さである。

上記の関係を、竜巻風速・被害幅・被害長さ・竜巻移動方向の確率分布を用いると、式(6.5)のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{6.5}$$

ここで、

V : 竜巻最大風速

w : 竜巻の被害幅

l : 竜巻の被害長さ

α : 竜巻の移動方向

$f(\cdot)$: 確率密度分布

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

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

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{6.6}$$

式(6.5)の右辺第1項は、被害幅と被害長さの積、即ち被害面積を表しており、いわゆる点構造物に対する被害、第2項と第3項は、被害幅・被害長さとの積、即ち面構造物あるいは線状構造物の被害面積を表す。竜巻の幅は長さに対して短いため、第3項の寄与は第2項に比べて1オーダー小さい。第4項は建物面積 AB に依存する項である。

$W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 以上となる部分の幅であり、式(6.6)により算出される。この式により、被害幅内の風速分布に応じて被害様相に分布があることが考慮されている。 V_{\min} は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garson は gale intensity velocity と呼んでいる (Gale とは非常に強い風の意)。米国の気象局 (National Weather Service) では、34～47 ノット (17.5～24.2m/s) とされている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力8が疾強風 (gale, 17.2～20.7m/s)、風力9は大強風 (strong gale, 20.8～24.4m/s) と分類されており、風力9では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。以上を参考にして、 $V_{\min}=25\text{m/s}$ とした。この値は、F0 (17～32m/s) のほぼ中央値に相当する。なお、この値よりも小さな V_{\min} (例えば、F0の最小風速 17m/s) を用いると、風速 V_0 以上となる被害面積は小さくなる。

また、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。5節にて竜巻影響エリアを円形(直

径 D_0) で設定しているため、竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \quad (6.7)$$

従って、式(6.5)は式(6.5')と表すことができる。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\ &+ D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\ &+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \end{aligned} \quad (6.5')$$

2変量, 3変量の対数正規分布は、以下の式(6.8)または式(6.9)のように表される。

μ , σ , ρ は, $\ln(x)$, $\ln(y)$, $\ln(z)$ の平均値, 標準偏差及び相関係数であり, 本評価では4節にて求めた竜巻風速, 被害幅, 被害長さの確率密度分布の平均値, 標準偏差及び相関係数を μ , σ ならびに ρ に適用して, 同時確率密度関数 f を定めた。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x) - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\ln(x) - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{\ln(y) - \mu_y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{\ln(y) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{vmatrix}^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x & \ln(y) - \mu_y & \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x \\ \ln(y) - \mu_y \\ \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \right] \end{aligned} \quad (6.9)$$

(7) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})

以上より、ハザード曲線の算定結果を図 7.1 に示す。竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は、竜巻影響評価ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速 V_{B2} は、 58.3m/s とする。なお、竜巻影響評価ガイドで要求されている、 1km 毎の短冊領域でのハザード曲線による最大風速 V_{B2} 算定については、評価を実施したものの、その技術的説明性が乏しいと考え、 V_B の設定には使用しないものとした。【参考資料 3】

また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した。【参考資料 5】

図 7.2(a)に示した、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが十分小さいことを確認した。更に、疑似データに F3 竜巻を 4 個追加した感度解析結果を図 7.2(b)に示す。この場合の年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速は 62.2m/s となり、かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから、データの高い安定性を確認した。

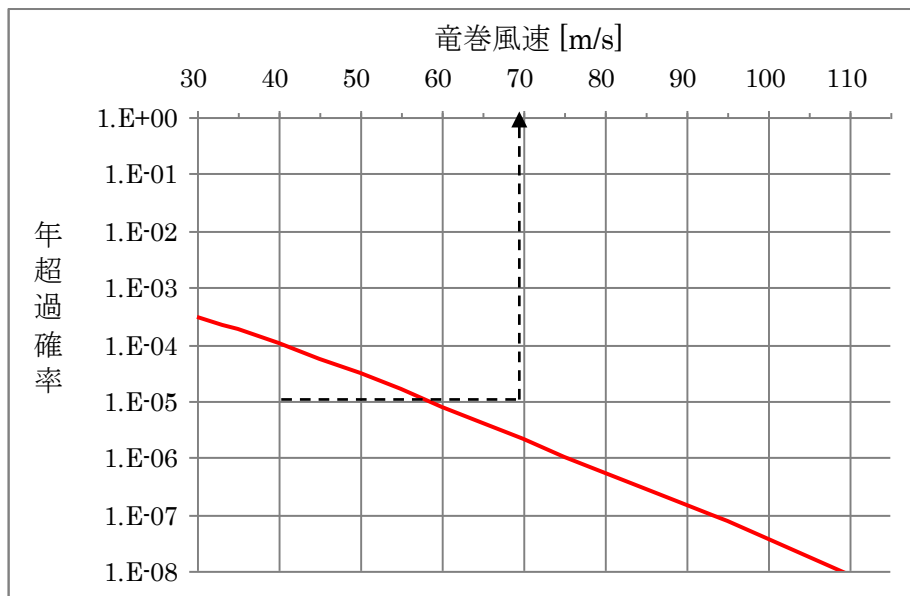
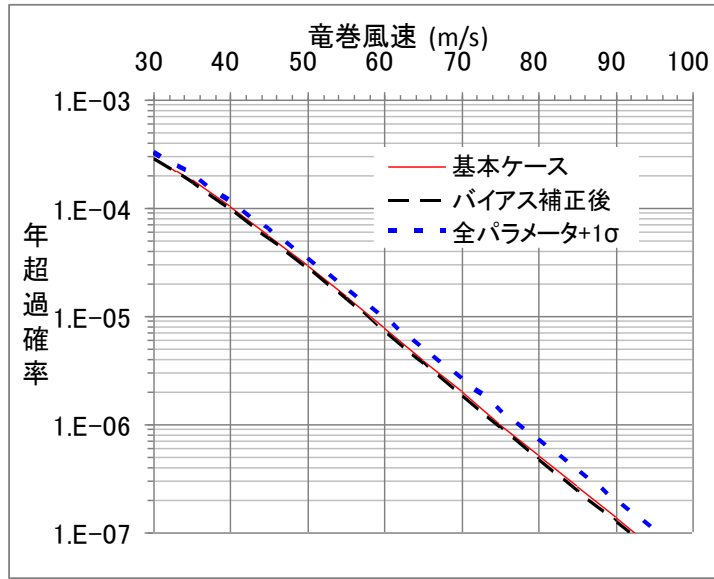
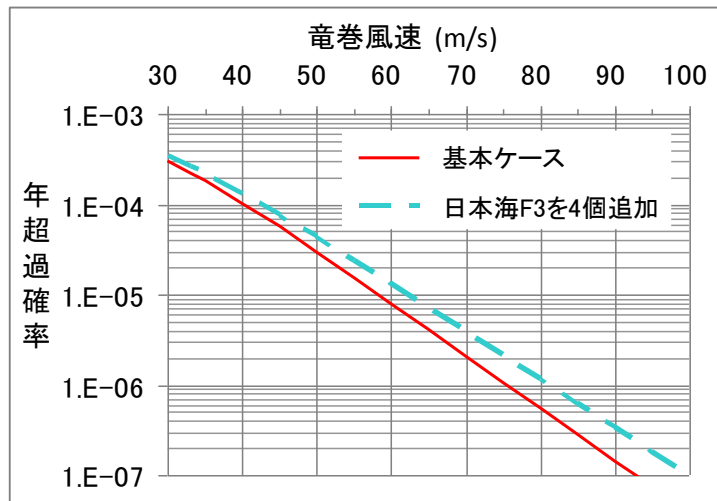


図7.1 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）



(a) バイアス補正後及び全パラメータ+1 σ のハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図7.2 ハザード不確実さ検討結果

【参考資料1】

海上の F スケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51.5年間の疑似データを推定する際に、海上で発生した F スケール不明竜巻（非上陸竜巻）を、F スケールが判明している陸上竜巻（含む上陸竜巻）の F スケール毎の発生比率で按分している。そこでは、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とは類似している、と仮定している。他の合理的な按分方法も無いのが実情ではあるが、観測結果を基に、この仮定の妥当性について考察する。

ここでは、陸上で発生した竜巻（以後、陸上竜巻と呼ぶ）と、水上で発生しその後上陸した竜巻（以後、上陸竜巻と呼ぶ）を区別して考える。

表1および図1は、陸上竜巻、上陸竜巻および（陸上+上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して、F0, F1, F2以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合、F スケール毎の割合はそれぞれ30, 45, 24%となっており、陸上竜巻との間に大きな差は無い（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから、海上での F スケール不明竜巻の F スケール毎の発生割合は、上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないことは、海側と陸側の F スケール毎の発生割合が類似していることを示唆している。従って、海上での F 不明竜巻を、陸上竜巻（あるいは（陸上+上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方、日本海側の上陸竜巻の場合、F スケール毎の割合はそれぞれ50, 34, 16%であり、陸上竜巻の値と10~20%程度異なる。日本海側の場合、F0の割合が全国の値に比べて大きく、逆に F スケールの大きな竜巻の割合が同程度少なくなっており、地域的な特性が見られる。上陸竜巻と陸上竜巻の割合の差が、地域特性によるものかデータ数が少ない事によるものか判断できないが、（陸上+上陸）竜巻の割合は、全国の値に比較的近くなる（F0の数が多いという地域特性は残る）。従って、（陸上+上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、データ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

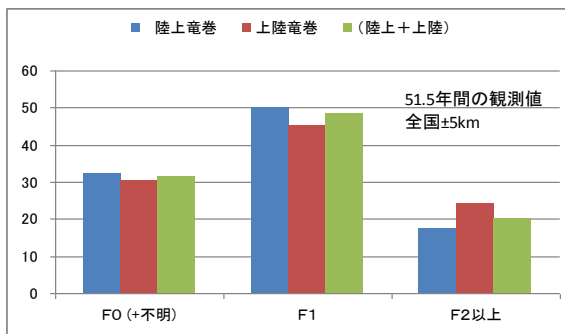
表1 Fスケール毎の竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

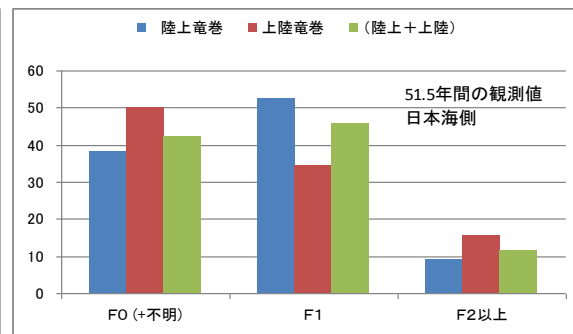
発生数の割合 (%)	FO (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	30	45	24
(陸上+上陸)	32	48	20

(b) 日本海側

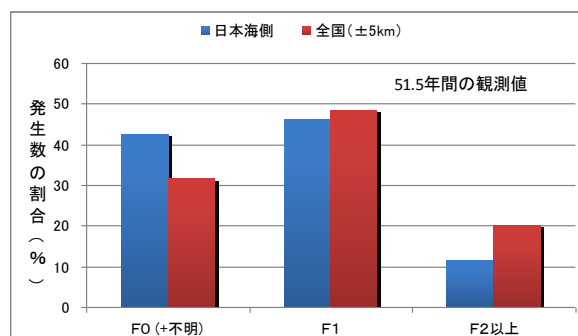
発生数の割合 (%)	FO (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	38	53	9
上陸竜巻	50	34	16
(陸上+上陸)	43	46	11



(a) 全国±5km



(b) 日本海側



(c) (陸上+上陸) 竜巻

図1 Fスケール毎の発生数の割合

【参考資料 2】

竜巻発生数の確率分布（ポアソン、ポリヤ分布）がハザード結果に及ぼす影響

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

Wen and Chu は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となる確率の推定法を提案している。それによれば、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率分布はポアソン分布もしくはポリヤ分布に適合する。

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

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

ここで、 N は竜巻の年発生数、 v は竜巻の年平均発生数、 T は年数である。

また、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 V_0 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{v_0,T}(D)$ は次式で表される。

$$\text{ポアソン分布： } P_{v_0,T}(D) = 1 - \exp[-vR(V_0)T] \quad (3)$$

$$\text{ポリヤ分布： } P_{v_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (4)$$

ここで、 $R(V_0)$ は、検討対象とする構造物が、ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率である。

2. ポアソン分布とポリヤ分布

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

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

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

ポリヤ分布は、分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く、 β が大きい場合は分散の大きな分布形を表し、 $\beta \rightarrow 0$ の時にはポアソン分布に近づく。Thom (1963) は、米国中部を対象とした竜巻発生数の分析を行い、ポアソン過程が実態と乖離する

場合があることを指摘するとともに、ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。また、東京工芸大学委託成果では、陸上竜巻（含む上陸竜巻）および水上竜巻のいずれに対しても、ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

ポリヤ分布は、疫病の流行、ある単語を含む文書数を数える文書頻度などの言語処理などに活用されており、ある事象が起こった場合に、それによって周囲にも現象が起こりやすくなる現象（弱い伝播性）が考慮されている。竜巻の場合では、前線や台風により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する（tornado outbreak と呼ばれる）状況が考えられる（Wen and Chu, 1973）。

3. 確率論から見た近似式

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

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

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

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

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

逆に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれかの竜巻により被害（最低 1 回，最大 N 回）を受ける確率は次式となる。

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

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

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

となる。 $R(V_0)$ が十分小さければ、上式は次のように近似できる。

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

ここで、次の近似を用いている。

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

竜巻被害の場合、 $R(V_0)$ は通常 10^{-3} 以下であるから、式(10)の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから、式(9)より、1 年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

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

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

4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

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

式(8)の $P(N)$ としてポアソン分布を仮定し、

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

となることを考慮すると、式(11)の厳密な式は以下の通りである。

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

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

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

従って、式(3) (あるいは式(13)) は、式(14)を用いると、

$$P_{V_0}(D) = 1 - \exp(-\nu R(V_0)) = 1 - \left(1 + \frac{(-\nu R(V_0))}{1!} + \frac{(-\nu R(V_0))^2}{2!} + \dots \right) \quad (15)$$

と表され、 $R(V_0)$ が小さい場合は、次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) \quad (16)$$

ポリヤ分布の場合も同様に、一般の 2 項定理を用いると、次式で近似できる。

$$\begin{aligned} P_{V_0}(D) &= 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta} \right) \beta \nu R(V_0) + \dots \right) \\ &\approx \nu R(V_0) \end{aligned} \quad (17)$$

以上のことから、竜巻のように一つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては、年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し、発生数の確率分布形状にはほとんど無関係であることが分かる。

【参考資料 3】

1km 毎の領域での竜巻ハザード曲線について

1. 保守性を考慮したハザード曲線の算定

竜巻発生確認数のばらつきや F スケールの偏りがあることから、ハザード曲線に保守性を持たせるために、以下のような条件で算定を行った。計算に使用するパラメータは表 1.1 に示す。

- ・ 竜巻発生数は、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である通過竜巻もカウント
- ・ 被害幅及び被害長さは、それぞれ1km範囲内の被害幅及び被害長さを用いる
- ・ 海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く、竜巻移動経路が短冊を横切る長さを精度良く求められないため、海側0-1kmのセグメント長さの評価に陸側0-1km短冊の値を代用する方法を用いる

表 1.1 保守的なハザード曲線算定に用いるパラメータ

竜巻検討地域 (1km毎エリア)	統計量	発生数	風速	幅	長さ	相関係数		
		(個)	(m/s)	(m)	(m)	U ~ W	U ~ L	W ~ L
陸 0-1km	平均値	4.41	28.5	128	632	(検討地域±5kmの値を代用)		
	標準偏差	3.40	9.7	154	448			
陸 1-2km	平均値	1.90	29.4	197	766			
	標準偏差	2.17	8.6	173	434			
陸 2-3km	平均値	1.98	28.1	174	684			
	標準偏差	1.58	8.8	180	366			
陸 3-4km	平均値	1.09	30.6	213	861			
	標準偏差	0.79	8.6	216	310			
陸 4-5km	平均値	0.87	31.3	299	1029			
	標準偏差	0.99	9.0	247	132			
海 0-1km	平均値	8.99	28.0	100	632			
	標準偏差	4.93	9.3	120	448			

以上の条件で算定したハザード曲線を海側，陸側 5km 範囲内でのハザード曲線と併せて図 1.1 に示す。

図 1.1 より，年超過確率 10^{-5} に相当する風速が最も大きく評価されたのは，海側 0 ~ 1km 範囲での 58.4m/s であった。

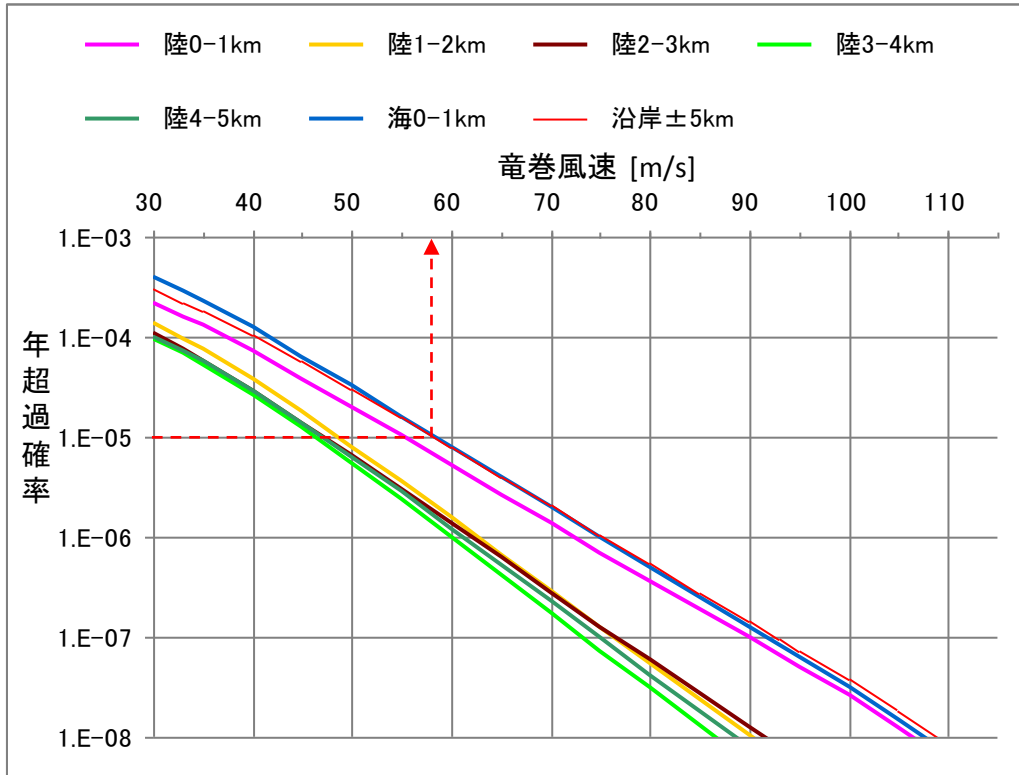


図 1.1 1km 範囲毎のハザード曲線と±5km 範囲のハザード曲線

表1.2 年超過確率 10^{-5} に対応した竜巻風速

短冊ケース	竜巻風速[m/s]
陸0-1km	55.2
陸1-2km	48.7
陸2-3km	47.2
陸3-4km	46.4
陸4-5km	47.1
海0-1km	58.4
(参考) 海側及び陸側各±5km	58.3

参考に陸側0～1km, 1～2km, 2～3km, 3～4km, 4～5km, 海側0～1kmの竜巻発生・通過数を表1.3～1.8に示す。

表 1.3 陸側0-1km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸0-1km)	発生数・通過数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	47	15	23	9	0	12	0	59
	平均値(年)	0.91	0.29	0.45	0.17	-	0.23	-	1.15
	標準偏差(年)	1.51	1.13	0.61	0.43	-	0.71	-	1.90
	CV(年)	1.65	3.89	1.37	2.47	-	3.03	-	1.66
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	28	15	12	1	0	11	0	39
	平均値(年)	1.30	0.70	0.56	0.05	-	0.51	-	1.81
	標準偏差(年)	2.03	1.69	0.60	0.22	-	1.02	-	2.63
	CV(年)	1.56	2.43	1.08	4.64	-	2.00	-	1.45
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	17	14	3	0	0	6	0	23
	平均値(年)	3.09	2.55	0.55	-	-	1.09	-	4.18
	標準偏差(年)	3.63	2.81	0.88	-	-	1.77	-	4.70
	CV(年)	1.17	1.11	1.62	-	-	1.62	-	1.12
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	227	132	29	9	0	57	0	227
	平均値(年)	4.37	2.55	0.56	0.17	-	1.09	-	4.37
	標準偏差(年)	3.40	2.81	0.60	0.43	-	1.77	-	3.40
	CV(年)	0.78	1.11	1.08	2.47	-	1.62	-	0.78
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	227	189	29	9	0	0	0	227
	平均値(年)	4.41	3.67	0.56	0.17	-	-	-	4.41
	標準偏差(年)	3.40	3.32	0.60	0.43	-	-	-	3.40
	CV(年)	0.77	0.91	1.07	2.47	-	-	-	0.77

表 1.4 陸側1-2km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸1-2km)	発生数・通過数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	29	9	17	3	0	1	0	30
	平均値(年)	0.56	0.17	0.33	0.06	-	0.02	-	0.58
	標準偏差(年)	1.13	0.76	0.59	0.24	-	0.14	-	1.13
	CV(年)	2.01	4.37	1.78	4.06	-	7.18	-	1.94
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	18	9	8	1	0	0	0	18
	平均値(年)	0.84	0.42	0.37	0.05	-	-	-	0.84
	標準偏差(年)	1.58	1.15	0.59	0.22	-	-	-	1.58
	CV(年)	1.89	2.76	1.58	4.64	-	-	-	1.89
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	8	4	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.45	0.73	-	-	-	-	2.18
	標準偏差(年)	2.84	2.08	0.86	-	-	-	-	2.84
	CV(年)	1.30	1.43	1.19	-	-	-	-	1.30
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	98	75	20	3	0	0	0	98
	平均値(年)	1.88	1.45	0.37	0.06	-	-	-	1.88
	標準偏差(年)	2.17	2.08	0.59	0.24	-	-	-	2.17
	CV(年)	1.15	1.43	1.58	4.06	-	-	-	1.15
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	98	75	20	3	0	0	0	98
	平均値(年)	1.90	1.46	0.39	0.06	-	-	-	1.90
	標準偏差(年)	2.17	2.08	0.59	0.24	-	-	-	2.17
	CV(年)	1.15	1.43	1.58	4.06	-	-	-	1.15

表 1.5 陸側 2-3km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 2-3 km)	発生数・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	25	10	13	2	0	0	0	25
	平均値(年)	0.49	0.19	0.25	0.04	-	-	-	0.49
	標準偏差(年)	1.00	0.66	0.56	0.20	-	-	-	1.00
	CV(年)	2.07	3.41	2.21	5.02	-	-	-	2.07
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	16	10	6	0	0	0	0	16
	平均値(年)	0.74	0.47	0.28	-	-	-	-	0.74
	標準偏差(年)	1.37	0.97	0.56	-	-	-	-	1.37
	CV(年)	1.84	2.09	2.00	-	-	-	-	1.84
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	9	3	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.64	0.55	-	-	-	-	2.18
	標準偏差(年)	2.22	1.46	0.88	-	-	-	-	2.22
	CV(年)	1.02	0.89	1.62	-	-	-	-	1.02
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	102	85	15	2	0	0	0	102
	平均値(年)	1.95	1.64	0.28	0.04	-	-	-	1.95
	標準偏差(年)	1.58	1.46	0.56	0.20	-	-	-	1.58
	CV(年)	0.81	0.89	2.00	5.02	-	-	-	0.81
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	102	85	15	2	0	0	0	102
	平均値(年)	1.98	1.65	0.29	0.04	-	-	-	1.98
	標準偏差(年)	1.58	1.46	0.56	0.20	-	-	-	1.58
	CV(年)	0.81	0.89	2.00	5.02	-	-	-	0.81

表 1.6 陸側 3-4km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 3-4 km)	発生数・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	20	4	15	1	0	0	0	20
	平均値(年)	0.39	0.08	0.29	0.02	-	-	-	0.39
	標準偏差(年)	0.66	0.27	0.57	0.14	-	-	-	0.66
	CV(年)	1.71	3.48	1.97	7.18	-	-	-	1.71
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	4	7	0	0	0	0	11
	平均値(年)	0.51	0.19	0.33	-	-	-	-	0.51
	標準偏差(年)	0.75	0.40	0.57	-	-	-	-	0.75
	CV(年)	1.46	2.15	1.77	-	-	-	-	1.46
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	7	4	3	0	0	0	0	7
	平均値(年)	1.27	0.73	0.55	-	-	-	-	1.27
	標準偏差(年)	1.04	0.55	0.88	-	-	-	-	1.04
	CV(年)	0.82	0.75	1.62	-	-	-	-	0.82
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	56	38	17	1	0	0	0	56
	平均値(年)	1.07	0.73	0.33	0.02	-	-	-	1.07
	標準偏差(年)	0.79	0.55	0.57	0.14	-	-	-	0.79
	CV(年)	0.74	0.75	1.77	7.18	-	-	-	0.74
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	56	38	17	1	0	0	0	56
	平均値(年)	1.09	0.74	0.33	0.02	-	-	-	1.09
	標準偏差(年)	0.79	0.55	0.57	0.14	-	-	-	0.79
	CV(年)	0.74	0.75	1.77	7.18	-	-	-	0.74

表 1.7 陸側 4-5km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸 4-5 km)	発生数・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	15	2	12	1	0	1	0	16
	平均値(年)	0.29	0.04	0.23	0.02	-	0.02	-	0.31
	標準偏差(年)	0.64	0.20	0.62	0.14	-	0.14	-	0.65
	CV(年)	2.20	5.02	2.65	7.18	-	7.18	-	2.08
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	8	2	6	0	0	1	0	9
	平均値(年)	0.37	0.09	0.28	-	-	0.05	-	0.42
	標準偏差(年)	0.74	0.30	0.71	-	-	0.22	-	0.74
	CV(年)	1.98	3.20	2.55	-	-	4.64	-	1.78
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	6	2	4	0	0	1	0	7
	平均値(年)	1.09	0.36	0.73	-	-	0.18	-	1.27
	標準偏差(年)	1.16	0.55	1.28	-	-	0.43	-	1.04
	CV(年)	1.06	1.50	1.76	-	-	2.37	-	0.82
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	45	19	15	1	0	10	0	45
	平均値(年)	0.84	0.36	0.28	0.02	-	0.18	-	0.84
	標準偏差(年)	0.99	0.55	0.71	0.14	-	0.43	-	0.99
	CV(年)	1.18	1.50	2.55	7.18	-	2.37	-	1.18
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	45	29	15	1	0	0	0	45
	平均値(年)	0.87	0.56	0.29	0.02	-	-	-	0.87
	標準偏差(年)	0.99	0.69	0.71	0.14	-	-	-	0.99
	CV(年)	1.18	1.27	2.55	7.18	-	-	-	1.18

表 1.8 海側 0-1km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (海 0-1 km)	発生数・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	25	8	12	5	0	9	38	72
	平均値(年)	0.49	0.16	0.23	0.10	-	0.17	0.74	1.40
	標準偏差(年)	0.90	0.75	0.43	0.30	-	0.62	2.52	3.35
	CV(年)	1.86	4.86	1.83	3.08	-	3.55	3.41	2.40
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	15	8	6	1	0	8	38	61
	平均値(年)	0.70	0.37	0.28	0.05	-	0.37	1.77	2.84
	標準偏差(年)	1.23	1.15	0.46	0.22	-	0.91	3.71	4.86
	CV(年)	1.76	3.09	1.65	4.64	-	2.45	2.10	1.71
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	9	8	1	0	0	5	34	48
	平均値(年)	1.64	1.45	0.18	-	-	0.91	6.18	8.73
	標準偏差(年)	2.19	2.08	0.43	-	-	1.69	5.79	7.50
	CV(年)	1.34	1.43	2.37	-	-	1.86	0.94	0.86
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	142	75	15	5	0	47	319	461
	平均値(年)	2.74	1.45	0.28	0.10	-	0.91	6.18	8.92
	標準偏差(年)	2.73	2.08	0.46	0.30	-	1.69	5.79	6.40
	CV(年)	1.00	1.43	1.65	3.08	-	1.86	0.94	0.72
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	463	397	49	17	0	0	0	463
	平均値(年)	8.99	7.71	0.95	0.33	-	-	-	8.99
	標準偏差(年)	4.93	4.83	0.83	0.54	-	-	-	4.93
	CV(年)	0.55	0.63	0.92	1.71	-	-	-	0.55

2. 1km 毎の領域で竜巻ハザードを求める際の問題点

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下、ガイド）では、以下のように述べられている。

- ✓ 海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を目安に竜巻検討地域を設定する
- ✓ 上記の場合、少なくとも1km範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定し、そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設計で用いること
- ✓ 竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたっては、竜巻検討地域を1km範囲ごとに区切ってそれぞれの範囲の確率分布を算定し、そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設定する等、配慮すること

また、2013年10月出された JNES の『原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説』には、以下のような記述がある。

- ✓ 【発生数】データ数確保の観点から、それぞれの竜巻の発生地点と消滅地点の2点を直線で結び、直線が複数の細分化した地域に跨る場合は全ての細分化地域で竜巻が発生したとする。
- ✓ 【竜巻風速・幅・長さ・移動方向】確率分布は、データ数確保の観点から、竜巻検討地域全体で評価する。竜巻の発生地点と消滅地点が竜巻検討地域外であっても、その2点を結ぶ直線が竜巻検討地域を通過するあるいは接する場合は、竜巻検討地域に属するものとする。

このようなガイドや解説の考え方にに基づき、竜巻検討地域（±5km 範囲）を通過する竜巻も発生数にカウントするだけではなく、1.では1km 毎の短冊領域についても通過数を発生数にカウントして評価を行っている。

通過数を発生数と見なす方法や、1km 毎の短冊領域でハザードを求める考え方には問題点が多い。ここでは、以下の3つの視点からその問題点を考察する。

1. Wen and Chu モデルの理論的仮定との不整合
2. 発生数と通過数の関係
3. 竜巻データベースの質

2.1 Wen and Chu モデルの物理的な意味

Wen and Chu の確率論的なモデルでは、直径 D_0 の円形構造物に対して、1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ の期待値 $E[DA(V_0)]$ は以下で表される。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] = & \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 & + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{2\pi} l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{2\pi} W(V_0) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
 & + (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 V, w, l, α は、それぞれ竜巻の最大風速、幅、長さおよび移動方向である。また、 $f(x, y, z)$ は x, y, z の同時確率密度分布、 $W(V_0)$ は幅方向の補正率である。

式(1)において竜巻長さ L を $0 \sim \infty$ まで積分していることから分かるように、Wen and Chu のモデルでは、面的に一様な竜巻パラメータ（同時確率密度分布）を持つ無限に広い領域を想定している。ただし、出現確率が非常に低ければ寄与率は無視できるため、無限に広い領域あるいは無限大の長さの竜巻を考える必要はない。しかし、結果に影響を与える竜巻の長さの範囲内では場の均一性を確保しておく必要がある。海岸線から 1km 毎の短冊に区切って竜巻パラメータを求めハザードを計算することは、そのパラメータ特性が陸側・海側の両方に広い範囲で続いていることを想定していることになる。

竜巻長さの評価は、風速と共に、ハザードの評価に最も大きな影響を与えるため、非常に狭い範囲で評価された竜巻パラメータを使用する事は問題が大きい。

2.2 発生数と通過数の関係

無限に広い領域を帯状に区切った図 2.1 のような領域を想定し、点 O で発生した長さ L の竜巻の移動を考える。それぞれの方向（ $\theta = 0$ 度の方向（海岸線を想定）は帯状の領域に平行、 $\theta = 90$ 度の方向（図の上向き）に x 軸）へ移動する確率は一樣であると仮定した場合、 x 軸方向への移動距離 x/L について示した結果を図 2.2 に示す。竜巻長さが 1.6km 程度（沿岸 ± 5 km での竜巻長さ平均値（疑似データ））であれば、海岸線から 1km 以上離れた場所に到達する確率は 0.5 程度、0.5km 離れた場所に到達する確率は 0.8 程度もある。図 2.1 は竜巻移動方向が半円内で一樣とした場合であるが、 $\theta = 90$ 度の方向に移動方向が集中していれば、通過確率は更に高くなる。また区間を短くすればするほど、移動距離の長い竜巻ほど、見かけの発生密度の増加は顕著になり、ハザードを必要以上に過大に評価することにつながる。

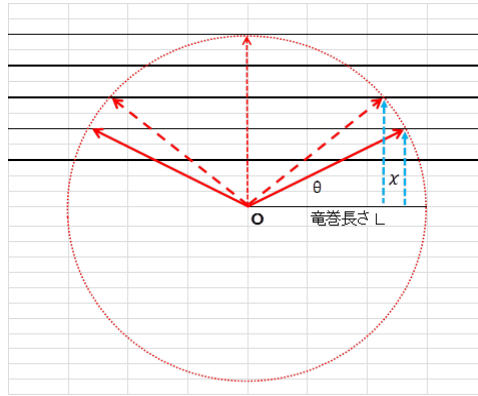


図 2.1 竜巻の発生と移動の概念図

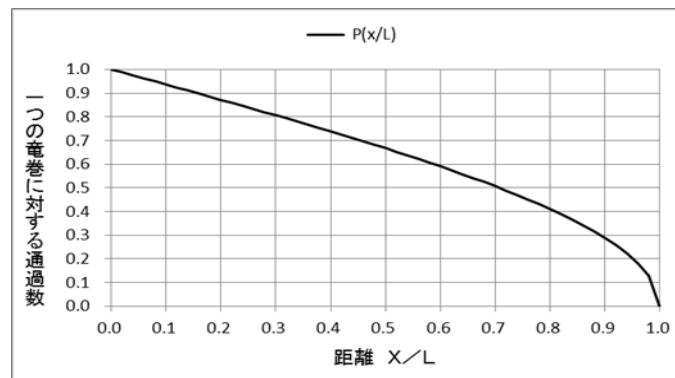


図 2.2 带状領域での竜巻の通過数

2.3 竜巻データベースの質

上陸竜巻（水上で発生し、その後上陸した竜巻）の場合、その発生場所の緯度・経度は陸上を指す場合が多く、上陸地点もしくは被害の発生地点（陸上）がデータベースに記されているものと考えられる。即ち、上陸竜巻の多くは、本当の発生位置（海上）を特定することは難しい。このような竜巻に関しては、海岸から 1km 以内の海側¹で発生したものとするとともに、上陸後の竜巻パラメータ（F スケール, 被害長さ, 被害幅）を解析に用いている。

一方、沿岸域を 1km 毎の短冊領域で評価する場合は、発生・消滅場所の緯度・経度情報から短冊内での発生数と通過数および短冊内の竜巻長さ（セグメントの長さ）を解析することになる。上陸竜巻の緯度・経度情報は、多くの場合、海側を指していないため、陸側の F スケールや竜巻幅は分かっているが、海側のセグメントの長さを評価することができない。

一方、水上（上陸せず）の竜巻は、緯度・経度情報からセグメントの長さを求める

¹ 海岸線を通じた竜巻と位置づけるのが正しいが、沿岸部を発生位置としている。沿岸部での発生数が多い一因とも言える。

ことは可能であるが、逆に F スケールや幅などのパラメータは不明である。更に、目撃情報を基にした発生・消滅位置の緯度経度から求めた竜巻長さと、陸上での実際の被害域から求めた竜巻長さとは質的に異なるデータである。

また、海上竜巻の緯度経度情報の精度についても、陸上竜巻の場合、その誤差は±1秒と非常に小さいが、海上竜巻の場合には±10～±30秒程度のものが多く、竜巻によっては±1分というものもある。一般に、沖合になればなるほど誤差範囲は大きくなり、沖合 5km では±2～±3分の誤差範囲と記されたデータも少なくない。

2. 4 発生数・同時確率密度分布・ハザードの関係

竜巻の(年平均)発生数 ν 、同時確率密度分布 $f(x,y,z)$ 、および竜巻ハザード (1年間にいずれかの竜巻により V_0 以上の被害を受ける確率 $P_{V_0}(D)$) の関係について整理する。竜巻のハザード $P_{V_0}(D)$ は、竜巻の年平均発生数 ν と次の関係にある。

$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) = \nu \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (2)$$

即ち、竜巻の場合、ハザードは年平均発生数 ν 、 $E[DA(V_0)]$ に比例し、竜巻検討地域の面積 A_0 に反比例する。

1km 幅の短冊では A_0 が 1/10 になるため、($E[\cdot]$ は一定とすると) ν が 1/10 近くにならない限りかなり大きなハザードを与える。

被害面積期待値 $E[\cdot]$ は、竜巻風速、被害幅、被害長さおよび移動方向がそれぞれ無相関だと仮定すると、次式で近似できる。

$$E[DA(V_0)] \approx (1-F(V_0)) \times [w\bar{l} + D_0\bar{l} + \bar{w}D_0 + (\pi D_0^2/4)] \quad (3)$$

即ち、被害面積期待値は、風速の超過確率 $(1-F(V_0))$ に比例する。また、上式の第 1 項、第 2 項の寄与度が大きいので、平均被害長さ \bar{l} にもほぼ比例する。

1km 幅の短冊の場合、被害長さ l を全長で取ると、(式(2)も考慮すると) 非常に大きなハザードとなる。

同時確率密度分布 $f(x,y,z)$ は、竜巻パラメータが x,y,z となる一つの竜巻の出現確率を表している。従って、 N 個の竜巻があった場合、それらの竜巻のパラメータの出現割合 (N 個に対する割合) のみが確率分布に反映され、個数 N は平均値 ν を通じてハザードに反映される (式(2)参照)。

日本の場合、沿岸部で竜巻の発生数 (含む上陸数) は多いが、比率的には F スケールの小さなものが支配的である。一方、内陸部 (例えば陸側 4～5km) では発生数は少ないが、相対的に F スケールの大きな竜巻の比率が大きい。しかも、F スケールの大きな竜巻は沿岸部から移動してくるため、通過竜巻も考慮したハザードは予想以上に厳しくなることがある。

2. 5 まとめ

1km 毎の短冊でハザードを求めることは、Wen and Chu の数学的モデルが仮定している条件を満足していない。また、Wen and Chu のモデルは、一つの竜巻の出現確率（同時確率密度分布）に基づくものであり、竜巻パラメータに応じた通過数は必然的に満足されている。従って、通過数を発生数と見なすことは、発生数を過剰に評価することになる。

短冊の区間を短く取れば取るほど、あるいは竜巻長さが長くなればなるほど、通過数を考慮した発生数の密度は高くなるという不合理性を有している。通過数は、定常な状態では一定値になることから、場の均一性を確認するために使用すべきであり、発生数と混同してはならない。

海上竜巻の緯度・経度情報を基に、1km 刻みで海上竜巻を精度良く解析することは困難である。一方で、近年、海上竜巻が数多く観測・目撃されていることを考えると、その影響は考慮すべきと考える。観測精度やデータの質等を勘案すると、海域 5km 程度の範囲内での海上竜巻の発生数を考慮しつつ、海上竜巻の特性を陸上竜巻の特性で代用する手法は妥当なものであると考える。また、海岸線から±5km の範囲は、F2 クラスの竜巻長さの平均値及びばらつき（平均値 2.967km，標準偏差 3.205km）を考慮しても、Wen and Chu のモデルの適用範囲内にあると考える。

【参考資料 4】

短冊ケース海側 0-1km の評価方法について

1. はじめに

海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く、セグメント長さが精度良く求められないため、海側 0-1km のセグメント長さの評価に陸側 0-1km 短冊の値などを代用する方法を用いて評価した。

2. 海側 0-1km 短冊でのセグメント長さの設定

海側 0-1km のセグメント長さは、竜巻特性が最も類似している隣接する陸側 0-1km 短冊での値で代用するのが合理的であると考えられる (CASE 2-6B~6D)。

一方、図 2.1 の上陸竜巻の発生位置から推察されるように、陸側 0-1km 短冊のセグメント長さは過小評価されている可能性がある。そこで、発生位置が海側あるいは海岸線にない上陸竜巻については、その発生位置を海岸線にまで外挿し、陸側 0-1km のセグメント長さ (表 2.1 の右端の欄参照) を保守的に評価し (CASE 3-1)、それを用いて海側 0-1km のハザードを評価した (CASE 3-2)。

上陸竜巻の場合、海側の発生位置は明確ではないが、全ての上陸竜巻が海側 0-1km 短冊を通過したとする極端な場合を想定し、移動経路を海側 1km まで外挿した場合のセグメント長さも参考のために求め、海側に発生位置がある上陸竜巻はその発生位置を真とし、陸側に発生位置がある場合のみ海側 1km を発生位置とした場合を、外挿混合と呼び、セグメント長さの比較を行った (表 3.1 の参考欄を参照)。

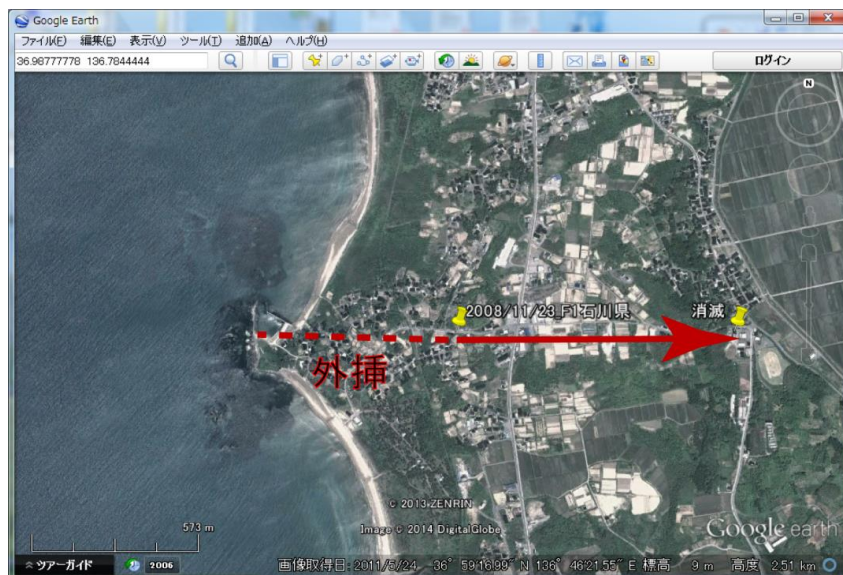


図 2.1 上陸竜巻のデータベース上の発生・消滅位置の一例(2008/11/23 の竜巻)

表 2.1 竜巻検討地域の竜巻データ一覧と 1km 短冊でのセグメント長さ

日本 海	発生日時		発生場所		発生位置		F Scale	被害長 (km)	被害幅 (m)	竜巻 区分	海側1km短冊のセグメント長さ (km)					陸側1km短冊のセグメント長さ (km)				上陸竜巻の外挿				
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度					4-5km	3-4km	2-3km	1-2km	0-1km	0-1km	1-2km	2-3km	3-4km	4-5km	海1まで	混合	陸0まで	
1	19750531	18:10	島根県	簸川郡大社町	35.433	132.628	2	1.8	50	OL						0.842					1.139	1.139	0.906	
2	19890316	19:20	島根県	簸川郡大社町	35.4	132.667	2	-999	-999	OL						-999					-999	-999		
3	19900406	2:55	石川県	羽咋郡富来町	37.203	136.682	2	10	900	OL						0	1.023	1.053	1.259	1.129	0.807	1.301	0	1.023
4	19741003	19:05	北海道	奥尻郡奥尻町	42.189	139.517	1.5	-999	-999	OL						-999						-999	-999	
5	19991125	15:40	秋田県	八森町	40.347	140.027	1.5	1	100	OL						0.896	0.123					1.024	1.024	1.000
6	19680108	9:50	新潟県	中頸城郡大潟	37.23	138.323	1	-999	-999	OL						1.151	1.164	1.161	1.173	1.173		1.182	1.182	1.201
7	19690622	9:00	山口県	阿武郡須佐町	34.625	131.603	1	6.5	200	OL						2.873	2.383					3.087	3.087	5.095
8	19721121	17:05	富山県	黒部市	36.891	137.416	1	-999	-999	OL						0						0	0	
9	19920917	9:05	北海道	増毛町	43.847	141.499	1	-999	20	OL						-999						-999	-999	
10	20010601	13:20	青森県	西津軽郡岩崎	40.535	139.946	1	0.8	150	OL						0.189						1.108	1.108	0.217
11	20040815	12:10	北海道	礼文郡礼文町	45.456	141.034	1	-999	-999	OL						0						0	0	
12	19730521	16:30	石川県	羽咋郡押水町	36.832	136.746	0.5	2	30	OL						1.084	0.978					1.088	1.088	1.090
13	19750531	18:10	島根県	簸川郡大社町	35.435	132.633	0.5	1.3	50	OL						0.361	0.133					1.539	0.361	0.133
14	19791031	13:00	石川県	羽咋郡富来町	37.139	136.684	0.5	-999	20	OL						0.243	3.1	1.123	0.081			1.881	0.243	3.1
15	20020923	14:30	富山県	下新川郡朝日	36.971	137.554	0.5	2	500	OL						0.945	1.028	1.021	0.14			1.021	0.945	1.028
16	20081123	10:20	石川県	羽咋郡志賀町	36.988	136.774	0.5	1	150	OL						0.528	0.437					1.224	1.224	1.139
17	20081015	13:48	新潟県	新潟市	37.86	138.916	0	2	70	OL						0.558	1.001	1.004	0.78			1.006	1.006	1.000
18	20081030	12:38	鳥取県	岩美郡岩美町	35.584	134.293	0	0.8	3	OL						0.018	0.802					1.268	0.018	0.802
19	20091030	7:26	青森県	西津軽郡深浦	40.505	139.999	0	0.1	30	OL						0						0	0	
20	20100917	10:55	新潟県	長岡市	37.634	138.76	0	2.5	150	OL						0.001	1.041	1.13	0.412			1.040	0.001	1.041
21	20101015	4:30	石川県	羽咋郡志賀町	37.168	136.676	0	0.1	30	OL						0.049						1.115	1.115	0.104
22	20101015	17:00	新潟県	胎内市	38.056	139.323	0	0.8	200	OL						0.819						1.123	1.123	0.889
23	20101017	12:40	秋田県	山本郡八峰町	40.381	139.995	0	0.5	100	OL						0.475						1.507	1.507	0.489
24	20101227	1:30	石川県	羽咋郡志賀町	37.018	136.744	0	0.7	80	OL						0.606						1.037	1.037	0.744
25	19780814	10:40	北海道	豊富町	45.083	141.633	-999	1.2	20	OL						0.962	0.135					1.126	1.126	1.092
26	19930926	15:52	北海道	留萌市	43.955	141.615	-999	0	0	OL				0.435	2.436	0.556						2.436	2.436	0.556
27	19960905	10:20	秋田県	由利郡金浦町	39.255	139.9	-999	0	0	OL						1.013						1.092	1.013	
28	20090823	18:37	山形県	鶴岡市	38.61	139.574	-999	-999	-999	OL						0						0	0	
29	20090823	18:51	山形県	鶴岡市	38.624	139.585	-999	-999	-999	OL						0						0	0	
30	20091004	12:50	秋田県	秋田市	39.665	140.074	-999	-999	-999	OL						0						0	0	
31	20091027	13:10	新潟県	糸魚川市	37.035	137.821	-999	-999	-999	OL						0						0	0	
32	20101026	7:10	北海道	石狩市	43.394	141.431	-999	0.1	20	OL						0.009	0.182					1.858	0.009	0.182

3. 竜巻パラメータの推定結果及び竜巻ハザードの推定結果

ハザードの計算条件を表 3.1 に示す。また、ハザードの推定結果を図 3.1 および表 3.2 に示す。陸側 0-1km の長さで代用した場合 (CASE 2-6B) は、ハザードの風速は 58.4m/s と±5km ケースとほぼ同じとなる。

海側 0-1km のハザードは、不確実性が最も大きな短冊であり、そのセグメント長さの取り方によって結果が 59～62m/s の範囲となるが、いずれにおいても $V_B(=76m/s)$ を上回らない。

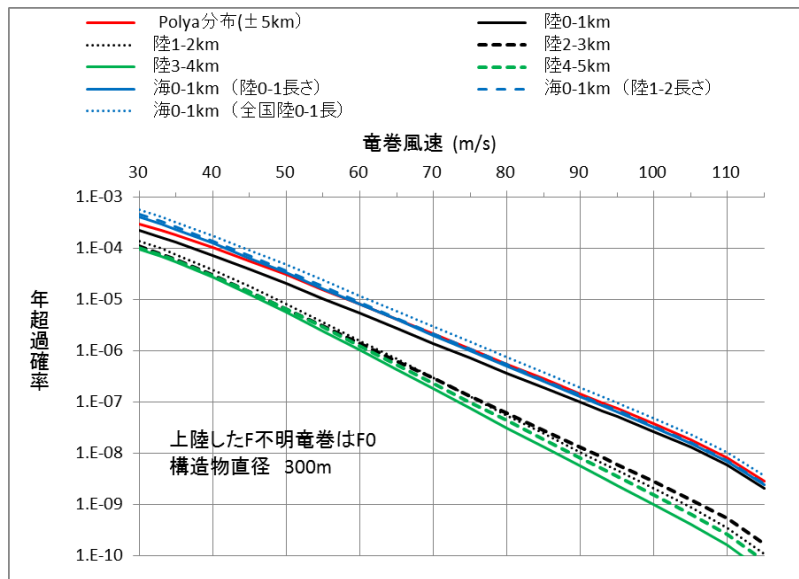
表 3.1 竜巻ハザードの計算条件

検討ケース	竜巻検討地域 (日本海側±5km)	統計量	発生数	風速	幅	長さ	相関係数		
			(個)	(m/s)	(m)	(m)	U ~ W	U ~ L	W ~ L
CASE 1A-1	±5km (V-様分布)	平均値	23.05	28.6	121	1607	(0.05)	0.31	0.46
		標準偏差	8.97	9.4	131	2697			
CASE 2-1	陸 0-1km	平均値	4.41	28.5	128	632	同上 (検討地域±5kmの値を 代用)		
		標準偏差	3.40	9.7	154	448			
CASE 2-2	陸 1-2km	平均値	1.90	29.4	197	766			
		標準偏差	2.17	8.6	173	434			
CASE 2-3	陸 2-3km	平均値	1.98	28.1	174	684			
		標準偏差	1.58	8.8	180	366			
CASE 2-4	陸 3-4km	平均値	1.09	30.6	213	861			
		標準偏差	0.79	8.6	216	310			
CASE 2-5	陸 4-5km	平均値	0.87	31.3	299	1029			
		標準偏差	0.99	9.0	247	132			
CASE 2-6A	海 0-1km	平均値	8.99	28.0	100	65			
		標準偏差	4.93	9.3	120	183			
CASE 2-6B	海 0-1km (陸0-1km長さ)	平均値	8.99	28.0	100	632			
		標準偏差	4.93	9.3	120	448			
CASE 2-6C	海 0-1km (陸1-2km長さ)	平均値	8.99	28.0	100	766			
		標準偏差	4.93	9.3	120	434			
CASE 2-6D	海 0-1km (全国陸0-1km長さ)	平均値	8.99	28.0	100	896			
		標準偏差	4.93	9.3	120	810			
CASE 3-1	陸 0-1km (外挿)	平均値	4.41	28.5	128	703			
		標準偏差	3.40	9.7	154	582			
CASE 3-2	海 0-1km (陸0-1km外挿長さ)	平均値	8.99	28.0	100	703			
		標準偏差	4.93	9.3	120	582			
参考	海側 0-1km 外挿混合	平均値	8.99	28.0	100	874			
		標準偏差	4.93	9.3	120	574			

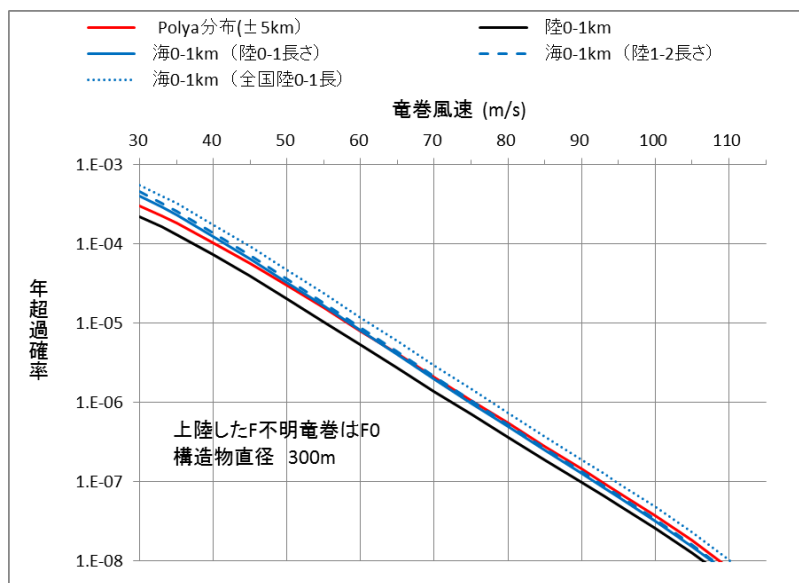
(注)風速のゴシックは、風速を F スケール内の一様分布で推定。その他は中央値。

(注)相関係数の赤字は負の相関を表す。負の相関の場合は、無相関 (=0) とする。

1km 短冊の相関係数は、±5km 領域での値を代用。



(a) 短冊領域のハザード比較



(b) 海岸線付近のハザード比較

図 3.1 短冊領域におけるハザードの推定結果

表 3.2 超過確率に対応した竜巻風速

検討ケース	柏崎刈羽原子力発電所 【建物直径 300m】	超過確率 (Polya) に対応する風速				
		1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-08
CASE 1A-1	±5km (V-様分布)	40.3	58.3	75.4	92.7	108.7
CASE 1A-2	±5km (V 中央値)	38.8	53.6	67.1	80.4	93.9
CASE 2-1	陸側 0-1km	37.2	55.2	72.4	89.9	106.6
CASE 2-2	陸側 1-2km	32.7	48.7	62.6	76.4	90.3
CASE 2-3	陸側 2-3km	30.6	47.2	62.0	76.6	91.6
CASE 2-4	陸側 3-4km	---	46.4	60.1	73.3	86.5
CASE 2-5	陸側 4-5km	30.1	47.1	61.2	74.9	88.6
CASE 2-6A	海側 0-1km	32.1	49.7	65.8	82.0	98.6
CASE 2-6B	海 0-1km (陸0-1km長さ)	41.6	58.4	74.9	91.7	107.7
CASE 2-6C	海 0-1km (陸1-2km長さ)	42.4	59.0	75.4	92.1	108.0
CASE 2-6D	海 0-1km (全国陸0-1km長)	44.3	61.1	77.8	94.7	110.2
CASE 3-1	陸 0-1km (外挿)	38.1	56.0	73.2	90.6	107.2
CASE 3-2	海 0-1km (陸0-1km外挿)	42.6	59.5	76.0	92.9	108.7

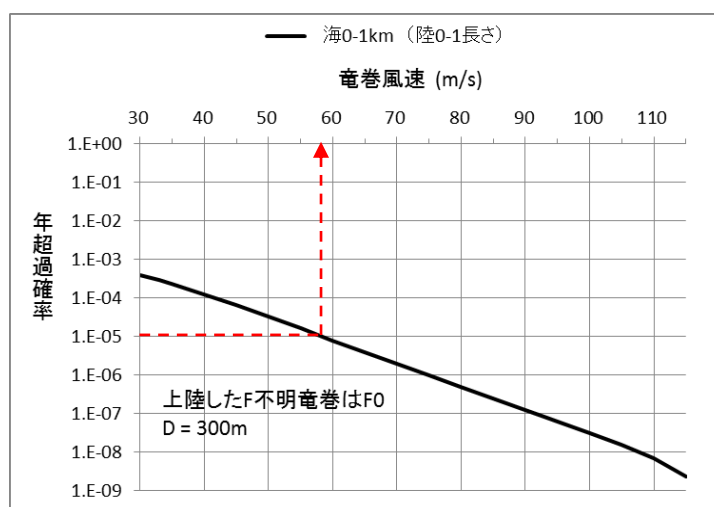


図 3.2 竜巻検討地域における海側 0-1km のハザード (CASE 2-6B)

【参考資料 5】

竜巻ハザードの推定幅（推定誤差）に関する考察

1. はじめに

自然現象評価では、不確実さの存在を認識することが重要であるため、竜巻ハザードに関わる不確実さ要素について以下の通り整理した。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

確率分布形選択に伴うパラメータ不確実さ

⇒2.1 節で検討

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

データ収集期間が 51.5 年間分であることから、地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確実さ

⇒2.1 節, 2.2 節で検討

③ データの不確実さ（偶然的な不確実さ）

今後データ収集が進み、疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る、データそのものの不確実さ

⇒2.1 節で検討

これらの不確実さ要素がハザード評価に及ぼす影響について検討する。

2. 不確実さ要素の影響検討

2. 1 竜巻パラメータとハザードの推定誤差（①, ②, ③）

疑似データ 1187 個の竜巻データに対して、Jackknife 法を適用した。Jackknife 法は水文統計分野で広く使用される手法で、国土交通省が定める河川行政の技術分野に関する基準である「河川砂防技術基準」においても、確率分布モデルのバイアスを補正すると共に、その安定性を評価する手法として挙げられている。母集団分布を仮定しないノンパラメトリックな方法であり、高い適用性をもつ。

Jackknife 法は大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標本を全ての i について作成し (n セット作成することになる)、これらの標本から求めた統計量をもとに不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。(具体的な計算方法は後述)

n 個の全データを使って求められた再現期待値 (例えば風速平均値の場合、 n セットの風速平均の平均) を P_0 とすると、バイアス補正した推定値 (以下、Jackknife 推定値という) P^* とその標準偏差の推定値 (以下、Jackknife 推定幅という) ΔP^* は次式で与えられる。

$$P^* = P_0 + (n-1)(P_0 - \bar{P}) \quad (1)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{n-1} \Delta P \quad (2)$$

ここで、 \bar{P} は分布を仮定した場合の推定値（以下、単に推定値という）、 ΔP は n セットの風速平均データの標準偏差、式(1)の下線部がバイアスと呼ばれ、母数の真の値と推定値の差である。

本検討で得られた結果を表 1 に示す。

例えば風速の平均値の場合、Jackknife 推定値は 28.622m/s であり、対数正規分布を仮定した場合の推定値 28.591m/s とほぼ同じである。また、Jackknife 推定幅は 0.236m/s と推定される¹⁾。

これらの平均値と標準偏差、及びそれぞれの推定幅を基に、全てのパラメータを +1 σ とした場合のハザードを計算した。計算条件の一覧を表 2 に示す。また、ハザードの推定結果を図 1、図 2、及び表 3 に示す。

図 1 よりデータの変動に伴うバイアス誤差は小さいことが確認できる。(①、②の不確実さ推定)

ハザードについては表 3 より、サンプリング誤差に伴う不確実さについて信頼度 84% をカバーする値として、年超過確率 10^{-5} において 59.72m/s であると言える。(③の不確実さを考慮)

表 1 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの特性

日本海 疑似データ1187個	風速(U)		幅(W)		長さ(L)		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	28.591	9.391	123.0	130.3	1607.1	2697.4	0.0210	0.2892	0.4928
標準偏差	0.007	0.008	0.1	0.2	2.3	5.5	0.0009	0.0008	0.0007
全データ	28.591	9.391	123.0	130.3	1607.1	2697.4	0.0210	0.2892	0.4928
バイアス	-0.031	-0.042	0.2	0.0	-0.5	-6.3	0.0404	0.0332	0.0200
Jackknife 推定値	28.622	9.433	122.8	130.3	1607.6	2703.7	-0.0194	0.2560	0.4728
Jackknife 推定幅	0.236	0.270	3.8	6.7	78.3	188.3	0.0321	0.0284	0.0235

表 2 ハザードの計算条件

ケース名	統計量	発生数	風速(U)	幅(W)	長さ(L)	U~W	U~L	W~L
基本(全データ)	平均	23.049	28.591	122.977	1607.077	0.0210	0.2892	0.4928
	標準偏差	8.972	9.391	130.320	2697.369			
バイアス補正後	平均	23.049	28.622	122.807	1607.573	-0.0194	0.2560	0.4728
	標準偏差	8.972	9.433	130.350	2703.693			
風速・幅・長さ・相関 (+1 σ)	平均	23.049	28.858	126.591	1685.861	0.0128	0.2844	0.4964
	標準偏差	8.972	9.703	137.088	2891.977			

注) 発生数の平均と標準偏差は、疑似データの値を使用。

注) 負の相関係数は0と置く。

¹⁾ 疑似データの場合、F スケールの小さな竜巻の割合が多く、幅や長さの変動が小さくなる。

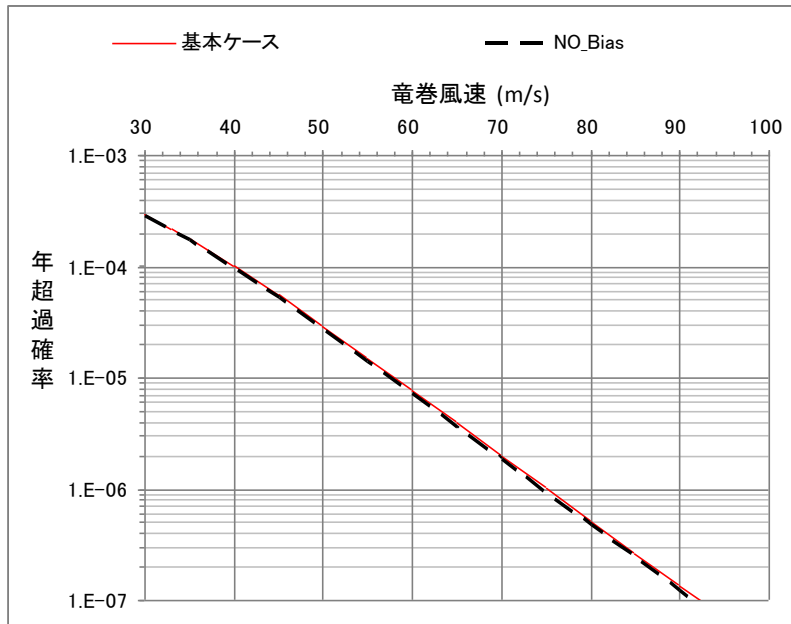


図 1 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

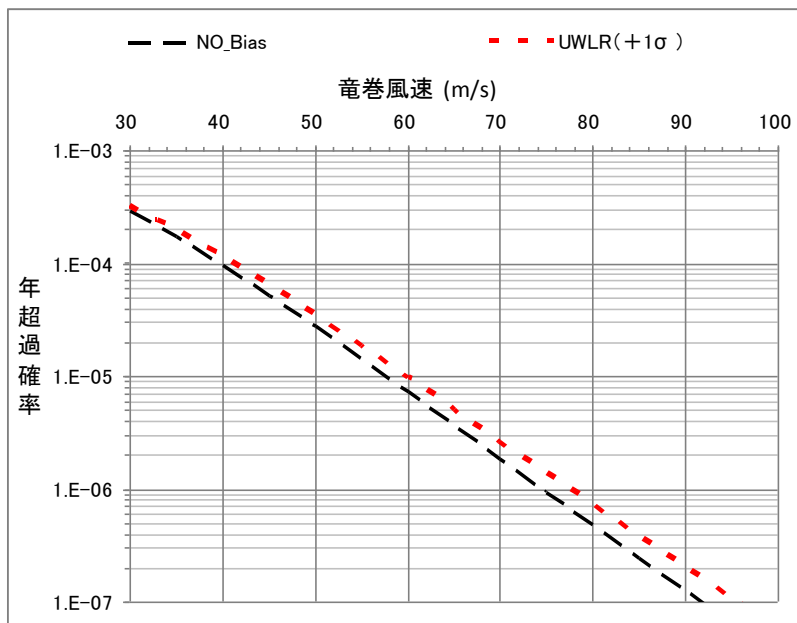


図 2 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較

表 3 ハザード推定結果

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差			
	1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07
基本(全データ)	40.15	58.02	75.06	92.25	0.47	0.56	0.61	0.64
バイアス補正後	39.68	57.46	74.45	91.61	-	-	-	-
風速・幅・長さ・相関(+1σ)	41.16	59.72	77.56	95.49	1.48	2.26	3.11	3.88

<疑似データ無しの場合の解析>

疑似データの場合、F スケールの小さな竜巻の割合が多く、幅や長さの変動が小さくなる傾向がある。そのため、3種類の竜巻パラメータがすべて判明している52個の竜巻観測データのみを用いて同様の検討を実施した。即ち、観測データは均質なデータから成り、疑似データは存在しない。パラメータの推定結果を表4、計算条件の一覧を表5、ハザードの推定結果を図3、図4、及び表6に示す。疑似データの場合と比較して、Jackknife 推定幅は大きくなっていることがわかる。したがってハザードの推定幅についても大きくなる傾向があるものの、発生数の違い²を考慮し年超過確率 10^{-6} の最大風速を見ても、幅は10m/s程度であることが確認できる。

表4 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの特性 (疑似データ無し)

日本海 生データ52個	風速		幅		長さ		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	36.337	11.655	129.8	154.8	1815.4	2227.7	0.0023	0.3210	0.4399
標準偏差	0.226	0.143	3.0	6.5	43.3	59.7	0.0090	0.0168	0.0171
全データ	36.337	11.656	129.8	154.9	1815.4	2228.5	0.0000	0.3210	0.4399
バイアス	0.002	-0.045	0.0	-7.0	0.0	-40.7	0.1154	-0.0022	0.0006
Jackknife 推定値	36.335	11.700	129.8	162.0	1815.4	2269.3	-0.1154	0.3232	0.4393
Jackknife 推定幅	1.616	1.021	21.5	46.7	309.0	426.1	0.0645	0.1198	0.1221

表5 ハザードの計算条件 (疑似データ無し)

ケース名	統計量	発生数	風速	幅	長さ	U~W	U~L	W~L
基本(全データ)	平均	1.010	36.3365	129.769	1815.385	0.0023	0.3210	0.4399
	標準偏差		11.6550	154.791	2227.749			
バイアス補正後	平均	1.010	36.3346	129.759	1815.400	-0.1154	0.3232	0.4393
	標準偏差		11.7004	161.961	2269.288			
風速・幅・長さ・相関 (+1σ)	平均	1.010	37.9509	151.243	2124.444	-0.0510	0.4429	0.5614
	標準偏差		12.7212	208.638	2695.378			

² 発生数が少なくなるため、最大風速の年超過確率自体は小さくなる。

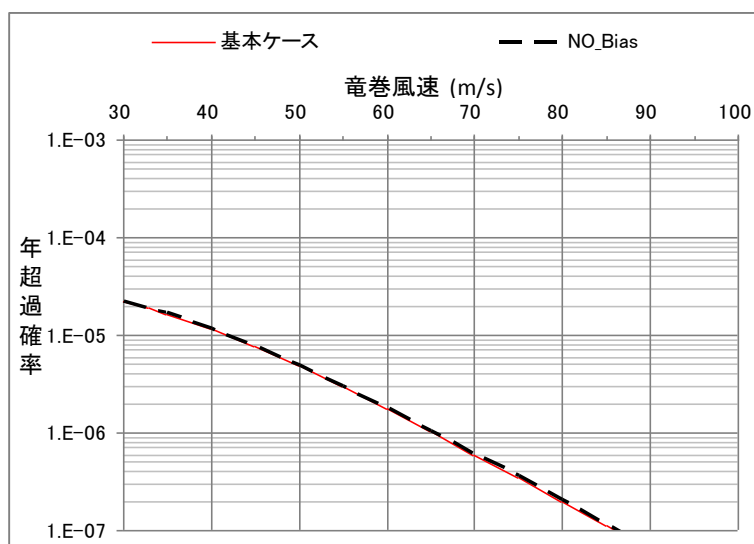


図3 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較
(疑似データ無し)

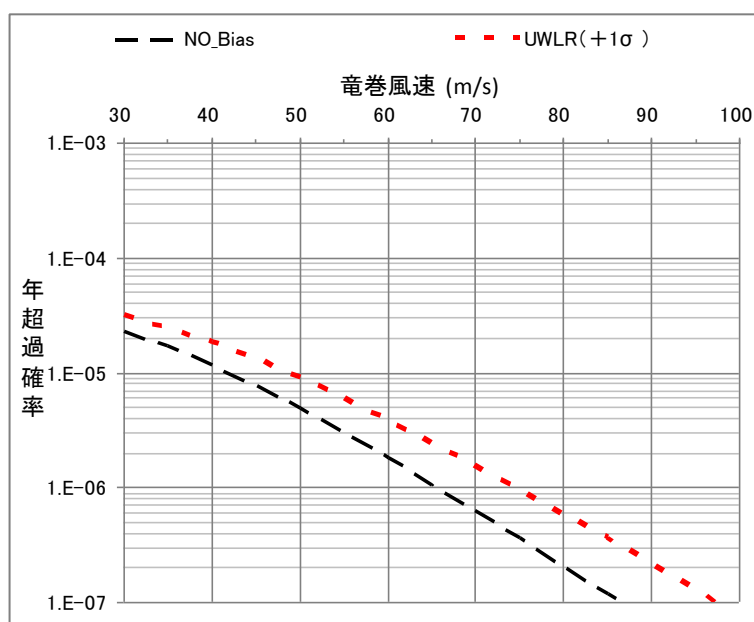


図4 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較
(疑似データ無し)

表6 ハザード推定結果 (疑似データ無し)

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速			バイアス補正後の竜巻風速との差		
	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-05	1.E-06	1.E-07
基本(全データ)	41.77	65.26	85.98	-0.11	-0.25	-0.39
バイアス補正後	41.88	65.51	86.37	-	-	-
風速・幅・長さ・相関(±1σ)	48.42	74.45	97.32	6.54	8.94	10.95

2. 2 日本海側での F3 竜巻がハザードに与える影響 (②)

日本海側では F3 竜巻の観測事例は無いが、F3 竜巻が 1 つあったと仮定した場合(明日、F3 竜巻が発生した場合、あるいは F3 竜巻が 1 つ見逃されていた場合を考慮) のハザードへの影響を検討した。

データに、1999 年 9 月 24 日に豊橋で観測された F3 竜巻(長さ 18km, 幅 550m) を一つ加えて疑似データを作成した³。日本海に多く見られる海上不明竜巻を陸上竜巻の F スケール比率で按分する影響で、F3 竜巻は疑似データ上 4 個となった。これを基にハザードを推定したところ、年超過確率 10^{-5} に相当する風速は、62.2m/s に増加した。

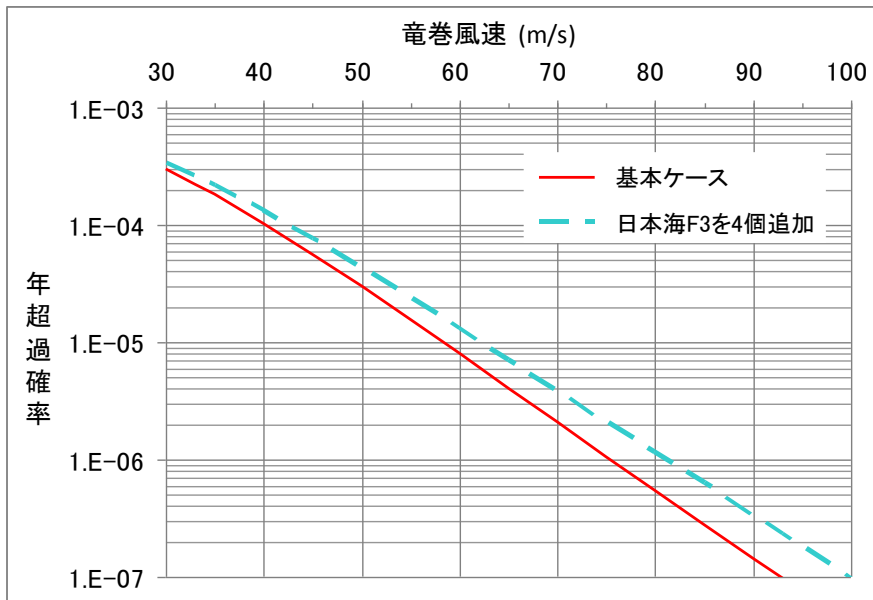


図 5 F3 竜巻発生を仮定した場合の竜巻風速の年超過確率分布

³ 太平洋側沿岸±5km において、F3 竜巻は豊橋の事例のみであり、その他の F3 竜巻は F2~F3 を F3 として扱っている。また、竜巻長さも 18km と長く、かなり厳しい竜巻を対象としている。

3. まとめ

不確実要素のハザード算定への影響について以下のような結果が得られた。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1m/s 以下の変化であったことから、影響は限定的である。

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒②同様、バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1m/s 以下の変化であったことから、安定した標本となっており、母集団の確率特性をよく表現できていると考えられる。また仮に、データに F3 竜巻を 4 個追加した場合も、年超過確率 10^{-5} において竜巻風速は 62.2m/s となった。

③ データ（疑似データ）の不確実さ（偶然的な不確実さ）

⇒データの不確実さを考慮したハザード評価により、サンプリング誤差の不確実さについて信頼度 84% をカバーする値として、年超過確率 10^{-5} において 59.72m/s であると言える。

以上より、 $V_B=76\text{m/s}$ は高い信頼度を持った数値と推測されることから、合理的に望ましい対策を検討するために使用可能な数値と判断できる。

— Jackknife 法の具体的な手順 —

大きさ n の標本の各データを X_1, X_2, \dots, X_n とする。これを用いて求める母集団の特性を推定する統計量（竜巻ハザードの場合、各パラメータの平均及び分散）を

$$\hat{\psi} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

とする。大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標本を用いた統計量を

$$\hat{\psi}_{(i)} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n)$$

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

$$\hat{\psi}_{(\bullet)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\psi}_{(i)} \quad (3)$$

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

$$\hat{BIAS} = (n-1)(\hat{\psi}_{(\bullet)} - \hat{\psi}) \quad (4)$$

これを用いて統計量のバイアスを補正した Jackknife 推定値は次式で与えられる。

$$\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \hat{BIAS} = n\hat{\psi} - (n-1)\hat{\psi}_{(\bullet)}$$

また、Jackknife 法による推定幅は、

$$\hat{VAR} = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\psi}_{(i)} - \hat{\psi}_{(\bullet)})^2 \quad (5)$$

で求められる。

地形効果による竜巻風速への影響について

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速(V_D)を設定することが求められている。

ここでは、既往の研究に基づく地形起伏の竜巻の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 対象とする地形起伏スケールの整理

竜巻に対する地形の効果は、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」などへの影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」などへの影響とに大別される。

前者への言及として、例えば、Markowsk and Dotezk(2011)による数値気象モデル(CM1)を用いた検討などがある。ここでは、メソスケールの地形（尾根幅数十km程度）が、CAPEやSRHといった、竜巻の発生要因を支配するパラメータに与える影響が論点となる。加藤らによる佐呂間竜巻への分析もこれに相当すると考えられる。

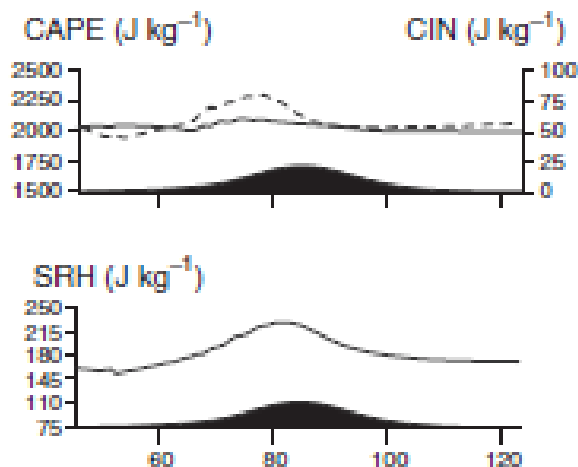


図1 メソスケール尾根地形に起因するCAPE, SRHなどのパラメータの変化を調べた例

一方、竜巻風速 V_D に対する地形影響には、後者が相当する。ここでは、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流およびそれに随伴して生じる強風への地形影響が論点となる。ここで考慮すべき地形の規模としては、前述のメソスケールのものと比べて小さく数百m規模と考えられる (Karstens 2012, Lewellen 2012)。

3. マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流強度および強風に与える影響

マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流および強風に与える影響の定量的評価は、未だ、研究課題である (Karstens 2012)。しかしながら、定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は、①被害状況調査、②風洞実験、③数値シミュレーションとなる。

①被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) では、実際の竜巻の被害を精査し、被害状況と地形特性との関係を調べる。これにより、被害が発生しやすい地形特性を分析し、そこから旋回流強度および風速の強弱を類推することになる。

②風洞実験 (Karstens 2012) では、風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ、その上部に竜巻発生装置を設置し、それを移動させたときの、地表面近傍の圧力・風速分布を調べる。

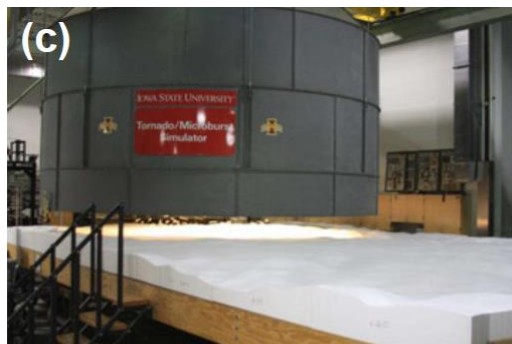


図2 風洞実験の様子 (Karstens 2012)

③数値シミュレーション (Lewellen 2012) では、竜巻の旋回流や移動および地形の起伏を模擬した流体解析コードによる、数値実験を行い、旋回流の強度や風速および竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

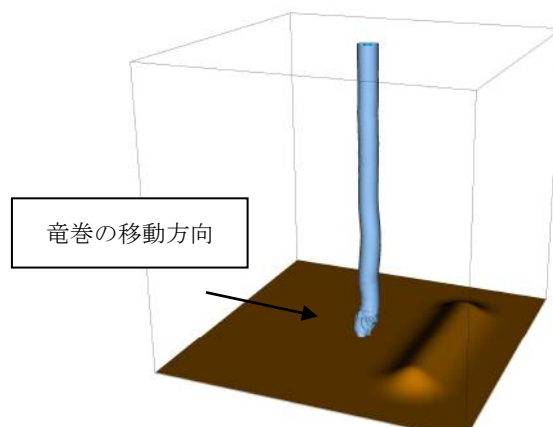


図3 数値シミュレーションのセットアップ

これらを通じて、マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。被害状況調査により、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている (Forbes 1998, Karstens 2012)。また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験・数値シミュレーションにおいても確認されている。2次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験 (Karstens 2012) および数値シミュレーション (Lewellen2012) の結果をそれぞれ、図 4, 図 5 に示す。風洞実験の結果である図 4 において、(a)に示す2次元尾根地形を図中左側から右側に竜巻を模擬した旋回流が移動するとき、地表面で測定された圧力の最大値が(b)になる。ここで実験仕様の制約上、風速のデータは取得されておらず、風速に相当するものとして、圧力勾配 (圧力の高いところから低いところに流れる風の駆動力になり、風速に相当する) を(c)に示している。(c)の結果から、

- ①圧力勾配 (図(c)) が斜面において、正・負の値を持つこと (=旋回流が強弱する)
- ②斜面に比べ尾根の上・下流の平坦部ではほぼフラットとなること (=旋回流の強度が変化しない)

を理解できる。

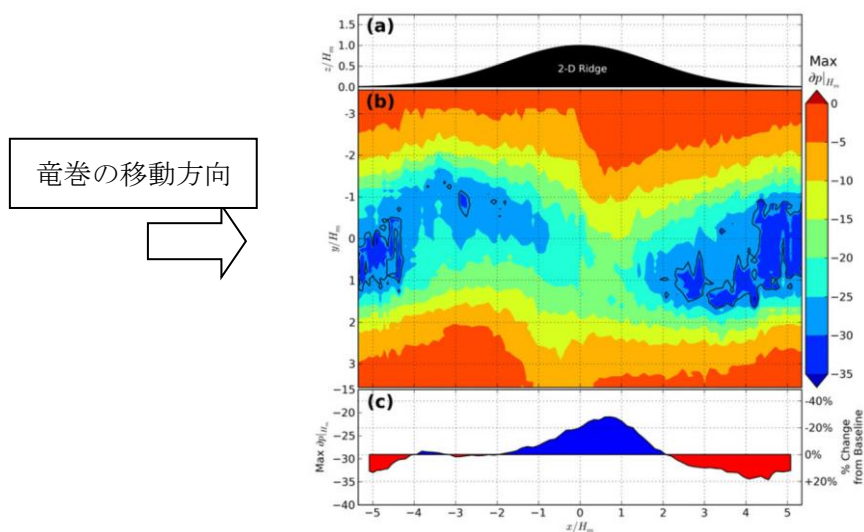


図 4 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力および圧力勾配 (風速に相当)

数値シミュレーション結果である図 5 において、ピーク圧力が(a), 風速が(b)になる。シミュレーションは風速の取り扱いを可能としており、図 5 の(b)のような結果の議論を可能としている。図中の黒色実線が等高線を意味し、竜巻は、図 4 と同じく図中左側から右側へと移動している。この結果も、下記のとおり図 4 の知見と整合している。

- ・上り斜面では圧力が増加し（緑色→赤色）、下り斜面では圧力が減少（赤色→緑色）する（実験で得られた知見①を支持）
- ・ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平たん部の圧力は上流側と下流側とで同レベルとなる。（実験で得られた知見②を支持）

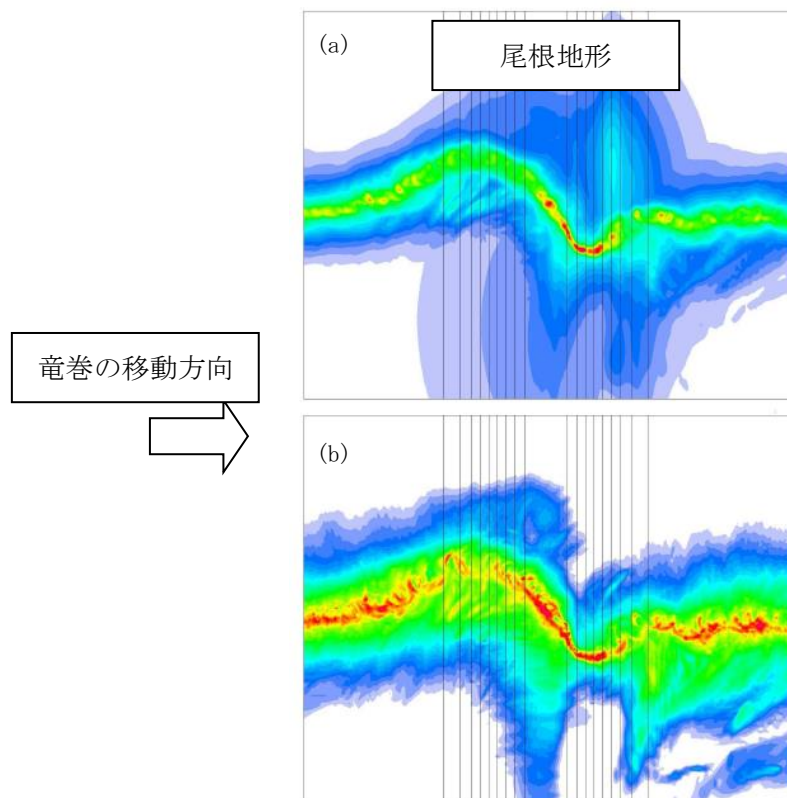


図 5 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力および風速

ここで地形の規模として尾根高さ H_m に対して $\pm 5H_m$ を考慮していることにも留意を願いたい。これは、尾根高さが 100m の場合、 $\pm 500m$ にわたる地形を対象としていることを意味する。

また、これらの研究が、地形の起伏の影響範囲が、斜面および尾根・山の頂・裾部に限定されることを示唆していることを強調したい。図 4, 5 にみられるとおり、地形の下流側の平たん部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。

4. 柏崎での地形起伏の効果

竜巻集中地域と竜巻検討地域で発生した竜巻の移動経路の発生頻度を図 6 に示す。北東から東南東に向かう竜巻が顕著であることを確認できる。すなわち、地形影響を議論する際には、特に、柏崎サイトより西側に注視すればよいといえる。

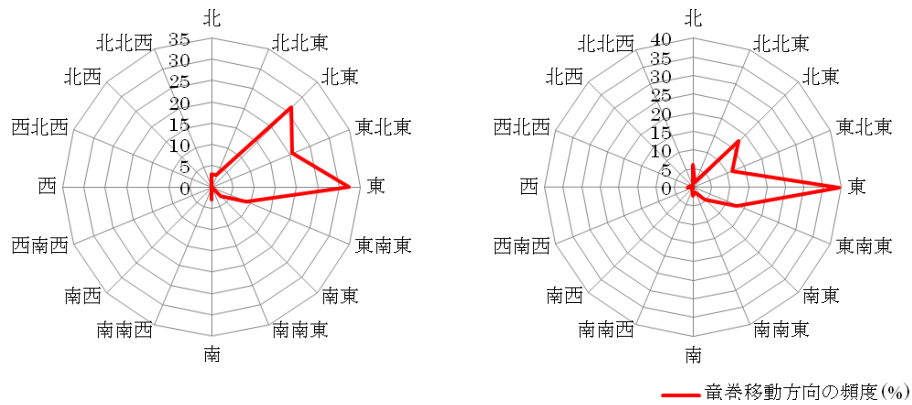


図 6 竜巻の移動経路の発生頻度（左：竜巻集中地域，右：竜巻検討地域）

柏崎を含む周辺の地形状況を図 7 に示す。図中において、地形の起伏を等値線から確認することができる。参考までに、粗度区分もカラーコンタで併記している。また、図 8 には、東向きの移動経路を勘案して、東西方向の鉛直断面の地形起伏を示した。

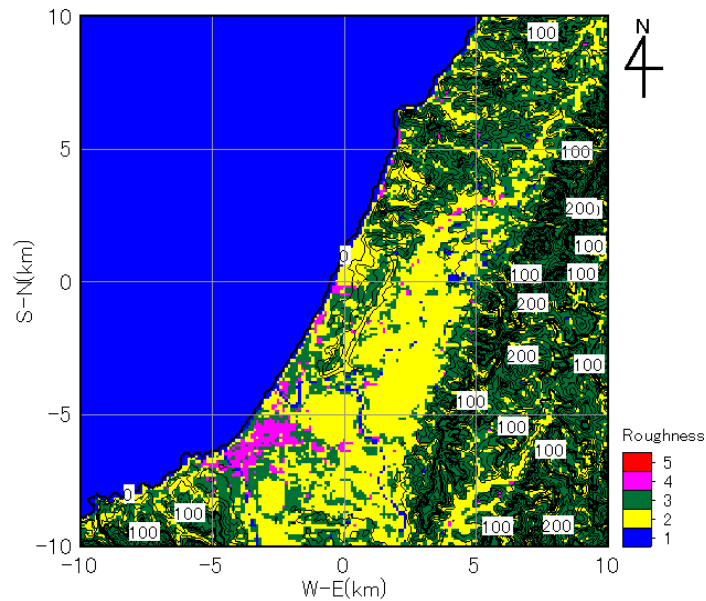


図 7 柏崎周辺の地形起伏

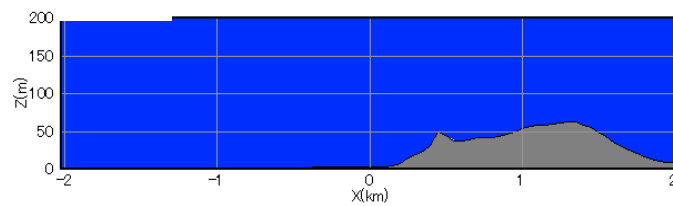


図 8 柏崎東西方向の鉛直断面での地形起伏

これらの結果から、柏崎周辺の数km領域において、「尾根高さ H_m に対して $\pm 5H_m$ 」という既往の研究が示している影響範囲の大きさに該当する地形が存在しないことがわかる。特に、西側については、海が占有し、地形を平坦と判断しうることを理解できる。

さらに、地形の起伏に伴う風速の増減について、数値シミュレーションによる検討も行った。図9に、8風向に対する増減速率（流入風速に対する比）の計算結果を示す。なお、実際の風況シミュレーションでは地形の起伏と粗度の影響とを重畳させることが一般的であるが、ここでは地表面粗度を一様（粗度区分Ⅱ）とした結果を示している。これは、地形効果への議論を明確に示すことを意図したものである（別途、地表面粗度の影響を考慮したシミュレーション結果も実施し、ここで提示した結論との整合を核にしている）。

この数値シミュレーションでは、直線的な風（straight wind）に対する計算を行ったが、上記で取りまとめた竜巻に関する知見とは異なり、下り坂で減速する特徴があるため、発電所付近において風速の顕著な減速がないという観点で確認した。図中のカラーコンタが増減速の度合い（比）を10倍したものを示す。原点位置が該当地点（発電所）となる。図6に示す竜巻の主な移動方向に対する計算結果において、発電所付近においてカラーコンタが緑色（比として1前後）から明確な変化はしていないことから、地形による風速の顕著な変調は見られず、風の場合に対する地形の起伏の影響は小さいと判断される。

参考文献

Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, Minneapolis, MN, pp.269-272.

Karstens CD (2012) Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778.

Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms Amer Meteorol Soc, Nashville, TN, 4B.1.

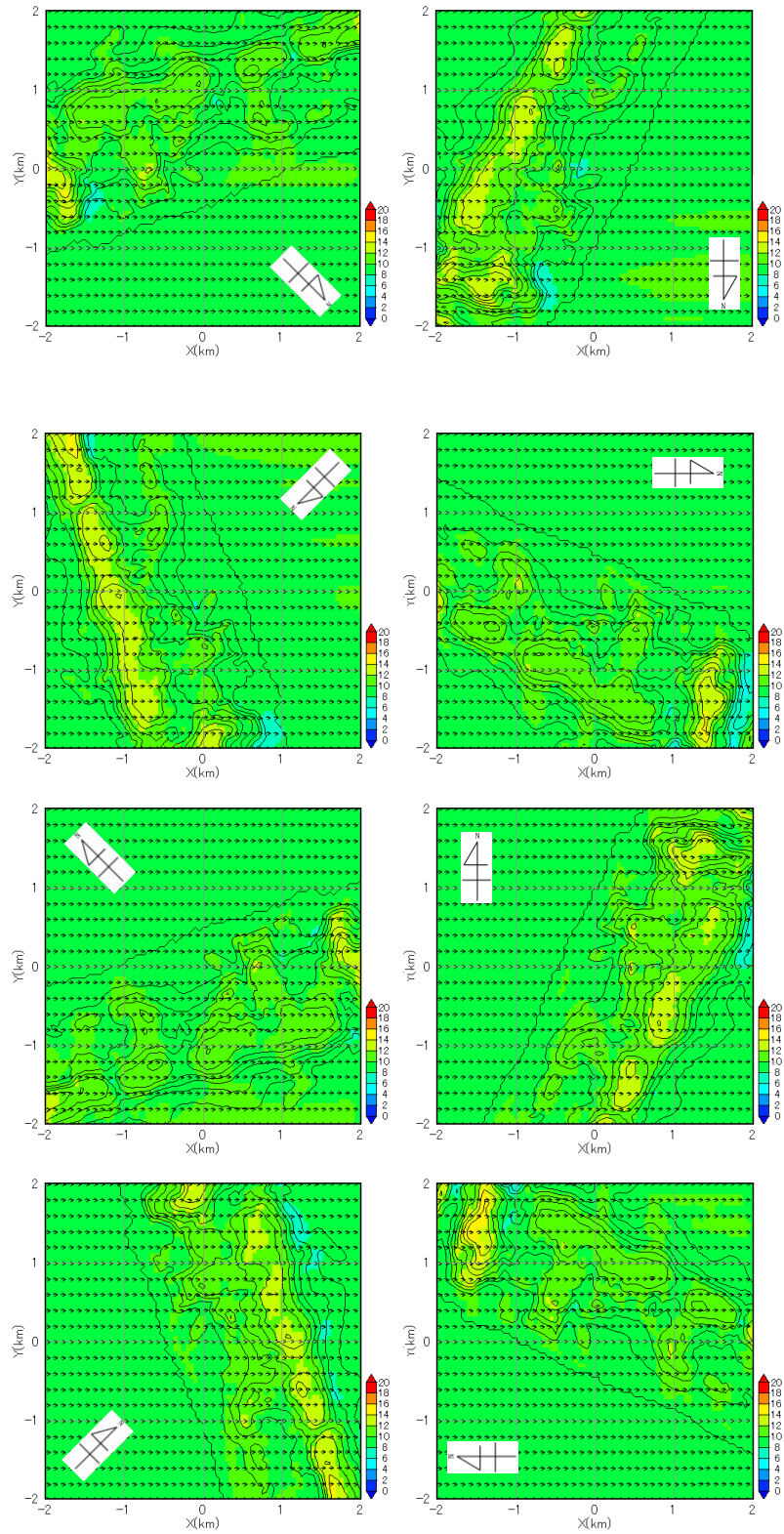


図 9 柏崎周辺の風速の増減速率分布（8 風向）（流入風速に対する比を 10 倍にして表示）

参考資料 1：地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは、本資料で示した地形の起伏による竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈を示す。なおここで示す、角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を、被害状況調査（Forbes 1998, Karstens 2012）や風洞実験（Karstens 2012）も支持している。

一般的に、回転する流れでは、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。これは角運動量保存則と呼ばれるが、角運動量保存則と Holton (1992) を参考に、竜巻旋回流が形成された後における渦の伸長・収縮に伴う旋回流風速の増速・減速機構を以下に導く。竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると、上り坂を越える場合（図の渦 1 から渦 2 へ移動する場合）には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h_1} (\rho r^2 \omega_1) dh \cdot r dr d\varphi = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_2} \int_0^{h_2} (\rho r^2 \omega_2) dh \cdot r dr d\varphi \quad ①$$

$$\frac{1}{4} r_1^4 \omega_1 h_1 = \frac{1}{4} r_2^4 \omega_2 h_2 \quad ②$$

ここで、 ω は角速度、 r は渦コア（気柱）の半径、 h は渦コア（気柱）の高さ、 ρ は空気密度であり、添字の 1 と 2 はそれぞれ、渦 1 と渦 2 に対する値を表す。また、気柱の体積が保存されるので、式③が成立する。

$$\pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \Rightarrow r_2^2 = \frac{h_1}{h_2} r_1^2 \quad ③$$

この関係を式②に代入すると、式④が得られる。

$$\frac{\omega_1}{h_1} = \frac{\omega_2}{h_2} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{h} \right) = 0 \quad ④$$

④の関係式は「渦位（ポテンシャル渦度）の保存式」に相当するものであり、角速度 ω は地上高さ h に比例することがわかる。また、③より、渦の半径 r は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速（ $\omega \times r$ ）は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

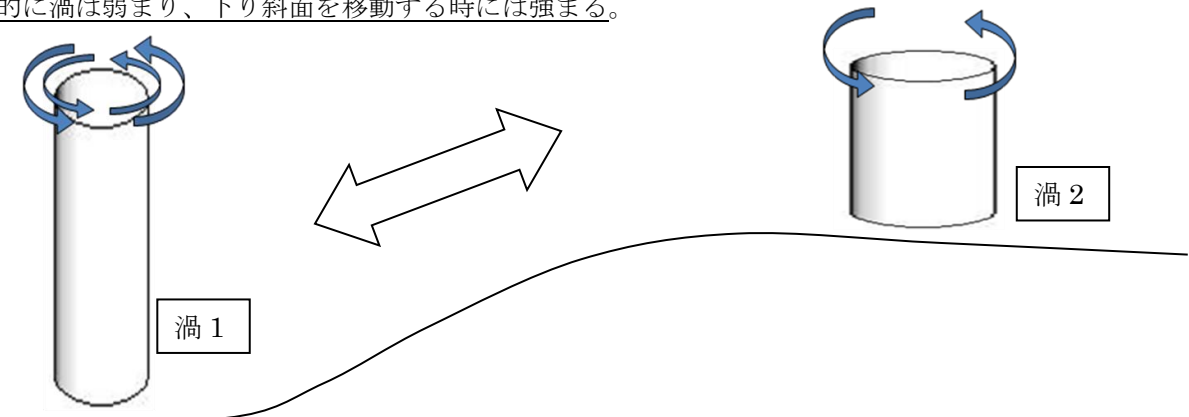


図 1 竜巻の旋回流の地形影響に関する模式図

参考資料 2：竜巻による旋回流を対象とした数値シミュレーションへのレビュー

竜巻影響評価ガイドおよびその解説に記載されている参考文献において、地形影響による旋回流の強化の評価技術として、数値シミュレーションの援用が例示されている。ここでは、ラージエディシミュレーション (LES) という技法が用いられている。LES では、風の運動を支配する方程式系を数値的に解くことにより、風の三次元分布の非定常な変化を求める。計算自体には仮定が少ないのが長所であるが、膨大な計算資源が必要であること、計算の初期・境界条件の設定が難しいこと、が欠点である。竜巻の実際の流れ場を対象とした場合、より難しいものとなる。

具体的には、LES では、風の変動を大規模なものと同規模なものに分離し、前者を数値シミュレーションの中で直接的に再現し、後者を物理法則から妥当性を類推できる仮定にもとづくモデル (サブグリッドモデル) で表現する。そのため、計算精度が格子解像度、計算手法やサブグリッドモデルの現象再現性に強く依存する。一方、表 1 に示すように、近年の竜巻数値流体計算に用いられている格子解像度や計算手法には、様々なものが用いられており、適切な手法として統一的な知見が得られていないのが現状といえる。

このことを勘案して、本資料では、数値シミュレーションの結果を援用して、旋回流の増減への定性的評価およびその挙動への物理的解釈を与えることとし、定量的な数値の取り扱いは行わないこととした。

表 1 近年の竜巻数値流体計算の主要仕様

文献	解析体系	地表面境界条件	乱流モデル	解析手法	格子解像度	解析領域
Lewellen (2013)	複雑地形上実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE 型)	Lewellen(2007)と同じ (IB 法を付加)	5m 以下	2x2x2km
Natarajan and Hangan (2012)	実験スケール竜巻	不明 (ノンスリップ?)	LES (動的スマゴリンスキ型)	商用コード Fluent ベース (2 次精度中心差分 hexahedral grid)	不明 (セル数は 2.5e6)	実験サイズ (半径=0.4m)
Maruyama(2011)	実験スケール竜巻	ノンスリップ	LES (標準スマゴリンスキ型)	RIAM-COMPACT (Kajishima Sheme)	最大風速半径の 1/8	実験サイズ
Lewellen et al. (2008)	飛散物を含む実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE 型)	Lewellen(2007)と同様 (2 流体モデルを付加)	不明	不明
Lewellen and Lewellen (2007)	実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE 型)	2 次精度中心差分	不明	不明

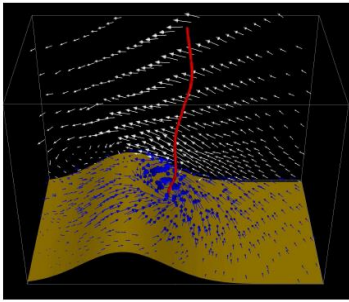
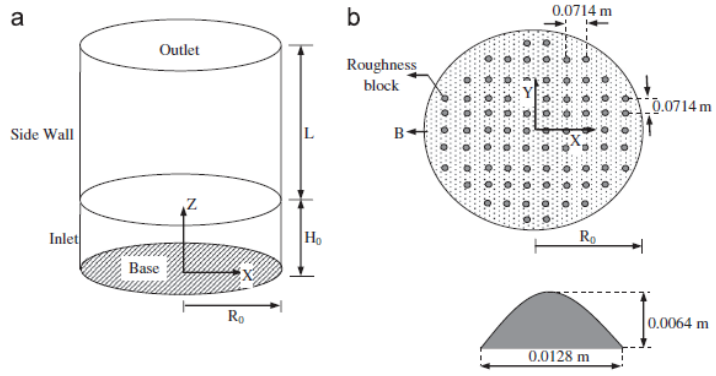


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation case is that of fig. 4.

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan

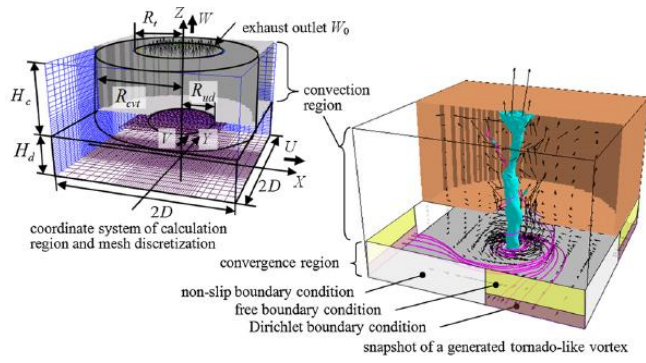


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(c) Maruyama (2011)

図1 近年の竜巻数値流体計算の解析モデル

地表面粗度について

1. 概要

本資料において、既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味および竜巻などの暴風時の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は、地表面の影響を受けるが、地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は 1-2 km に及ぶことが一般的で、その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく、「接地層」といわれる（竹内・近藤 1981）。

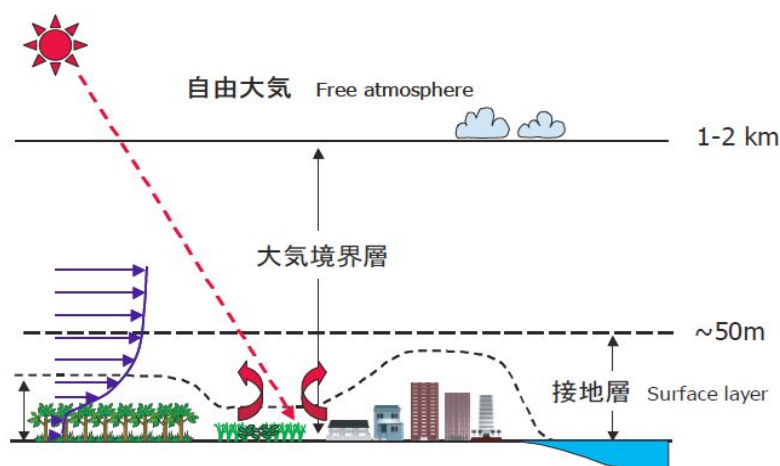


図 1 大気の鉛直構造の模式図

風速は、地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において、この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は、地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（塩谷 1992；近藤 2000）。

接地層内の風速 U は、地表面からの高さ z に対して、粗度長 z_0 を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_0) \tag{1}$$

により整理される（ここで、 c は係数）。

3. 粗度長の値

粗度長の値は、既往の研究において、様々な地表面状態に対して示されている。そこで

得られている概略値を以下に示す。

地表面	粗度長 [m]
水 (広くて静かな面)	$10^{-6} - 10^{-5}$
砂・砂漠	0.0003
土	0.001 - 0.01
草 (草丈 0.02 - 0.1 m)	0.003 - 0.01
草 (草丈 0.25 - 1.0 m)	0.04 - 0.10
農地	0.04 - 0.20
果樹園	0.5 - 1.0
森林	1.0 - 6.0
大都市 (東京)	2.0

竹内・近藤 1981 より

地表面	粗度長 [m]
湖や海面	$10^{-3} - 10^{-5}$
水田	0.01 - 0.05
草 (草丈 0.1 m)	0.01 - 0.03
草 (草丈 1.0 m)	0.1 - 0.3
田園集落	0.2 - 0.5
森林	0.3 - 1.0
大都市	1 - 3

近藤 2000 より

粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することを確認できる

4. 粗度長を加味した風速の算定

この粗度長を考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷重設定）手順を日本建築学会が取りまとめている（日本建築学会 2004）。ここでは、地表面の状況に応じた粗度長の変化を 5 つの区分に分類して取り扱うことにしている。

粗度区分	評価地点および風上側地域の地表面の状況
I	海面または湖面のような、ほとんど障害物のない地域
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木、低層建築物などが散在している地域
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物（4 - 9 階）が散在している地域
IV	中層建築物（4 - 9 階）が主となる市街地
V	高層建築物（10 階以上）が密集する市街地

そして、式(1)の対数分布を近似するものとして、次式で示される分布とともに、各粗度

区分に対して式中のパラメータとして下表の値を提示している。

$$U(z) = c(z/z_G)^\alpha \quad (zb < z \leq z_G) \quad (2)$$

粗度区分	I	II	III	IV	V
z_b (m)	5	5	10	20	30
z_G (m)	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

地表面の凹凸が大きくなるほど、 z_b , z_G , α (べき指数) の値も大きくなる。
粗度区分 I-V に対して、式(2)から得られる風速の鉛直分布を図 2 に示す。

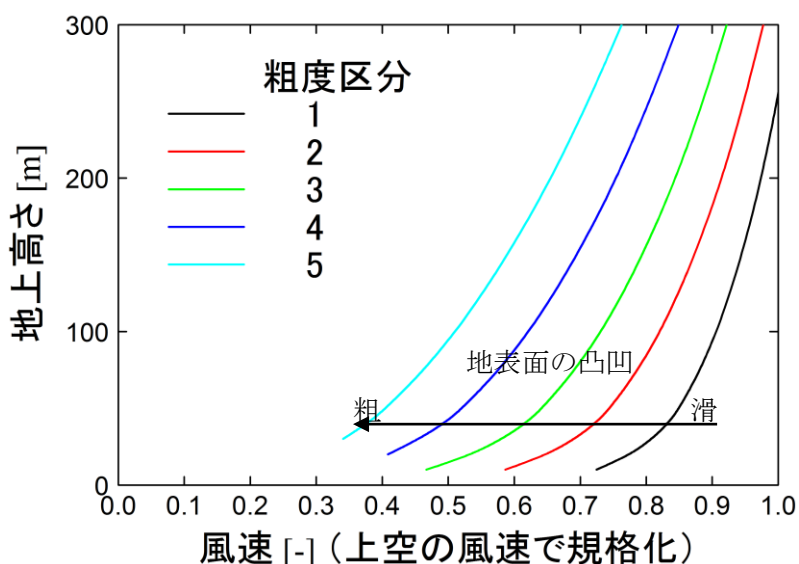


図 2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

ここで、地表面の凹凸による地表面近傍における風速の減速を議論するため、同一の上空風速 ($z = z_G$ の風速) に対する分布を提示している。すなわち、横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。地上に近づくにつれて・粗度区分が大きくなるにつれて、地表面近傍の風速が小さくなることを確認できる。例えば、地上高さ 10 m の風速は、粗度区分が I から II に変化することで 20% 程度低下し、III に変化することで 35% 程度低下する。

5. 竜巻の風速に対する粗度長の効果

4 章に示した風速の算定手順は、強風を対象としたものであり、地表面状態が森林など柔なものからビルなどの剛なものまでを包括して、地表面の凹凸が、強風の減衰をもたらすことを示唆するものである。

なお、竜巻は通常の強風と異なり、強い渦（旋回流）構造を有する。地表面粗度は、この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有する（例えば、Dessens 1972, Leslie 1977, Lewellen and Sheng 1979, Rostek and Snow 1985, Church 1993, Natarajan and Hangan 2012）。また、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させることも示唆されている（Lewellen et al. 2008）。

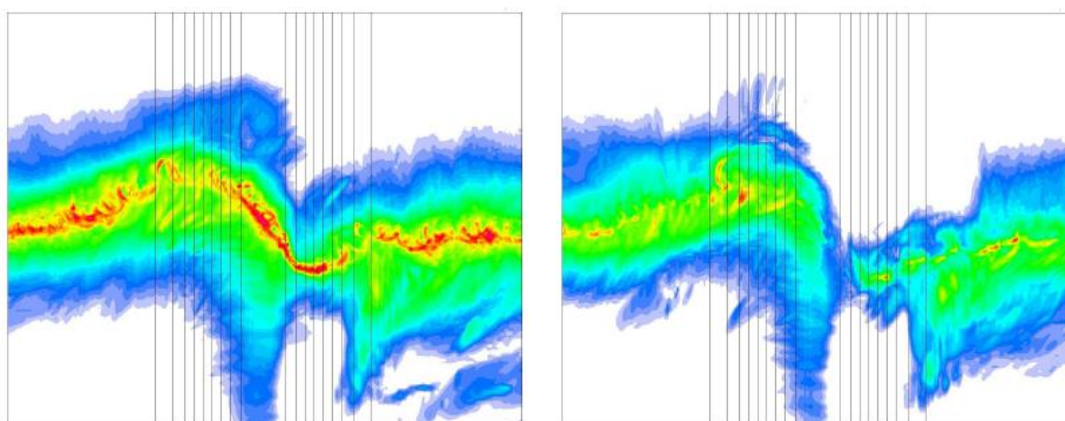
これらの知見から、表面の凹凸、すなわち地表面粗度、の増加とともに竜巻に起因する強風の風速が低下するといえる。

参考文献

- 近藤（2000） 地表面に近い大気の科学 324pp
塩谷（1992） 強風の性質 開発者 201pp
竹内・近藤（1981） 大気科学講座 1 地表に近い大気 東大出版 226pp
日本建築学会（2004） 建築物荷重指針・同解説 丸善 651pp
Church CR (1993) The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards. American Geophysics Union.
Hattori Y et al. (2010) Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. *Boundary-Layer Meteorol* 134, pp269-283.
Leslie F W (1997) Surface roughness effects on suction vortex formation. *J Atmos Sci* 34, pp.1022-1027.
Lewellen WS, Sheng YP (1979) Influence of surface conditions on tornado wind distribution. *Proc 11th Conf Severe local storms*, pp.375-378.
Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS (2008) Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *J Atmos Scipp*.3247-3262.
Natarajan D, Hangan H (2012) Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 104-106, pp.577-584.
Rostek WF, Snow JT (1985) Surface roughness effects on tornado like vortices. *Proc. 15th Conf Severe local storms*, pp.252-255.

別紙：地形と粗度との重畳について

ここでは、本資料で示した粗度による竜巻の減衰について、別資料で示した地形効果との重畳について言及する。地表面粗度と地形効果との重畳について、Lewellen (2012) により実施された LES が一つの知見を与えている。この LES では、高さ 100m の尾根を越える竜巻の減衰を 2 種類の地表面粗度 ($z_0 = 2 \text{ cm}$ と 20 cm) に対して調べている。それにより得られた最大風速のカラーコンタを以下に示す。



地表面粗度 $z_0=2\text{cm}$ の場合

地表面粗度 $z_0=20\text{cm}$ の場合

図 1 最大風速のカラーコンタ

地表面粗度の値によらず、地形の起伏に伴う竜巻進路は蛇行している。竜巻の移動に伴う、最大瞬間風速の値の強弱は、地表面粗度に伴い異なる挙動を呈するが、地表面粗度の増加は、最大風速の低下に寄与していることを確認できる。

この結果は、本資料が説明した地表面粗度による竜巻風速の減衰について、地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

参考文献：

Lewellen, D. C. (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B.1.

設計竜巻の特性値の設定

当社の竜巻影響評価においては、フジタの竜巻工学モデル DBT-77 (DBT: Design Basis Tornado) を適用していることから、設計竜巻の特性値を以下の通り設定する。

1. フジタモデル DBT-77 について

フジタモデルには、Fujita Work Book⁽¹⁾の 6 章に記載されているフジタモデル DBT-77 と 7 章に記載されているフジタモデル DBT-78 があり、フジタモデル DBT-77 は単一渦型のモデル、フジタモデル DBT-78 はフジタモデル DBT-77 で模擬した大きな竜巻の中に小さな吸込渦 (suction vortices) を加えた多重渦型のモデルである。(図 1)

米国 NRC ガイド⁽²⁾に記載されているフジタモデルは、「内側のコアと外側のコアの間にある環には、強い竜巻の吸引渦が形成され、親竜巻の中心の回りで回転する (In the annulus between the inner core radius and the outer core radius, suction vortices form in strong tornadoes and rotate around the center of the parent tornado)」とあるように、多重渦型のフジタモデル DBT-78 のことを述べている。

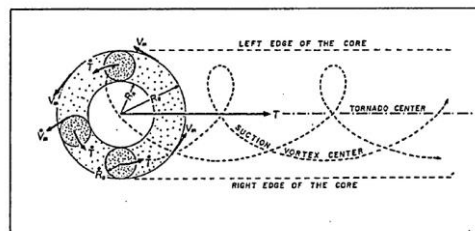


Figure 8.2 Fujita's latest model of multiple-vortex tornadoes for engineering applications. The design-basis tornado model in Chapter 6 developed in 1977 was identified as "DBT-77". Design-basis suction-vortex parameters in Chapter 7 were added to the DBT-77 in constructing this latest analytical model, to be identified as "DBT-78".

図 1 DBT-78 モデルの模式図⁽¹⁾

米国 NRC ガイドでは、フジタモデル DBT-78 中の小さな吸込渦は半径が小さく、圧力の時間変化率が半径に反比例して大きくなることを考慮して、同ガイドで採用したランキン渦モデルでも保守的に圧力の時間変化率が大きくなるように、改訂前 (2007 年以前) の同ガイドで採用されていた最大接線風速半径 45.7m を選択している。

また、米国ローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽³⁾では、「多重渦型のフジタモデル DBT-78 で考慮されている吸込渦はすぐに減衰することから、大多数の専門家は竜巻被災の重要因子ではないと考えている」と述べており、単一渦型のフジタ

モデル DBT-77 を飛来物評価の竜巻風速場として選定している。

フジタモデル DBT-78 モデルは、Fujita Work Book⁽¹⁾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、飛散解析に必要となる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報告書⁽⁴⁾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整合が取れなくなるといった点が挙げられる。

以上を踏まえ、当社の竜巻影響評価ではフジタモデル DBT-77 を適用している。DBT-77 モデルの入力パラメータは移動速度、最大接線風速及び最大接線風速半径であり、これらについて制限は Fujita Work Book⁽¹⁾では記載されておらず、特に制限はないものと考えられることを踏まえ、以下の通り設計竜巻の特性値を設定する。

(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T)

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて移動速度 (V_T) は、下記の式にて設定される。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \text{ (評価ガイドの 3.1 式)} \quad (1)$$

一方、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⁽⁴⁾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ことから、フジタモデルでも適用できる。

また、参考に、 $V_D=92\text{m/s}$ の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での移動速度を以下に示す。

表 1 設計竜巻の移動速度 (V_T) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
移動速度 (V_T)	14m/s	14m/s

(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm})

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大接線風速 (V_{Rm}) は、竜巻の最大風速から移動速度 (V_T) を引いた値として、下記の式にて設定される。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \text{ (評価ガイドの 3.2 式)} \quad (2)$$

一方、上記式は、風速場によらないのでフジタモデルでも適用できる。

また、参考に、 $V_D=92\text{m/s}$ の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での最大接線風速を以下に示す。

表 2 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm}) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大接線風速 (V_{Rm})	78m/s	78m/s

(3) 設計竜巻の最大接線風速半径 (R_m)

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大接線風速半径 (R_m) については、観測された被害幅を用いて推定している。

竜巻によって被害が生じる風速を V_0 とした場合、 R_m を超えた範囲では、風速 $V = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$ と表せるため、被害が生じる風速 V_0 と、被害幅 r_0 、及び最大接線風速 V_{Rm} が分かれば最大接線風速半径 R_m を得ることができる。(図2)

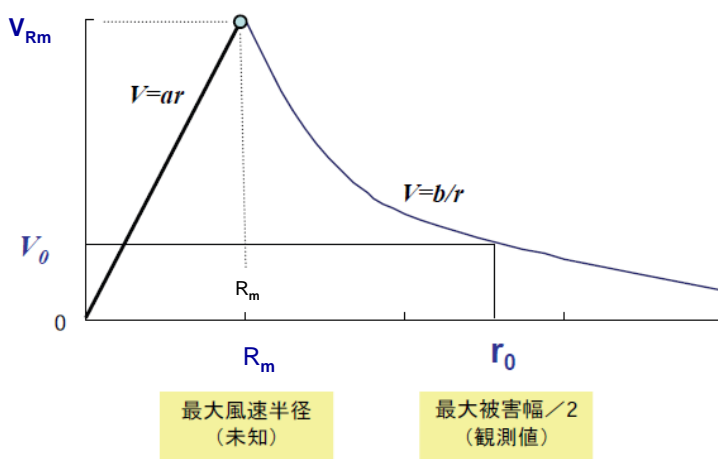


図2 竜巻半径と風速との関係

例えば、東京工芸大報告書⁽⁴⁾p.163の仮定2より、最大風速 $V_{Rm}=70\text{m/s}$ (F3 あるいは F3 に近い F2 竜巻)、被害幅 250m の 1/2 である $r_0 = 125\text{m}$ 、被害が生じる風速 $V_0 = 17\text{m/s}$ 、とするとこれを基に設定する最大接線風速半径 (R_m) は、下記の通り。

$$\begin{aligned}
 R_m &= r_0 \cdot V_0 / V_{Rm} \\
 R_m &= 125 \cdot 17 / 70 \\
 R_m &\doteq 30.36 \text{ (m)}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

一方、フジタモデルの水平風速 V は接線風速と径方向風速を合成したものであるので、外部コア半径の外側では水平風速 V は以下で与えられる。

$$\begin{aligned}
 V &= \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} \\
 &= F_r(r) F_h(z) V_m \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_0}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\text{ここで、 } F_r(r) = \frac{R_m}{r}, \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}
 \tag{5}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1 - z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}
 \tag{6}$$

フジタモデルでは、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、外部コア半径の内側では r に比例して風速が大きくなり、外部コア半径の外側では r に反比例して小さくなる点ではランキン渦モデルと同様である。(ランキン渦モデルと同様に、竜巻半径と風速の関係は図 2 の通りとなる)

また、接線風速 V が最大となるのは、流入層の上端 ($z=1$) であるが、このとき、 $F_h(z)=1$ 、 $\tan \alpha_0=0$ となるので、外部コア半径の外側ではランキン渦モデルと同様に $V=V_m R_m/r$ が成立する。

従って、被害幅から最大接線風速半径を推定する際に、ランキン渦モデルと同様に求めることができると考えられるため、本検討においてはガイドを参照して最大接線風速半径 $R_m = 30\text{m}$ を設定する。

また、参考に、 $V_D=92\text{m/s}$ の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での最大接線風速半径を以下に示す。

表 3 設計竜巻の最大接線風速半径 (R_m) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大接線風速半径 (R_m)	30m	30m

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

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大気圧低下量 (ΔP_{\max})・最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{\max}$) は、それぞれ ρV_m^2 、 $(V_T/R_m) \cdot \Delta P_{\max}$ と設定される。

一方、フジタモデルにおける設計竜巻の最大気圧低下量・最大気圧低下率については、速度分布が既知である場合、流れの連続式と運動量保存式から導出される以下の圧力ポアソン方程式を解くことにより、圧力を求めることができる。

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_3^2} \right) = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (7)$$

ここで、 x_i は座標 (x, y, z) を、 U_i および p は風速ベクトルおよび圧力を表す。また、 ν は動粘性係数を、 ρ は空気密度を表す。なお、添え字 i, j は 1 から 3 までの整数とする。

式(7)を解くために有限要素法 (計算方法の詳細は参考文献(5), (6)を参照) を用い、一辺 300m ($10R_m$) の立方体を解析領域として、この領域を 1 辺 100 個の有限要素に分割した。竜巻 (最大接線風速 $V_{tm}=78\text{m/s}$ 、半径 $R_m=30\text{m}$) の中心が解析領域の角部に位置するものとして、各節点に Fujita モデルの風速値を与えた。移動速度 V_{tr} は圧力分布には影響しないため、ここでの計算では $V_{tr}=0$ とした。

図 3 に Fujita モデルの圧力分布 (空気密度で除したもの) を示す。空気密度で除した最大圧力差は $5149.8\text{m}^2/\text{s}^2$ であるので、これに空気密度 $1.226\text{kg}/\text{m}^3$ を乗じて最大圧力差を求めた。ただし、この結果は一辺 300m ($10R_m$) の立方体を解析領域とした有限領

域での数値解析結果であるので、これを無限領域における最大気圧低下量とするために、さらに補正係数 1.0066 を乗じた (表 4)。なお、この補正係数 1.0066 は、ランキン渦に対する最大圧力差の有限領域での数値解析結果と無限領域での理論値の比から求めた。

図 4 に Fujita モデルの圧力 (空気密度で除したものの) の x -方向空間微分値を示す。 x -方向空間微分値 (絶対値) の最大値は $240.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり、最大気圧変化率はこの値に移動速度と空気密度を乗じることにより、式 (8) のように求められる。ただし、数値解析誤差を考慮するため、さらに補正係数 1.0096 を乗じて最大気圧低下率とした (表 5)。なお、この補正係数 1.0096 は、ランキン渦に対する最大気圧変化率の有限領域での数値解析結果と無限領域での理論値の比から求めた。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = V_{tr} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

また、参考として、図 5 に有限領域での数値解析より求めたランキン渦の圧力分布と圧力の x -方向空間微分値を示す (圧力は空気密度で除したもの)。

表 4 最大気圧低下量

最大風速	最大接線風速	空気密度で除した 最大圧力差	最大気圧低下量
92m/s	78m/s	$5149.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$	<u>6355Pa</u>

表 5 最大気圧低下率

最大風速	最大接線風速	移動速度	空気密度で除した 最大圧力低下率	最大気圧低下率
92m/s	78m/s	14m/s	$240.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$	<u>4163Pa/s</u>

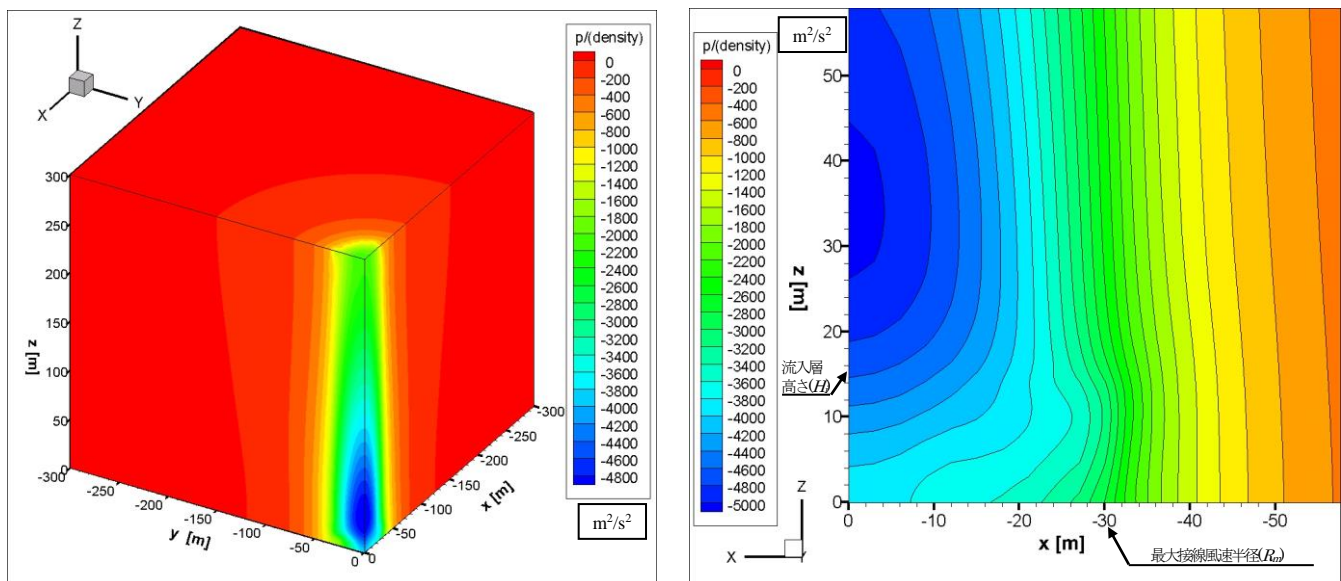


図 3 最大接線風速 $V_{tm}=78\text{m/s}$ における Fujita モデルの圧力分布 (左: 全体図, 右: y 方向からの拡大図, 圧力は空気密度で除したもの, 最大値 $92.83\text{m}^2/\text{s}^2$, 最小値 $-5056.99\text{m}^2/\text{s}^2$)

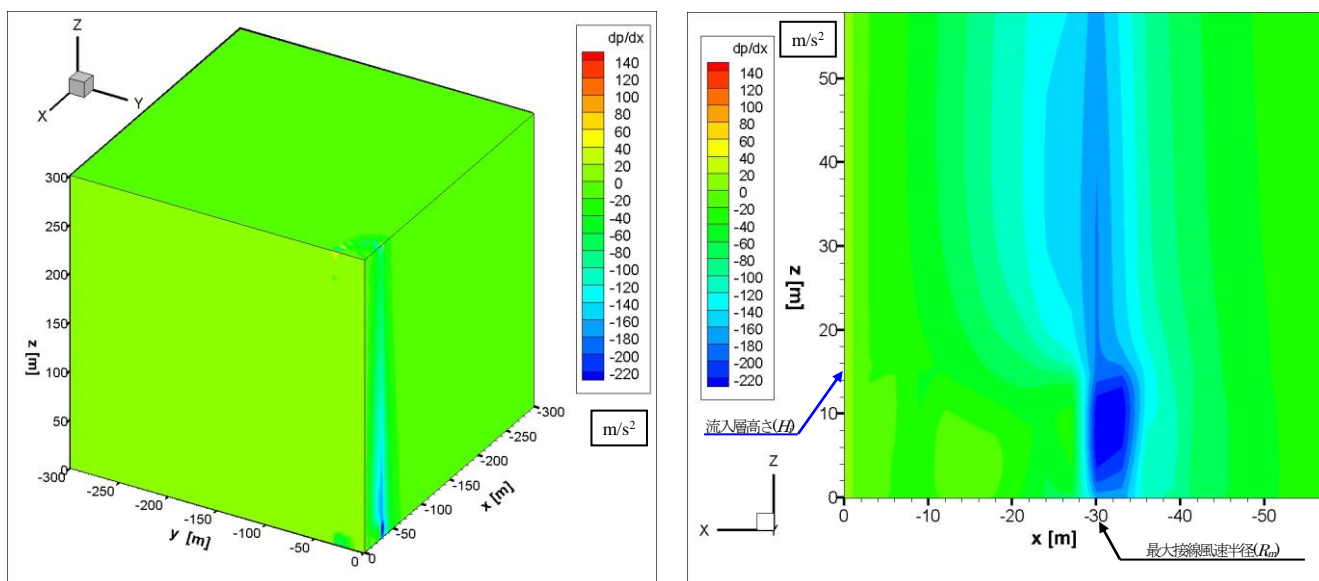


図4 最大接線風速 $V_{tm}=78\text{m/s}$ における Fujita モデルの圧力 (空気密度で除したもの) の x -方向空間微分値 (左: 全体図, 右: y 方向からの拡大図, 最大値 163.3m/s^2 , 最小値 -240.2m/s^2)

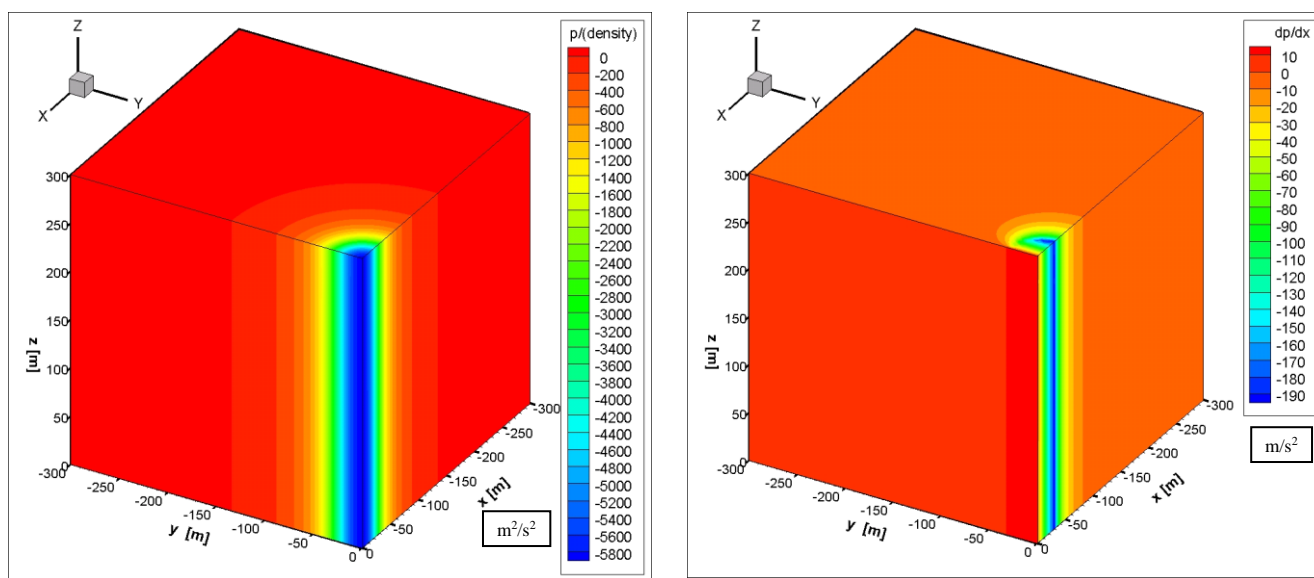


図5 最大接線風速 $V_{tm}=78\text{m/s}$ におけるランキン渦モデルの (左) 圧力分布と (右) 圧力の x -方向空間微分値 (本図は, 図3, 4 同様, 有限領域の数値解析により算出)

また, 参考に, $V_D=92\text{m/s}$ の際において, ガイドに基づき計算したランキン渦モデルの最大気圧低下量・最大気圧低下率と上記の数値解析により計算したフジタモデル DBT-77 の最大気圧低下量・最大気圧低下率を以下に示す。

表6 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{\max})・最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{\max}$) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大気圧低下量 (ΔP_{\max})	7459Pa	6355 Pa
最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{\max}$)	3481Pa/s	4163Pa/s

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で回転が弱まり竜巻の中心付近が低圧になりにくい(図3及び図5)。また、フジタモデルの流入層は、流体が竜巻中心方向に引き込まれることにより形成されることから、フジタモデルの最も低圧な領域は、竜巻中心において流入層高さの少し上の部分に存在し(図3右図)、同部分の圧力より求まる最大気圧低下量は、ランキン渦モデルの最大気圧低下量よりも小さくなる(表6)。

フジタモデルの圧力分布は複雑であり、上記の数値解析により求めている。そのため、フジタモデルにおける圧力の空間微分値は、局所的に大きな場所(外部コアと外周部の境界)が発生することから、最大気圧低下率がガイドの簡易な式で求めたランキン渦モデルの値より大きくなっている。

参考文献

- (1)Fujita, T. T., “Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications” (1978), U. Chicago.
- (2)U. S. Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants, Regulatory Guide 1.76, Revision 1 (2007).
- (3)Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999
- (4) 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.
- (5)Y. Eguchi, S. Sugimoto, H. Hattori and H. Hirakuchi, “Tornado Pressure Retrieval from Fujita’s Engineering Model, DBT-77”, Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (ICVFM Nagoya 2014), November 17 - 20, 2014, Nagoya, Japan.
- (6) 江口 譲, 服部康男, 流速場情報に基づく圧力場計算法の提案, 第 72 回ターボ機械協会 大分講演会(2014. 10. 3)

3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について

図 3.1.1 に竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況を示す。竜巻影響評価については、その不確実性を踏まえて、各ステップに対し保守性を考慮している。

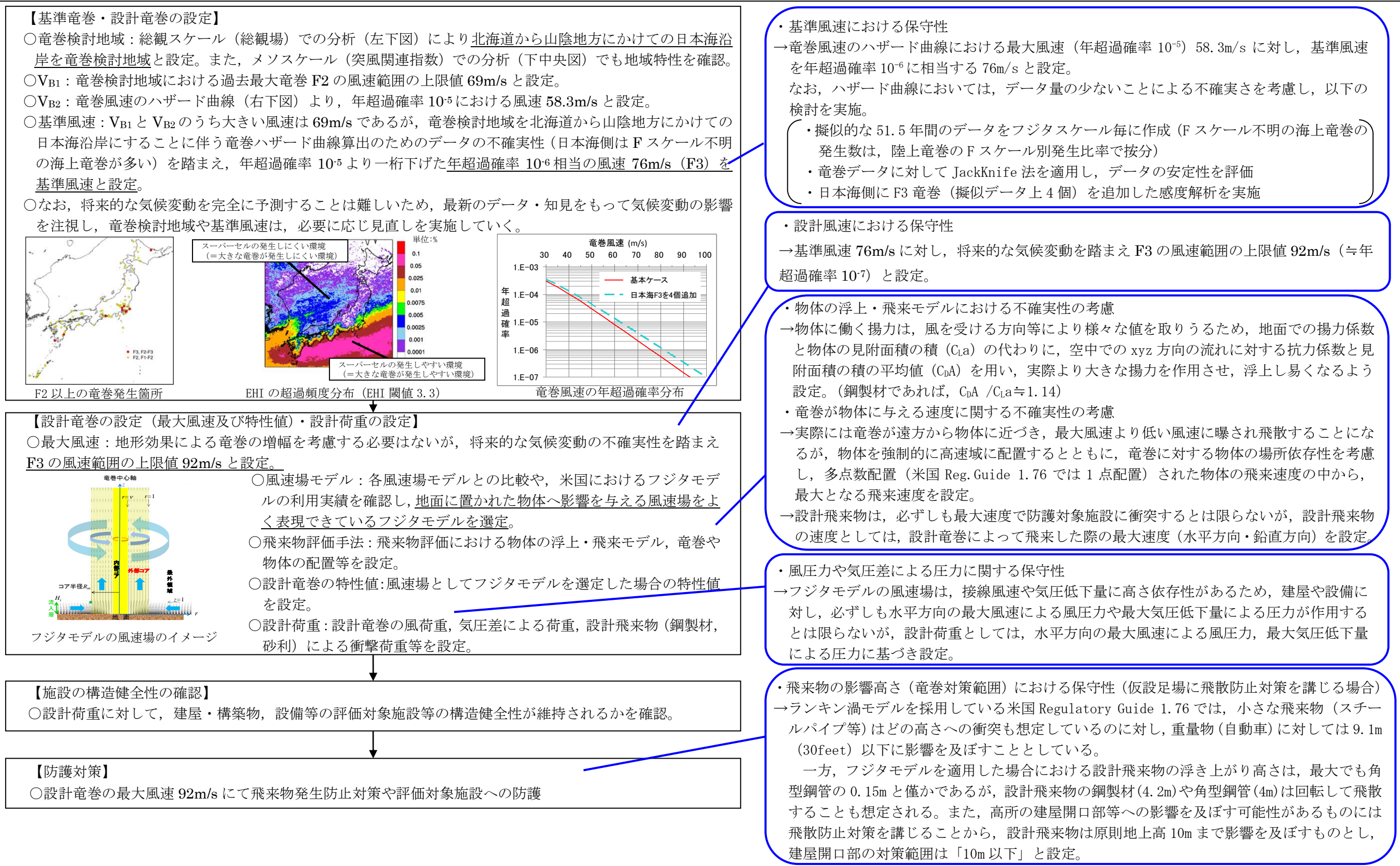


図 3.1.1 竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況

3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

【設計竜巻荷重，設計荷重の設定】

○竜巻影響評価ガイドに基づき，設計竜巻荷重は，設計竜巻の風圧力による荷重 (W_w)，気圧差による荷重 (W_p) 及び飛来物による (W_m) を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに，設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（竜巻以外の自然現象による荷重等）は，設計竜巻荷重に包絡される若しくは考慮すべき荷重ではないことを確認。

○ W_w ， W_p ， W_m は，設計竜巻の最大風速 $V_D=92m/s$ ，風速場モデルをフジタモデルとした場合の荷重を設定する。

【設計飛来物の選定】

○柏崎刈羽原子力発電所の飛来物に係る現地調査を行い，発電所構内の常設物（マンホール蓋等），仮設物（資機材等）及び二次飛来物（屋根等）の中から，それらの飛来物発生防止対策の可否，固定状況，過去の被害事例や代表性（運動エネルギー，貫通力等）を踏まえ，右図の通り設計飛来物を選定。但し，これらのうち飛散防止対策を講じるものは除く。



図 3.2.1.1 柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉の設計飛来物

【竜巻影響評価】

○設計荷重に対し，外部事象防護対象施設の構造安全性が維持され安全機能が維持されていることを確認。なお，仮設足場に飛散防止対策を講じた場合，設計飛来物（鋼製材，角型鋼管（大），砂利）の最大飛散高さは非常に僅か（図 3.2.1.1 より設計飛来物の最大飛散高さは，大きいものでも 0.15m）であるが，鋼製材（4.2m）や角型鋼管（4m）は回転して飛散することや米国 Reg.Guide1.76 にて飛散物（自動車）が 9.1m（30feet）以下に影響を及ぼすとしていることを踏まえ，設計飛来物は高さ 10m 迄影響を及ぼすものとして評価。仮設足場に飛散防止対策を講じない場合，設計飛来物（足場パイプ，鋼製足場板）の最大飛散高さは大きいことから，建物等のどの高さへの衝突も想定し評価。

<施設の評価>

○評価対象施設（原子炉建屋，タービン建屋（海水熱交換器区域），コントロール建屋，廃棄物処理建屋）の構造骨組評価，局部評価，設計飛来物の衝突に関する評価及び建屋外周部建具（扉等）に関する評価を実施し，内包する外部事象防護対象施設が影響を受けないことを確認し，外部事象防護対象施設に影響がある場合には，防護対策を実施。

○竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設（サービス建屋，5号炉タービン建屋，5号炉，6号炉及び7号炉主排気筒）の構造骨組評価を実施し，倒壊により外部事象防護対象施設が影響を受けないことを確認。なお，主排気筒は，設計飛来物の衝突により，仮に排気筒の機能が喪失した場合の平常時被ばく評価を実施し，敷地境界線量が線量目標値を超えないことも確認。

<設備の評価>

○評価対象施設（換気空調系，軽油タンク，非常用ディーゼル発電機燃料移送系，非常用ディーゼル発電機吸気系）に対する設計飛来物による貫通評価，設計荷重に対する強度評価を実施し，外部事象防護対象施設の構造健全性が維持されることを確認し，外部事象防護対象施設に影響がある場合には，防護対策を実施。

○竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設（非常用ディーゼル発電機排気消音器，ミスト管）は，設計飛来物が到達しないことから，設計荷重に対する強度評価を実施し，構造健全性が維持されることを確認。

【飛散防止対策】

○設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）より運動エネルギー及び貫通力が大きいものについては，設置場所等に応じ下記の通り固縛等を実施。なお，二次飛来物のうち，仮設足場，金属製屋根・外壁については，設計飛来物の影響に包絡されず，過去の被災事例からも飛散の可能性があることから，下記の飛散防止対策を実施する。（仮設足場には恒久的に飛散防止対策を講じる必要がないよう地上高 10m 以上の建屋開口部等に対しても防護対策を実施）

<資機材・車両>

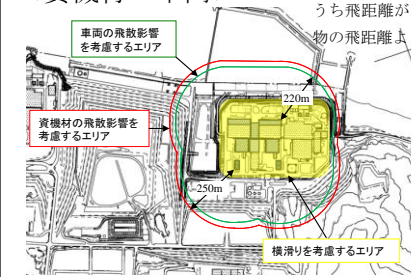


図 3.2.1.2 飛散影響・横滑りを考慮するエリア

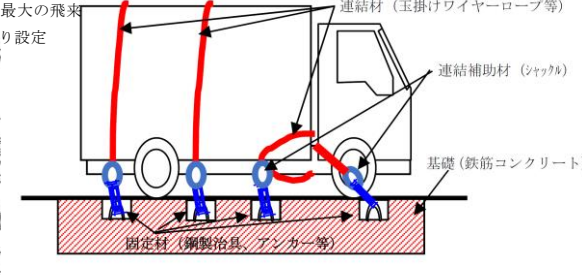


図 3.2.1.3 車両固縛のイメージ

- ・飛散影響・横滑りを考慮するエリア内に設置した資機材等（発電機，仮設小屋等）の飛散防止対策としては，移設，撤去又は浮き上がりや横滑りを考慮した固縛等を実施。
- ・エリア内の車両の飛散防止対策としては，移設，撤去，固縛に加え，作業中車両について竜巻発生確度ナウキャスト等を活用し即座に車両を移動できる体制を整え，エリア外への待避を実施。
- ・建屋近傍の SA 車両は飛散防止対策として，固縛等を実施。高台の SA 車両は，飛散影響エリア外に駐車し，竜巻防護施設に対し離隔距離があることから，飛散防止対策は実施しない。

<仮設足場>

- ・竜巻による風圧力により仮設足場の各部材が飛散しないよう，緊結等の適切な飛散防止対策を実施。

<金属製屋根・外壁>

- ・竜巻による風圧力や気圧差により破損することで竜巻防護施設への影響が考えられる屋根及び外壁に対し，ボルト増し打ちをすることで，屋根及び外壁の補強を実施。

【防護対策】

○設計飛来物によって損傷する可能性がある外部事象防護対象施設について，下記の通り防護対策を実施。影響評価同様，仮設足場に飛散防止対策を講じた場合，設計飛来物は高さ 10m 迄影響を及ぼすものとして，原則高さ 10m 以下を対策範囲と設定。仮設足場に飛散防止対策を講じない場合には，建物等のどの高さへの衝突も考慮し対策を実施。

<竜巻防護ネットによる防護>



図 3.2.1.4 竜巻防護ネットの設置イメージ

- ・設計飛来物から防護対象設備を守るため，防護対象設備近傍にある建屋開口部の空調ルーバ等へ鉄板又は竜巻防護ネットを設置。
- ・竜巻防護ネットは設計飛来物の運動エネルギーを吸収可能な設計にするとともに，小径の飛来物*のすり抜けを防止する設計とする。
- ※：防護ネットをすり抜ける可能性があるため設計飛来物として選定した砂利を除く。

<軽油タンク，燃料移送系の防護>

- ・軽油タンクは，設計飛来物による貫通はしないが，更なる設計上の裕度を確保するため，鋼板肉厚を厚くしたタンクにリプレースを実施。
- ・燃料移送系（ポンプ，配管等）については，設計飛来物からの防護対策として防護板等を設置。

<鋼製扉による防護>

- ・設計飛来物の貫通により竜巻防護施設への影響が考えられる扉に対し，鋼製扉にリプレースを実施。
- ・鋼製扉は，設計飛来物の貫通力に耐える設計とする。

<格納容器圧力逃がし装置の防護>

- ・竜巻による損傷を考慮した場合でも，代替設備（代替循環冷却）により機能維持可能であるが，飛来物により機能喪失しないように防護対策を実施。

図 3.2.1 竜巻影響評価及び竜巻対策（防護対策，飛来物発生防止対策）の概要

3.3 設計飛来物の選定について

発電所構内における竜巻飛来物となり得る物品を網羅的に調査し、それらの中から代表性をもたせた設計飛来物を、図 3.3.1 のフローに基づき選定した。

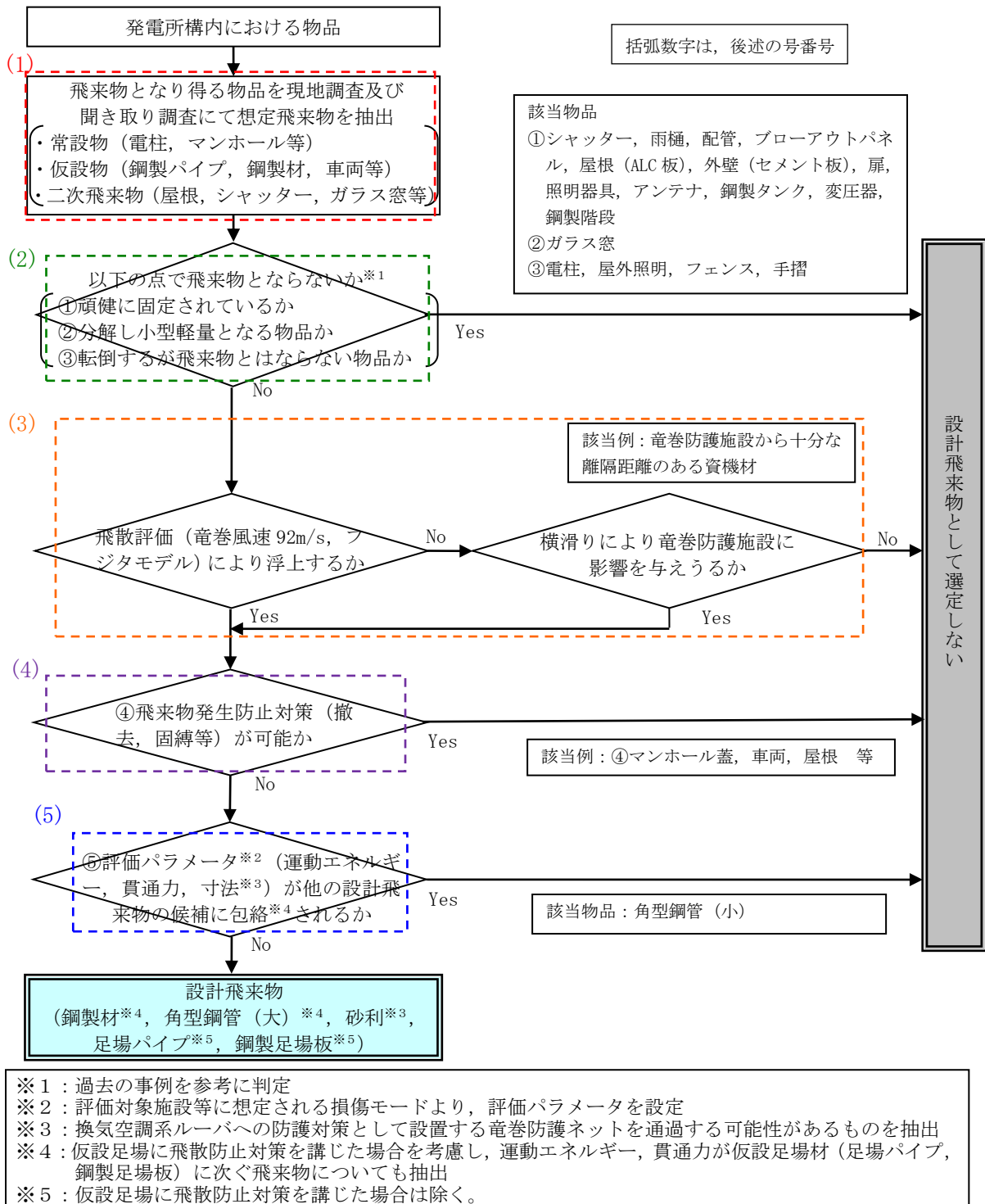


図 3.3.1 設計飛来物の選定フロー

(1)飛来物調査

柏崎刈羽原子力発電所における飛来物に関する現地調査は、平成 25 年 8 月 20 日、8 月 27 日、9 月 12 日、平成 27 年 3 月 13 日に実施した。調査では、常設物、仮設物のうち飛来物になり得る物品、及び二次飛来物（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）を抽出した。調査範囲は、米国 **Regulatory Guide** を参考にするとともに、後述の代表的な飛来物の飛散評価結果において、代表的な飛来物の飛散距離は最大でも 400m 程度であることを踏まえ、竜巻防護施設から半径 800m の範囲（図 3.3.2）とした。

また、持ち込み資機材等（夏場や冬場に屋外作業の準備等のために使用する休憩所（仮設小屋）や定期検査中に使用する仮設足場材等）の仮設物について、現地調査にて確認した結果の網羅性を高めることを目的に協力企業への聞き取りも実施し、現地調査で確認した飛来物源と大きな相違がないことを確認している。

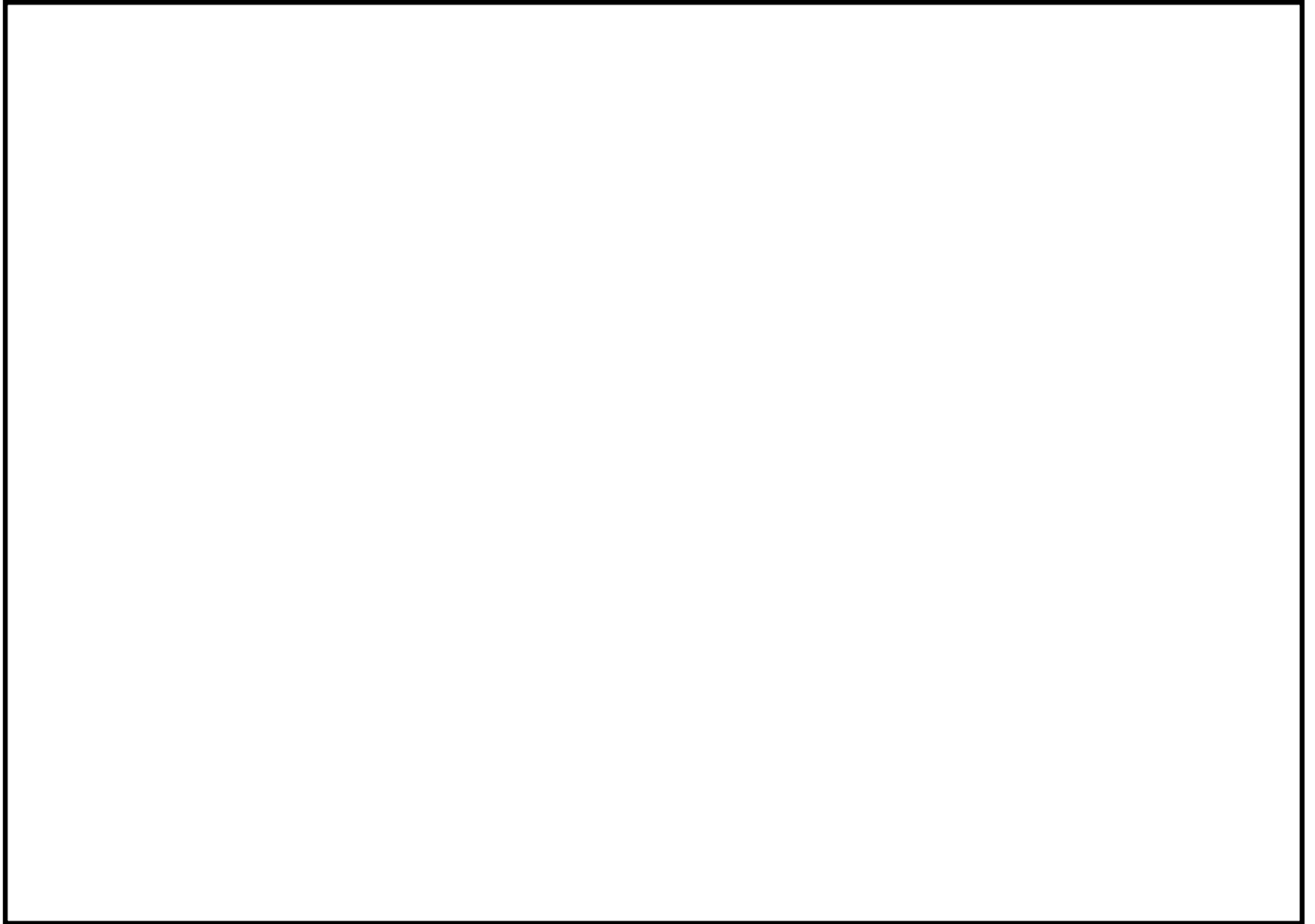


図 3.3.2 調査範囲及び区分

表 3.3.1 調査エリア区分

エリア番号	エリア名称
①	5～7号建屋周辺エリア
②	大湊側高台周辺エリア
③	中央土捨場エリア
④	第二企業センター棟周辺エリア
⑤	固体廃棄物貯蔵庫周辺エリア
⑥	敷地北側エリア
⑦	取水口・放水口周辺エリア

飛来物調査の結果として、次々頁より、柏崎刈羽原子力発電所において確認した飛来物源をエリア毎に示す。

また、表 3.3.2 に、飛来物調査の結果を踏まえ、飛来物の形状（棒状、板状、塊状）、サイズ（大、中、小）及び柔、剛などの特徴を踏まえ飛来物源を詳細に分類した結果を示す。

※1：柔（木製または中空状、複数の材からなる）、剛（コンクリートまたは鋼製で密実、単体からなる）

表 3.3.2 代表的な飛来物の抽出結果

		棒状			板状			塊状		
		大	中	小	大	中	小	大	中	小
常設物	剛	—	電柱	—	—	—	マンホール蓋	—	—	—
	柔	—	屋外照明	—	—	フェンス	—	変圧器	—	—
仮設物	剛	コンクリート柱	鉄骨 (カイト)鋼製材* 角型鋼管(小,大) 鋼材	(カイト)鋼製パイプ* 鋼製車止め ガスボンベ	トレーラー荷台	クレーンウェイト(2t,5t) (カイト)コンクリート板* コンクリート板 鋼矢板 鋼製架台 敷鉄板(薄,厚)	クレーンウェイト (250kg, 500kg) 鋼製看板	—	鋼製ボビン	コンクリートブロック 砂利
	柔	—	ドラム缶	—	—	—	—	乗用車 (カイト)トラック* トラック 消防車 電源車 代替原子炉補機冷却系 バス	ホイールローダ クレーン車 プレハブ小屋 仮設小屋 (カイト)コンテナボックス* 鋼製タンク フォークリフト	木製ボビン 軽乗用車 分電盤 発電機(大) 産廃コンテナ 自動販売機
二次飛来物	剛	—	配管 仮設足場パイプ(4m)	仮設足場パイプ(2m)	外壁 屋根材(ALC板) フローアウトパネル	扉 仮設足場板(鋼製) ガラス窓	—	鋼製階段	—	—
	柔	—	雨樋	—	屋根材(鋼板) シャッター	仮設足場板(アルミ) 手摺	—	—	—	照明器具 アンテナ

※：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び質量が記載されている物品

① 5～7号建屋周辺エリア（常設・仮設物）



①-1 仮設小屋



①-2 仮設小屋



①-3 発電機



①-4 鋼板



①-5 送水用配管蓋



①-6 仮設分電盤



①-7 敷鉄板



①-8 鋼製パイプ



①-9 仮設足場板



①-10 配電盤



①-11 仮設小屋



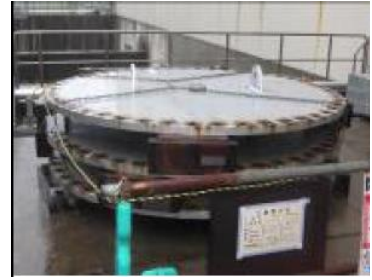
①-12 鋼製材



①-13 空調室外機



①-14 消火器箱 (小), (大)



①-15 鋼製ボビン



①-16 マンホール蓋



①-17 マンホール蓋



①-18 グレーチング



①-19 ホース格納箱



①-20 分電盤



①-21 チェッカープレート



①-22 乗用車



①-23 鋼製架台



①-24 FRP タンク
(FRP=繊維強化プラスチック)



①-25 カラーコーン



①-26 消火器



①-27 仮設小屋



①-28 角型鋼管 (小), (大)



①-29 鋼製蓋



①-30 鉄骨



①-31 鋼製タンク



①-32 工事看板



①-33 工事看板



①-34 鉄骨



①-35 チェッカープレート



①-36 変圧器



①-37 変圧器



①-38 常設代替交流電源設備
(ガスタービン発電機)



①-39 軽自動車

(二次飛来物)



①-1 仮設足場



①-2 仮設足場



①-3 外壁



①-4 屋根(ポリカーボネート)



①-5 屋根



①-6 屋根



①-7 猿梯子



①-8 シャッター



①-9 庇, 猿梯子, 扉



①-10 屋根



①-11 窓ガラス



①-12 屋根 (ガラス)



①-13 シャッター
(大物搬入口)



①-14 屋根



①-15 ガラリ



①-16 屋根, シャッター



①-17 アンテナ



①-18 配管



①-19 ブローアウトパネル



①-20 扉, 換気フード,
猿梯子



①-21 拡声器



①-22 外壁



①-23 シャッター, 配管



①-24 換気フード



①-25 配管



①-26 屋根



①-27 階段



①-28 階段



①-29 アンテナ



①-30 猿梯子



①-31 配管



①-32 扉, 手摺

②大湊側高台周辺エリア（常設・仮設物）



②-1 コンクリート柱



②-2 発電機



②-3 発電機



②-4 木製ポビン



②-5 鋼製ポビン



②-6 カーブミラー



②-7 木板



②-8 ホイールローダ



②-9 可搬型代替注水ポンプ
(消防車)



②-10 可搬型代替交流電源設備
(電源車)



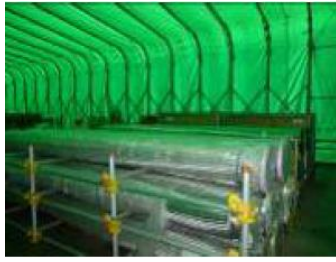
②-11 分電盤



②-12 木材



②-13 鋼製ボビン



②-14 ホース



②-15 ホース



②-16 金属容器



②-17 鋼矢板



②-18 鋼製コンテナ



②-19 プレハブ小屋



②-20 プレハブ小屋



②-21 自動販売機



②-22 鋼製倉庫



②-23 大容量送水車



②-24 泡原液配送車



②-25 放水砲



②-26 代替原子炉捕機冷却系



②-27 タンクローリー (大)



②-28 タンクローリー (小)



②-29 放射能観測車



②-30 クレーン車

(二次飛来物)



②-1 シャッター



②-2 屋根



②-3 扉



②-4 排気フード

③中央土捨場エリア（常設・仮設物）



③-1 チェッカープレート



③-2 鋼製車止め
(単管バリケード)



③-3 仮設分電盤



③-4 消火器



③-5 クッションドラム



③-6 グレーチング



③-7 コンクリート板（排水溝蓋）



③-8 グレーチング



③-9 鋼製フェンス



③-10 消火栓蓋



③-11 チェッカープレート



③-12 鋼製フェンス



③-13 移動式投光器
(バルーンライト)



③-14 建設重機
(バックホー)



③-15 敷鉄板



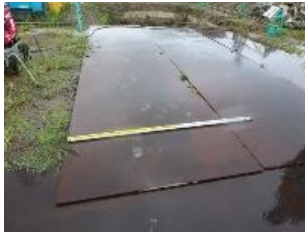
③-16 移動式投光器
(バルーンライト)



③-17 発電機



③-18 高圧洗浄機,
水タンク



③-19 敷鉄板



③-20 産廃コンテナ



③-21 プレハブ小屋



③-22 仮設小屋



③-23 プレハブ小屋



③-24 プレハブ小屋



③-25 梯子



③-26 自動販売機



③-27 プレハブ小屋



③-28 乗用車



③-29 道路標識



③-30 木材



③-31 カーブミラー



③-32 建設重機
(バックホー)



③-33 工事看板



③-34 敷鉄板



③-35 鋼製パイプ



③-36 鉄塊



③-37 フレックス管



③-38 トラック



③-39 マンホール蓋



③-40 分電盤



③-41 仮設足場板



③-42 仮設足場枠組材



③-43 木材



③-44 テント



③-45 信号機



③-46 仮設トイレ



③-47 コンクリートブロック



③-48 ベンチ



③-49 ドラム缶

(二次飛来物)



③-1 窓ガラス



③-2 階段, 窓ガラス, 扉

④第二企業センター棟周辺エリア（常設・仮設物）



④-1 マンホール蓋



④-2 グレーチング



④-3 コンクリート板
(排水溝蓋)



④-4 土のう袋



④-5 分電盤



④-6 屋外照明



④-7 乗用車



④-8 道路標識



④-9 配電盤



④-10 フェンス（単管柵）



④-11 アンテナ



④-12 砂利



④-13 鋼製車止め



④-14 空調室外機



④-15 チェッカープレート



④-16 排水溝蓋



④-17 消火器箱 (小)



④-18 コンクリートブロック



④-19 クレーンウェイト



④-20 FRP タンク
(FRP=繊維強化プラスチック)



④-21 制御盤



④-22 乗用車



④-23 鋼製看板



④-24 コンクリートブロック



④-25 鋼管



④-26 プレハブ小屋



④-27 ステップ



④-28 自動販売機



④-29 コンクリートブロック



④-30 仮設鉄骨



④-31 木製ボビン



④-32 トラック



④-33 バス



④-34 角型鋼管



④-35 産廃コンテナ



④-36 産廃コンテナ



④-37 屋外照明



④-38 鋼製架台



④-39 アミコンテナ



④-40 鋼製フェンス



④-41 鋼製車止め
(単管バリケード)



④-42 木材



④-43 H鋼



④-44 鋼製パイプ



④-45 砂利



④-46 産廃コンテナ



④-47 自動販売機



④-48 オイル缶



④-49 ガスボンベ



④-50 仮設小屋



④-51 乗用車



④-52 角型鋼管



④-53 アミコンテナ



④-54 プレハブ車庫



④-55 鋼製フェンス



④-56 マンホール蓋



④-57 鋼製フェンス



④-58 流し台



④-59 トレーラー



④-60 トレーラー荷台

(二次飛来物)



④-1 屋根, 外壁



④-2 窓ガラス



④-3 シャッター



④-4 雨樋



④-5 拡声器



④-6 配管



④-7 拡声器, 換気フード



④-8 シャッター



④-9 照明器具



④-10 屋根, 外壁



④-11 窓ガラス



④-12 窓ガラス



④-13 照明器具



④-14 ガラリ



④-15 猿梯子



④-16 煙突



④-17 拡声器



④-18 拡声器



④-19 庇



④-20 換気フード



④-21 扉



④-22 換気フード



④-23 扉



④-24 屋根, 外壁



④-25 屋根

⑤固体廃棄物貯蔵庫周辺エリア（常設・仮設物）



⑤-1 トラック（ユック車）



⑤-2 モーター付き排気ファン



⑤-3 屋外照明



⑤-4 鋼製車止め
(単管バリケード)



⑤-5 コンクリート板



⑤-6 グレーチング



⑤-7 ガードレール



⑤-8 グレーチング



⑤-9 プレハブ小屋



⑤-10 鋼製フェンス



⑤-11 鋼板



⑤-12 防火標識



⑤-13 マンホール蓋



⑤-14 敷鉄板



⑤-15 制御盤



⑤-16 屋外照明



⑤-17 立て看板



⑤-18 コンテナボックス



⑤-19 コンテナボックス



⑤-20 鋼製ボビン

(二次飛来物)



⑤-1 配管



⑤-2 シャッター, 窓ガラス



⑤-3 換気フード



⑤-4 排気フード



⑤-5 シャッター



⑤-6 配管, 雨樋



⑤-7 シャッター, 扉



⑤-8 猿梯子



⑤-9 鋼製階段



⑤-10 排気フード



⑤-11 屋根, 壁



⑤-12 窓ガラス, 屋根



⑤-13 屋根, シャッター

⑥敷地北側エリア（常設・仮設物）



⑥-1 電源盤



⑥-2 マンホール蓋



⑥-3 鋼鉄看板



⑥-4 カラーコーン



⑥-5 立ち馬（馬脚立）



⑥-6 クッションドラム



⑥-7 敷鉄板



⑥-8 鋼製車止め
(単管バリケード)



⑥-9 土のう袋



⑥-10 トラック
(ユニック車)



⑥-11 乗用車



⑥-12 仮設小屋



⑥-13 空調室外機



⑥-14 コンクリートブロック



⑥-15 マンホール蓋



⑥-16 グレーチング



⑥-17 屋外照明



⑥-18 消火器箱(大)



⑥-19 樹木



⑥-20 避雷器収納箱



⑥-21 工事看板



⑥-22 空調室外機



⑥-23 チェッカープレート



⑥-24 消火器箱(小)



⑥-25 電話箱



⑥-26 カラーコーン



⑥-27 空調室外機



⑥-28 車止めポール



⑥-29 乗用車



⑥-30 木製ボビン



⑥-31 電柱



⑥-32 鋼材



⑥-33 鋼管



⑥-34 トラック



⑥-35 フォークリフト



⑥-36 乗用車



⑥-37 鋼製看板



⑥-38 コンクリート板

(二次飛来物)



⑥-1 扉, ガラリ

⑦取水口・放水口周辺エリア（常設・仮設物）



⑦-1 グレーチング



⑦-2 マンホール蓋



⑦-3 カラーコーン



⑦-4 空調室外機



⑦-5 排水溝蓋



⑦-6 鋼材



⑦-7 鋼管



⑦-8 コンクリート板



⑦-9 発電機



⑦-10 一輪車



⑦-11 仮設小屋



⑦-12 乗用車



⑦-13 脚立



⑦-14 配電盤



⑦-15 砂利



⑦-16 テント



⑦-17 敷鉄板



⑦-18 鋼製車止め
(単管バリケード)



⑦-19 工事看板



⑦-20 鋼製看板



⑦-21 屋外照明



⑦-22 マンホール蓋



⑦-23 カラーコーン



⑦-24 鋼製ネット



⑦-25 フレックス管



⑦-26 木材



⑦-27 廃材コンテナ



⑦-28 消火器箱 (大)



⑦-29 台車



⑦-30 仮設足場板

(二次飛来物)



⑦-1 扉



⑦-2 扉

(2)固定状況等を踏まえた抽出

(1)で抽出した結果を踏まえ、過去の被害事例等（別紙1）を参考に、以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を設計飛来物候補として抽出した。（表 3.3.3）

- ①溶接やボルトにより頑健に固定されているか
- ②分解し小型軽量となる物品か
- ③竜巻の影響により転倒はするが、飛来物とはならない物品か

(3)代表的な飛来物の飛散評価

(2)で抽出をした代表的な飛来物に対し、設計竜巻の最大風速 92m/s、風速場モデルとしてフジタモデルを適用した場合における飛散評価を実施し、浮上する物品を抽出した結果を表 3.3.3 に示す。飛来物の初期高さは、プラントウォークダウンにて確認した飛来物の設置場所と竜巻防護施設との高低差を踏まえ設定した。但し、仮設物のように設置場所の特定が困難な物品については、竜巻防護施設に到達する可能性のある初期高さのうち、最大の高さを飛来物の初期高さとして設定した。（別紙2）

そのため、飛来物の飛散距離については、上記で設定した飛来物の初期高さから竜巻防護施設の高さまでに飛散した距離を設定した。（例えば、初期高さ 30m における飛散評価であれば、初期高さ 30m から 0m 迄の飛散距離となる）

また、飛来物の速度については、ガイドに基づき、飛散評価により求まる飛散した際の最大水平速度及び最大鉛直速度を設定した。

なお、浮上しないが横滑りにより竜巻防護施設に影響を与えうる物品については、浮上する物品同様、(4)以降の結果を踏まえ設計飛来物として選定する必要があるかを確認する。

(4)飛来物発生防止対策の可否を踏まえた抽出

(3)で抽出した結果を踏まえ、固縛、撤去等の飛来物発生防止対策が可能かどうかを考慮し、設計飛来物の候補を抽出した。（表 3.3.3 右端欄参照）

(5)評価パラメータの代表性の確認

(4)で抽出した結果に対し、竜巻及び飛来物により想定される評価対象施設の損傷モードより設定した評価パラメータ（運動エネルギー、貫通力、寸法）が、最大となる物品を（寸法については最小）、設計飛来物として選定する。（表 3.3.3 黄色箇所参照）

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (1/6)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [cm]		鋼板の貫通限界厚さ ^{※3} [mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか ^{※4} (4) 飛来物発生防止対策(撤去, 固縛等)が可能か (5) 他の飛来物に包絡されるか	
													水平	鉛直	水平	鉛直			
													t _{p,h}	t _{p,v}	T _h	T _v			
剛飛来物	棒状	(ガイド) 鋼製パイプ ^{※1}	2	0.05	0.05	8.4	0.0058	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4) 浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		鋼製車止め	1.3	0.217	0.217	90	0.0018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4) 浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		ガスボンベ	1.515	0.232	0.232	95	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×		
		鉄骨	2	0.34	0.25	156	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×		
		(ガイド) 鋼製材 ^{※1}	4.2	0.3	0.2	135	0.0066	10	7	6	3	9	0.08	6	4	4	2	○	設計飛来物に選定する。
		角型鋼管 (小)	4	0.06	0.06	12	0.0169	15	7	2	0.23	19	0.13	5	2	5	2	○	(5) 角型鋼管 (大) に包絡されることから、設計飛来物として選定しない。
		角型鋼管 (大)	4	0.1	0.1	28	0.0118	16	7	4	0.55	20	0.15	6	3	6	2	○	設計飛来物に選定する。
		鋼材	6	0.3	0.3	558	0.0027	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4) 浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		コンクリート柱	12	0.252	0.252	900	0.0017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4) 浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。

※1: 竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2: 修正 NDRC 式及び, Degen 式を用いて算出

※3: 発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4: 評価対象施設に想定される損傷モードにより, 評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (2/6)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [cm]		鋼板の貫通限界厚さ ^{※3} [mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか ^{※4} (4) 飛来物発生防止対策 (撤去, 固縛等) が可能か (5) 他の飛来物に包絡されるか	
													水平	鉛直	水平	鉛直			
													t _{p,h}	t _{p,v}	T _h	T _v			
剛飛来物	塊状	仮設分電盤	1	0.2	1.5	60	0.0223	59	21	103	13	232	17	12	5	4	1	○	(4) 固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから, 設計飛来物として選定しない。
		コンクリートブロック	0.65	0.65	0.65	660	0.0013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4) 浮上しないが, 竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		鋼製ボビン	2.6	2.6	1.6	900	0.0101	46	23	938	227	180	5	20	11	3	2	○	(4) 固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから, 設計飛来物として選定しない。
		砂利	0.04	0.04	0.04	0.2	0.016	14	7	0.02	0.004	18	0.08	1	1	1	1	○	設計飛来物に選定する。

※1: 竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2: 修正 NDRC 式及び, Degen 式を用いて算出

※3: 発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4: 評価対象施設に想定される損傷モードにより, 評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (3/6)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量 [kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ [m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [cm]		鋼板の貫通限界厚さ ^{※3} [mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか ^{※4} (4)飛来物発生防止対策(撤去、固縛等)が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
													水平	鉛直	水平	鉛直		
													t _{p,h}	t _{p,v}	T _h	T _v		
剛飛来物 板状	鋼製看板	1.4	1	0.05	40	0.0246	20	7	8	0.78	28	0.16	6	3	2	1	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能ことから、設計飛来物として選定しない。
	マンホール蓋	0.65	0.65	0.05	54	0.0046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	軟鉄板(薄)	6	1.5	0.019	1334	0.0046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
	軟鉄板(厚)	6.1	1.53	0.03	2200	0.0029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	クレーンウエイト 5t	1.5	1.28	0.4	5000	0.0004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	クレーンウエイト 2t	1.5	1.1	0.22	2000	0.0007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	クレーンウエイト 250kg	1.1	0.9	0.07	250	0.0029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	(ガイド) コンクリート板 ^{※1}	1.5	1	0.15	540	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	クレーンウエイト 500kg	1.3	1.1	0.1	500	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	鋼矢板	2	2	0.2	960	0.0032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	鋼製架台	3.8	1.8	0.2	10670	0.0005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	コンクリート板	3.95	0.98	0.15	1400	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
	トレーラー荷台	9	2.5	0.25	4500	0.0036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正 NDRC 式及び、Degen 式を用いて算出

※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (4/6)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{※2} [cm]		鋼板の貫通限界厚さ ^{※3} [mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか ^{※4} (4)飛来物発生防止対策(撤去, 固縛等)が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか	
													水平	鉛直	水平	鉛直			
													t _{p,h}	t _{p,v}	T _h	T _v			
柔 飛 来 物	棒状	ドラム缶	1.3	0.8	0.8	40	0.0206	54	21	57	9	212	5	5	2	2	1	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから、設計飛来物として選定しない。
	塊状	発電機(小)	0.91	0.53	0.7	125	0.008	27	7	43	4	36	2	8	3	2	1	○	
		木製ボビン	2	2	1.2	305	0.0174	54	21	441	67	217	8	7	3	3	1	○	
		産廃コンテナ	2.915	1.6	0.925	650	0.0091	34	23	367	164	107	2	7	5	3	2	○	
		仮設小屋	5.81	2.34	2.45	1300	0.0173	57	22	2039	307	247	21	12	5	5	2	○	
		乗用車	4.9	1.88	1.87	2150	0.0068	39	24	1568	577	143	4	12	8	6	3	○	
		軽乗用車	3.395	1.475	1.625	800	0.0108	48	23	913	200	212	6	10	5	5	2	○	
		(ガイド)コンテナボックス ^{※1}	6	2.6	2.4	2300	0.0106	50	23	2795	591	220	12	14	7	6	2	○	
		フォークリフト	3.69	1.15	1.995	2500	0.0038	21	7	530	53	30	0.6	8	3	4	1	○	
		プレハブ小屋	5	5	3	4400	0.0084	47	24	4765	1201	204	11	15	9	6	3	○	
トラック	8.445	2.23	2.465	3790	0.008	46	24	3883	1025	188	7	17	10	8	4	○			

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正 NDRC 式及び、Degen 式を用いて算出

※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (5/6)

(常設・仮設物)

分類	名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ ^{**2} [cm]		鋼板の貫通限界厚さ ^{**3} [mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか ^{**4} (4)飛来物発生防止対策(撤去、固縛等)が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか	
													水平	鉛直	水平	鉛直			
													t _{p,h}	t _{p,v}	T _b	T _v			
柔 飛 来 物	塊 状	(ガイド)トラック ^{*1}	5	1.9	1.3	4750	0.0026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		電源車	6.88	2.2	3.04	7960	0.0036	25	24	2427	2211	87	2	14	13	5	5	○	
		消防車	7.11	2.28	2.74	9210	0.0031	17	24	1321	2561	53	0.27	11	14	4	6	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能ことから、設計飛来物として選定しない。
		バス	11.99	2.49	3.75	12100	0.0047	38	24	8647	3464	161	5	23	15	10	6	○	
		ホイールローダ	11.15	3.19	3.25	24000	0.0023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		代替原子炉捕機冷却系	15.1	2.49	1.565	35450	0.0013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		発電機(大)	4	1.8	1.4	4920	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		クレーン車	12.29	3	3.74	39635	0.0016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		自動販売機	0.73	1.83	1.36	365	0.0088	41	23	296	94	142	4	16	10	4	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能ことから、設計飛来物として選定しない。
		空調室外機	0.8	0.3	0.6	40	0.015	40	22	31	10	166	2	3	2	2	1	○	

※1：竜巻評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正 NDRC 式及び、Degen 式を用いて算出

※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果 (6/6)

(二次飛来物)

分類	名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ [m ² /kg]	最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ] (水平)	運動エネルギー [kJ] (鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ*1[m]	コンクリートの貫通 限界厚さ*2[cm]		鋼板の貫通 限界厚さ*3[mm]		浮き上り 無	以下の点で飛来物とならないか*4 (4)飛来物発生防止対策(撤去、固縛等)が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか	
													水平	鉛直	水平	鉛直			
													t _{p,h}	t _{p,v}	T _h	T _v			
剛飛来物	棒状	鋼製パイプ (足場用2m)	2	0.051	0.051	6	0.009	42	38	5	4	266	0.74+(152)	8	7	11	10	○	(5)鋼製パイプ(足場用4m)に包絡されることから、設計飛来物として選定しない。
		鋼製パイプ (足場用4m)	4	0.051	0.051	11	0.0089	42	38	10	8	265	0.65+(152)	11	10	17	15	○	設計飛来物として選定する。*6
	足場板 (鋼製)	4	0.25	0.04	14	0.0525	55	18	21	3	377	52+(152)	12	5	6	2	○	設計飛来物として選定する。*6	
柔飛来物	板状	足場板 (アルミ)	4	0.24	0.029	11	0.0683	54	16	15	2	399	57+(152)	5	2	5	1	○	(5)足場板(鋼製)に包絡されることから、設計飛来物として選定しない。
		屋根材 (5号機循環水ポンプ建屋: 鋼板) *5	13.18	0.519	0.2	90	0.0632	65	16	188	11	236	52+(22)	10	3	8	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから、設計飛来物として選定しない。
		外壁 (5号機循環水ポンプ建屋) *5	0.035	0.32	9.12	36	0.0578	69	16	85	5	271	59+(0)	10	3	13	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから、設計飛来物として選定しない。

※1: () 内の値は飛来物初期高さ (地面からの物品の高さ)

※2: 修正 NDRC 式及び Degen 式を用いて算出

※3: 発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4: 評価対象施設に想定される損傷モードにより、評価パラメータを設定

※5: 屋根、外壁は、竜巻防護施設に届き得る範囲のなかで飛散評価結果値が最大である5号機循環水ポンプ建屋を使用

※6: 仮設足場に飛散防止対策を講じた場合は除く。

(6)設計飛来物の選定結果






(1)～(5)より、柏崎刈羽原子力発電所における設計飛来物は、表 3.3.4 及び図 3.3.3 の通りとする。

仮設足場材（足場パイプ、鋼製足場板）については、設計飛来物候補の中で、足場パイプがコンクリートに対する貫通力（鉛直）及び鋼板に対する貫通力が最大であり、鋼製足場板が、運動エネルギー及びコンクリートに対する貫通力（水平）が最大であるが、仮設足場に飛散防止対策を講じた場合を考慮し、運動エネルギー、貫通力が仮設足場材（足場パイプ、鋼製足場板）に次ぐ飛来物についても抽出する。

仮設足場材（足場パイプ、鋼製足場板）に次ぐ飛来物として、鋼製材については、設計飛来物候補の中で、運動エネルギー、コンクリートに対する貫通力が最大であり、角型鋼管（大）については、鋼板に対する貫通力が最大である。

また、砂利については、換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があり、鋼製材、角型鋼管（大）、足場パイプ及び鋼製足場板にて包含できないことから、設計飛来物として選定する。

表 3.3.4 柏崎刈羽原子力発電所における設計飛来物選定結果

飛来物の種類	砂利	鋼製材	角型鋼管 (大)	足場パイプ	鋼製足場板
					
サイズ (m)	長さ×幅×奥行き 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行き 4×0.1×0.1	長さ×幅×奥行き 4×0.051×0.051	長さ×幅×奥行き 4×0.25×0.04
質量 (kg)	0.2	135	28	11	14
最大水平速度 (m/s)	14	10	16	42	55
最大鉛直速度 (m/s)	7	7	7	38	18
浮き上がり高さ (m)	0.08	0.08	0.15	0.65+(152) [*]	52+(152) [*]
飛散距離 (m)	18	9	20	265	377

※：() 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

なお、表 3.3.4 に示した鋼製材、角型鋼管 (大)、砂利、足場パイプ及び鋼製足場板の水平、鉛直速度については、竜巻風速場をフジタモデルとし飛来物の最大速度を求めた値を用いることとする。

分解され小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とならない物品等について

設計飛来物の選定フローにおいて、「分解し小型軽量となる物品」及び「倒壊するが飛来物とはならない物品」は設計飛来物として選定しないこととしている。これは、過去の主な竜巻の被害概要の調査結果から、分解され小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とならない物品について検討を行った結果より確認をしている。

以下に平成 2 年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った結果を示す。「分解し小型軽量となる物品」、「倒壊するが飛来物とはならない物品」は柏崎刈羽原子力発電所における調査結果を念頭に被害状況を示す。

(1) 分解し小型軽量となる物品（確認対象：屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場）

竜巻の被害概要調査結果において分解し小型軽量となる物品として、柏崎刈羽原子力発電所に設置の類似品として屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場を確認した。屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場の被害状況は以下のとおり。

a. 屋外屋根の被害状況

図 1～5 に屋外屋根の被害状況を示す。これらより、屋外屋根については、F0～F3 の被害状況において形を保ったままではなく、分解された状態で飛来していることが分かる。また、厚みが薄く、受風面積が大きいため風の影響を受けやすいことから形状が変形（柔飛来物）しており、剛飛来物に比べ、貫通等の影響が小さくはなるが、竜巻防護施設への影響が考えられる屋根については、飛散防止対策を実施する。



牛舎の屋根東方向，柱・トタン板は西方向に飛散している

図 1 平成 16 年 6 月 27 日佐賀県にて発生した F2 竜巻による野外屋根の被害状況⁽¹⁾



カーボード屋根の飛散及び骨組の損傷



カーボード屋根の破損



屋外トイレ屋根の損傷

図2 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生したF2竜巻による屋外屋根の被害状況⁽²⁾



折板の損傷



カーボードの被害

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

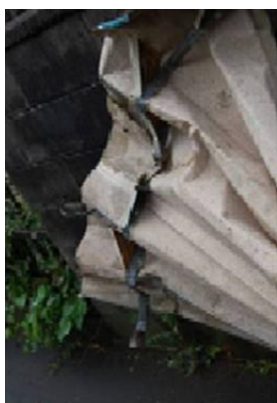


周囲の田に散乱した屋根ふき材

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



飛散した鋼板製屋根材



飛散した折板屋根の状況



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）

図5 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生したF3竜巻による屋外屋根の被害状況⁽⁵⁾

b. シャッター

図 6～10 にシャッターの被害状況を示す。これらより、シャッターについては、F1～F3, EF5 の竜巻において形状は変形しているが、固定部が外れていないことが確認できる。



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



シャッターの破損

図 7 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻によるシャッターの被害状況⁽³⁾



シャッターの外れ

図 8 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F1 (F2) 竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁷⁾



消防団施設のシャッターの被害状況

図9 平成24年5月6日茨城県つくば市にて発生したF3竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁵⁾



シャッターの被害

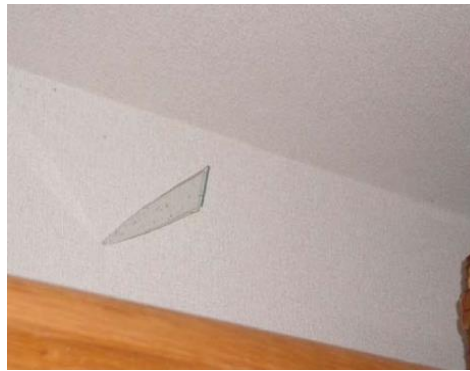
図10 平成25年9月2日埼玉県発生したF2竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁸⁾

c. ガラス窓

図 11～16 にはガラス窓の被害状況を示す。これらより、ガラス窓については、F0～F3、EF5 の竜巻において損壊し、分解されていることが確認できる。分解された状態では、小型軽量となっており、設計飛来物である鋼製材もしくは砂利等に包含されることが考えられる。



エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の屋内壁面への突き刺さり

図 11 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽²⁾



バスの窓ガラス破損

図 12 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した EF5 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁶⁾



窓ガラスの損壊



窓ガラスの飛来物衝突痕

図 13 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市での F1 (F2) 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁷⁾



エントランスのガラス破損



倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



窓ガラスの破損

図 14 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽³⁾



出雲市立第二中学校 提供

体育館窓ガラスの破損



(a) 教室



(b) 廊下



(c) 屋外に面した窓ガラス

本館 4 階の廊下と教室内のガラス破片の散乱状況

図 15 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市にて発生した F0 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁴⁾



店舗の窓ガラスの被害状況



ガラスへの飛来物の衝突痕

図 16 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F3 竜巻によるガラス窓の被害状況⁽⁵⁾

d. 仮設足場

図 17 には仮設足場の被害状況を示す。これらより、仮設足場については、F2 の竜巻において倒壊していることが確認できる。仮設足場材が飛散した場合を想定し、設計飛来物に選定する。但し、飛散防止対策を講じた場合を除く。



仮設足場の倒壊

図 17 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による仮設足場の被害状況⁽⁹⁾

(2) 柏崎刈羽原子力発電所の屋外屋根、シャッター、ガラス窓、仮設足場の状況

柏崎刈羽原子力発電所における屋外屋根の状況を図 18, シャッターの状況を図 19, ガラス窓の状況を図 20, 仮設足場の状況を図 21 に示す。柏崎刈羽原子力発電所におけるこれらの物品の構造については、上記の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になると考えられる。

そのため、上記の被害状況からこれらの物品については、飛散をしていないシャッターを除き、二次飛来物となる可能性がある。仮設足場材については、飛散を想定し、設計飛来物に選定する。但し、飛散防止対策を講じた場合を除く。また、設計飛来物に包含される（ガラス窓）若しくは設計飛来物に包含されない物品（屋外屋根）については飛散防止対策を実施する。

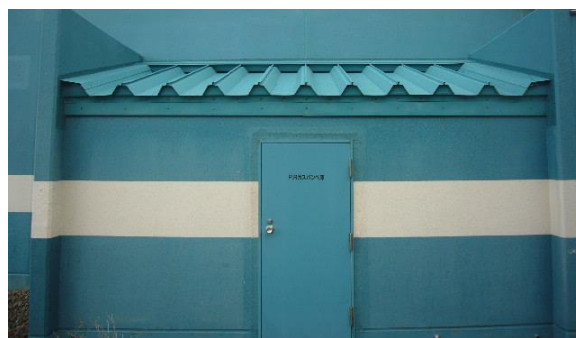


図 18 柏崎刈羽原子力発電所における屋外屋根の状況



図 19 柏崎刈羽原子力発電所におけるシャッターの状況



図 20 柏崎刈羽原子力発電所におけるガラス窓の状況



図 21 柏崎刈羽原子力発電所における仮設足場の状況

(3)倒壊するが飛来物とならない物品（確認対象：樹木，フェンス）

竜巻の被害概要調査結果において倒壊するが飛来物とならない物品で，柏崎刈羽原子力発電所に存在する類似品として樹木，フェンスを確認した。樹木，フェンスの被害状況は以下のとおり。

a. 樹木

図 22～28 には樹木の被害状況を示す。これらより，樹木については，F1～F3 及び EF5 の被害状況において幹の折損，根の引き抜き等が見られるが折れた場合，引き抜かれた場合どちらにおいてもその場で倒壊しているのみであることが確認できる。これは竜巻の風荷重により，樹木が損壊を受けたあと，竜巻がすでに通り過ぎているためであると考えられ，樹木が折損，引き抜かれた後，さらに竜巻により巻き上げられ，飛来物となることは考え難い。



倒木（南から見る）

倒れなかった樹木も点在している。



倒木（北西から見る）

図 22 平成 14 年 7 月 26 日群馬県境町で発生した F2 竜巻による樹木被害状況⁽¹⁰⁾



樹木の転倒



樹木の転倒（緑ヶ丘）

図 23 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による樹木被害状況⁽²⁾



樹木の折損

図 24 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州にて発生した EF5 竜巻による樹木被害状況⁽⁶⁾



倒木（火打谷地区）

図 25 平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市にて発生した F2 竜巻による樹木被害状況⁽¹¹⁾



倒木の被害

図 26 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻による樹木被害状況⁽³⁾



倒木の折損



倒木の折損と鳥居の被害



樹木の倒木



倒木による社の倒壊

図 27 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻による樹木被害状況⁽⁵⁾



樹木の倒壊



樹木の倒壊による小屋組の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害

図 28 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻による樹木被害状況⁽⁸⁾

b. フェンス

図 29～31 にはフェンスの被害状況を示す。これらよりフェンスについては、F1～F3 の被害状況において傾き、倒壊等が見られるが樹木と同様にその場で倒壊しているのみであり、倒壊した後、竜巻はすでに通り過ぎていていると考えられ、竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考え難い。



フェンスの著しい変形



フェンスの変形

図 29 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F1 (F2) 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁵⁾



フェンスの被害状況

図 30 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁷⁾



フェンスの倒壊



屋上フェンスの被害



フェンスの倒壊



支柱部の破断



フェンスの被害（工事中の建築物）



フェンスの被害

図 31 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁸⁾

(4) 柏崎刈羽原子力発電所の樹木、フェンスの状況

a. 樹木

柏崎刈羽原子力発電所における樹木の状況を図 32 に示す。上記にて示した被害にあった樹木と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり、幹の折損、根の引き抜きによりその場で倒壊すると考えられる。



図 32 柏崎刈羽原子力発電所における樹木の状況

b. フェンス

柏崎刈羽原子力発電所におけるフェンスの状況を図 33 に示す。上記にて示した被害にあったフェンスの構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり変形もしくは倒壊すると考えられる。



図 33 柏崎刈羽原子力発電所におけるフェンスの状況

以上より、樹木およびフェンスは、竜巻により倒壊するが、飛来しないことから、設計飛来物として選定しない。

参考文献

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

飛来物初期高さ（高台高さ）の設定

飛来物候補の飛散評価を実施する際に、飛来物の初期高さ（高台高さ）を設定する必要がある。飛来物の初期高さは、プラントウォークダウンにて確認した飛来物の設置場所と評価対象施設との高低差を踏まえ設定した。但し、仮設物のように設置場所の特定が困難な物品については、評価対象施設に到達する可能性のある初期高さのうち、最大の高さを飛来物の初期高さとして設定した。図 1 に設定した各飛来物の初期高さを示す。

なお、図 1 で記載した飛来物のうち、評価対象施設に到達する可能性があり、設計飛来物による影響に包絡されない飛来物（図 1 の灰色）については、竜巻防護施設との離隔をとる又は固縛等を実施する。（図 1 の黒字は、設計飛来物もしくは設計飛来物の影響に包絡される飛来物のため、固縛等を実施しない）

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

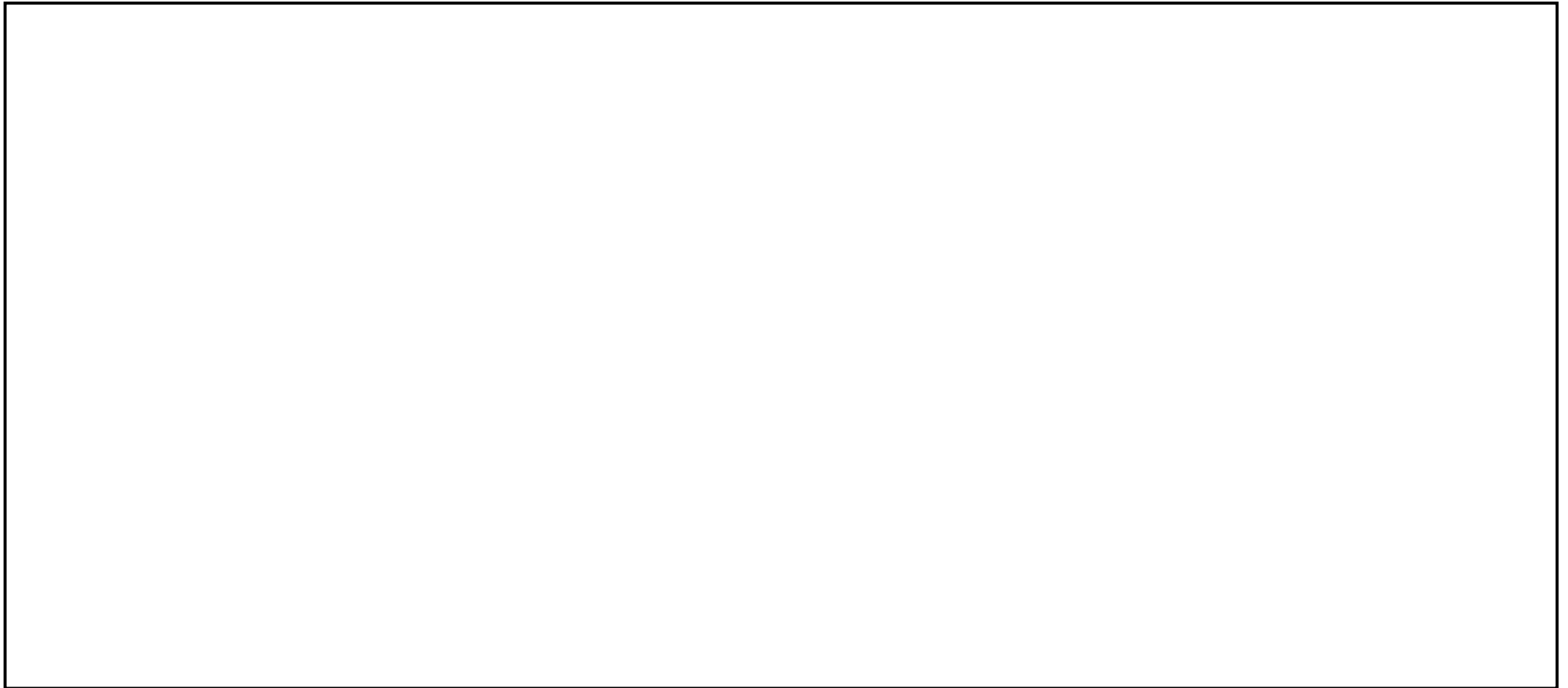


図 1 各代表飛来物の設置場所を踏まえた初期高さ

竜巻時に発生する雹の影響について

竜巻時は雹を伴うこともあるため、雹に関する文献を参考に雹の影響について検討を行った。

雹はあられが大きく成長したもので、直径 5mm 以上の氷の粒子である。雹の大きさは、通常は直径が 5～50mm である^{※1}。このことから、直径 50mm の雹を対象に影響評価を行う。なお、雹の大きさの変化に対する影響度を確認するため、比較対象として、参考文献^{※2}に記載の雹で最大である 10cm の雹にて評価を実施したとしても設計飛来物に包含されることも確認した。

空気中を落下する物体は空気抵抗を受けるので、時間が経てば空気抵抗と重力が釣り合い等速運動となり、一定の速度（終端速度）となる。空気中を落下する雹もこの終端速度で落下する。雹の粒径毎の終端速度を表 1 に示す。

表 1 雹の粒径毎の終端速度^{※2}

粒径 (cm)	終端速度 (m/s)
1	9
2	16
5	33
10	59

ここで、雹の影響を評価するため、運動エネルギー、貫通のしやすさを評価した結果を設計飛来物（鋼製材）と比較し表 2 に示す。雹の影響は設計飛来物（鋼製材）に包含できると言える。

表 2 粒径 5cm 及び 10cm 雹の影響評価

		粒径 5cm 雹	粒径 10cm 雹	設計飛来物（鋼製材）
運動エネルギー		0.04kJ	0.91 kJ	3 kJ
貫通限界厚さ （鉛直）	コンクリート Fc=330kgf/cm ²	0.8cm	2.7cm	4cm
	鋼板	0.2mm	0.7mm	2mm

※1 : 白木正規, 百万人の天気教室, 成山堂書局

※2 : 小倉義光, 一般気象学, 東京大学出版会

3.4 竜巻随件事象の抽出について

過去の竜巻被害を参考に竜巻の随件事象を検討し、柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置から考慮する必要がある事象として、火災、溢水及び外部電源喪失事象を抽出した。

(1) 過去の竜巻被害について

過去の竜巻被害について、1990年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。竜巻の被害の状況写真から日本国内での竜巻被害では、風圧力及び飛来物の衝突により発生している建築物、電柱及び電線等の損傷がみられ、竜巻の随件事象としては、電柱や電線の損傷による停電事象が発生している。(図 3.4.1, 3.4.2)



(建物の被害)



(ガラスへの飛来物衝突痕)



(電柱の折損、傾斜)

図 3.4.1 2012年茨城県常総市で発生したF3竜巻による被害状況⁽¹⁾



(電柱の折損，傾斜)



(建築物への飛来物の衝突痕)



(電柱，道路標識の折損)

図 3.4.2 2006年に北海道佐呂間町にて発生したF3竜巻による被害状況⁽²⁾⁽³⁾

(2) 柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置を参考にした竜巻随件事象について

(1)の過去の竜巻による被害状況から、柏崎刈羽原子力発電所においては送電線等が竜巻による被害を受けることにより、外部電源喪失事象の発生が考えられる。

さらに、柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置から、屋外に軽油タンク、水タンクが配備されていることから、飛来物の衝突により火災事象及び溢水事象が発生する可能性がある。(図 3.4.3)

以上から、竜巻随件事象として火災、溢水、外部電源喪失事象を抽出する。

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません



軽油タンク等	①	5号炉軽油タンク	軽油タンク等	⑩	7号炉主変圧器	
	②	5号炉所内変圧器		⑪	RIP-ASD 入力変圧器	
	③	5号炉励磁変圧器		⑫	第一ガスタービン発電機用燃料タンク	
	④	5号炉主変圧器		⑬	No.3 純粋タンク, No.4 純粋タンク	
	⑤	5号炉起動変圧器		⑭	No.3 ろ過水タンク, No.4 ろ過水タンク	
	⑥	6号炉所内変圧器		水タンク等	⑮	5号炉 NSD 収集タンク
	⑦	6号炉主変圧器			⑯	6/7号炉 NSD 収集タンク
	⑧	6号炉起動変圧器			⑰	6号炉苛性ソーダ貯槽, 6号炉硫酸貯槽
	⑨	7号炉所内変圧器			⑱	7号炉苛性ソーダ貯槽, 7号炉硫酸貯槽

図 3.4.3 柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置図

参考文献

- (1) 「平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害状況調査報告」(ISSN1346-7328 国総研資料 第 703 号 ISSN 0286-4630 建築研究資料 第 141 号 平成 25 年 1 月)
- (2) 2006 年佐呂間町竜巻被害調査報告(2006 年 11 月 21 日)
- (3) 佐呂間竜巻災害の記録－若佐地区－(平成 19 年 10 月 佐呂間町)