

伊方発電所における竜巻防護対策について

Tornado missiles protections taken at the Ikata NPP of SEPCO.

四国電力株式会社	池田 和豊	Kazutoyo Ikeda
四国電力株式会社	高木 敏光	Toshimitsu Takagi
四国電力株式会社	井上 晴久	Haruhisa Inoue
四国電力株式会社	吉田 尚生	Hisao Yoshida
四国電力株式会社	森内 雄大	Takehiro Moriuchi

On July 8, 2013, the new regulatory requirements for commercial power reactors got in force. Based on a concept of "Defense-in-depth", essential importance was placed on the third and fourth layers of defense and prevention of simultaneous loss of all safety functions due to common causes. In this regards, the previous assumptions on the impact of earthquakes, tsunamis and other external events such as volcanic eruptions, tornadoes and forest fires were re-evaluated, and countermeasures for nuclear safety against these external events were decided to be enhanced. For tornado, Nuclear Regulation Authority promulgated the "Assessment Guide for Tornado Effect on Nuclear Power Plants" to evaluate the effect of tornadoes.

This paper will introduce the outline of evaluation cases of tornado effect, and tornado missiles protections taken at the Ikata Unit3 Nuclear Power Plant (for actual case studies).

Keywords: Tornado Effect, Tornado Missile, Nuclear Regulation Authority, Nuclear Power Plant,

1. はじめに

原子力規制委員会の定める設置許可基準規則第6条に関連して、原子炉施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随件事象によって、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下、「ガイド」という。)等に基づき、竜巻影響評価を実施している。[1,2]

本評価のうち、伊方発電所3号機における竜巻防護対策(実機適用事例)について紹介する。[3-6]

2. 竜巻影響評価対象施設の抽出

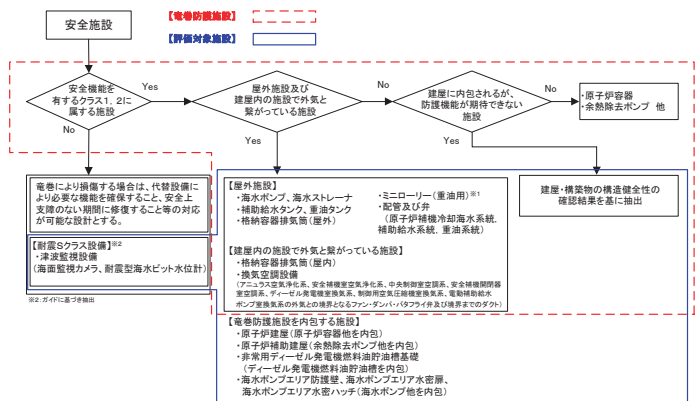
2.1 竜巻影響評価の対象施設

竜巻影響評価の対象施設については、「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」におけるクラス1及びクラス2に属する施設を竜巻防護施設とし、それらから図1に示すフローに基づき、下記の評価対象施設を抽出している。

- ・屋外施設
- ・建屋内の施設で外気と繋がっている施設
- ・竜巻防護施設を内包する施設
- ・建屋に内包されるが防護が期待できない施設

また、ガイドに基づき、耐震Sクラス施設についても、評価対象施設として抽出している。

具体的には、屋外施設として海水ポンプ、重油タンク、竜巻防護施設を内包する原子炉建屋などが抽出される。



2.2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設は、当該施設の破損により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせる可能性が否定できない施設であり、竜巻影響評価対象施設として抽出している。(図2参照)

- ・風荷重による倒壊により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

- ・竜巻防護施設を内包する区画の換気空調設備のうち外気との境界となるダンパ及び境界までのダクト
- ・吸排気管が屋外に設置されている竜巻防護施設の付属施設

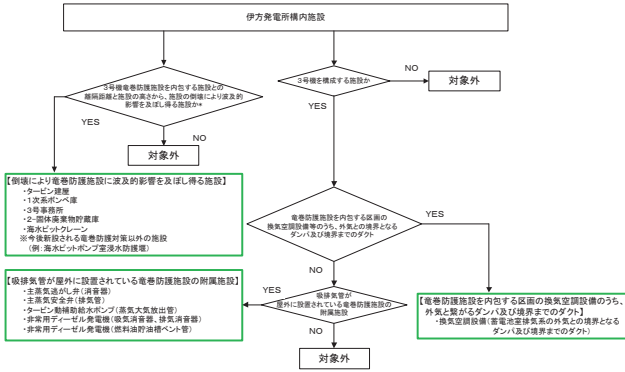


図2 波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

具体的には、倒壊により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、タービン建屋などが抽出される。

3. 基準竜巻・設計竜巻の設定

3.1 基準竜巻の設定

基準竜巻の設定について、最大風速 (V_B) は、①過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1}) と②竜巻最大風速のハザード曲線の最大風速 (V_{B2}) を比較し、大きい方の風速を設定している。

ここで過去に発生した竜巻は、竜巻強度の指標（藤田スケール）でF3であり、その風速の上限値の92m/sを過去最大の風速 (V_{B1}) としている。一方、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の設定について、気象庁の「竜巻等の突風データベース」から竜巻検討地域内における竜巻データを抽出し、図3に示すフローで策定したハザード曲線に基づき算定している。

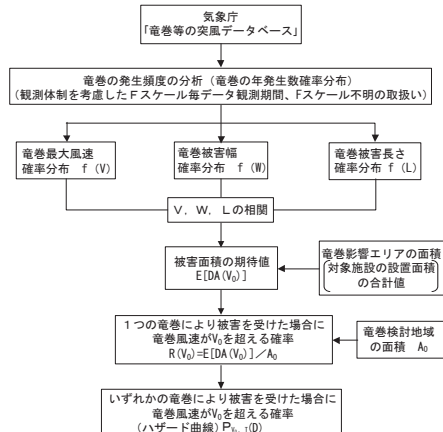


図3 竜巻最大風速のハザード曲線策定フロー

図4に示すように、伊方発電所では、竜巻検討地域で発生・侵入した竜巻最大風速の確率密度分布を基に、竜巻検討地域及び検討地域を1km範囲に細分化、竜巻発生数を変えずに竜巻検討地域の面積を1/10にした竜巻最大風速のハザード曲線を設定している。

最大風速 (V_{B2}) は、ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速として、竜巻検討地域の面積を1/10 (1km幅) にしたハザード曲線を採用し、83m/sとしている。

したがって、基準竜巻の最大風速 (V_B) は、 V_{B1} と V_{B2} を比較し、大きい方の92m/sとしている。

また、ハザード曲線から算定した基準竜巻の年超過確率は、約 3.4×10^{-6} /年となる。

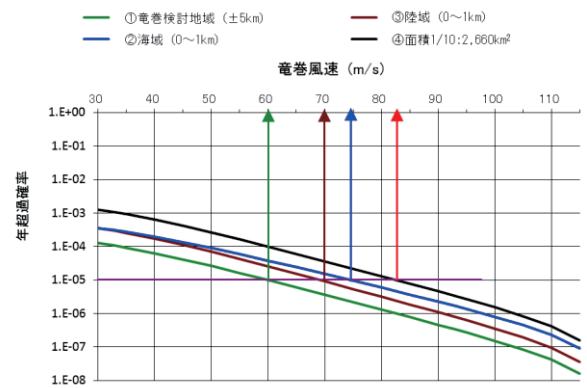


図4 竜巻最大風速のハザード曲線

3.2 設計竜巻の設定

設計竜巻の設定に際して、伊方発電所は敷地背後に急峻な傾斜地を持つ狭隘な地形に立地しているため、地形効果による風の増幅を評価した。(図5参照)

図6に示すように、いずれのケースにおいても風の増幅がないことを確認した。その結果、設計竜巻の最大風速は、基準竜巻の92m/sと設定される。

[地形効果による風の増幅の評価]

ケース①：海上から上陸して斜面を上がる

ケース②：海上から上陸して半島を乗り越え斜面を下る



ケース①

○ 発電所位置を示す

ケース②

図5 地形効果等による風の増幅効果（計算領域）

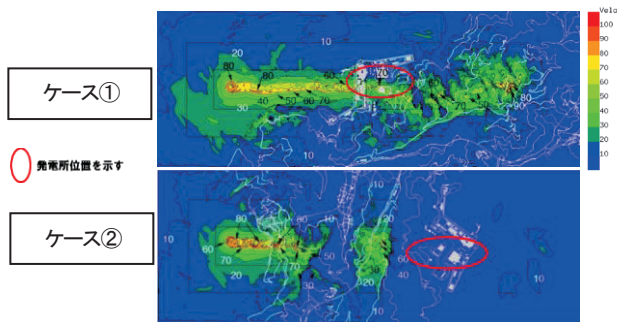


図6 数値流体計算結果

しかしながら、竜巻の観測数等のデータが少なく、不確実性があることから、基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げ、設計竜巻の最大風速は100m/sとしている。

設計竜巻の特性値を表1に示す。

表1 設計竜巻の特性値

最大風速 V _D (m/s)	移動速度 V _T (m/s)	最大接線風速 V _{Rm} (m/s)	最大接線風速 半径R _m (m)	最大気圧低下量 ΔP _{max} (hPa)	最大気圧低下率 (dp/dt) _{max} (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

4. 設計飛来物の設定

4.1 設計飛来物の設定

竜巻の特徴である設計飛来物の設定については、伊方発電所構内に存在する飛来物になり得る物品について現地調査を行い、図7に示す設計飛来物の選定フローに基づき、評価に使用する設計飛来物を設定している。

設計飛来物の選定においては、風荷重により浮き上がるか、また、固縛対策等により飛来物発生が防止できるかの2点が重要であり、選定の結果、伊方発電所では、①鋼製パイプ、②鋼製材、③乗用車の3つを設計飛来物としている。

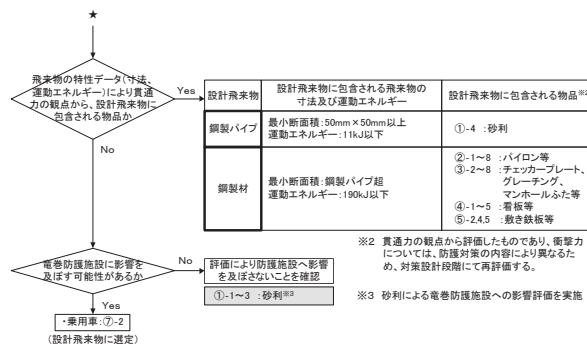
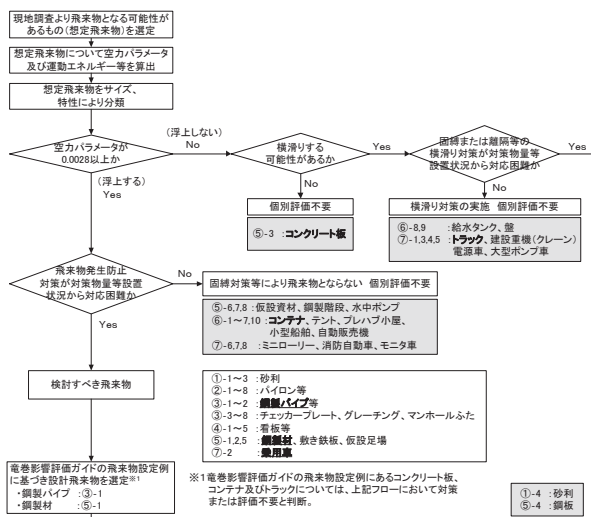


図7 設計飛来物の選定フロー

5. 設計荷重の設定

5.1 設計竜巻の風圧力による荷重 (W_w)

設計竜巻の最大風速 (V_D) による風圧力 (W_w) は、ガイドに従い算定している。

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

q: 設計用速度圧

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

G: ガスト影響係数(=1.0) ρ: 空気密度

C: 風力係数

V_D: 設計竜巻の最大風速

A: 施設の受圧面積

5.2 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内外の気圧差による荷重 (W_p)

設計竜巻による評価対象施設内外の気圧差による圧力は、ガイドに従い算定している。

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

ΔP_{max}: 最大気圧低下量

A: 施設の受圧面積

5.3 設計飛来物による衝撃荷重 (W_m)

表2に設計飛来物の諸元を示す。

乗用車は伊方発電所での飛来物調査結果を基に、質量を保守的に2,000kgと設定している。

設計飛来物が衝突した際の質量、加速度より衝撃荷重 (W_m) を算出している。

表2 伊方発電所における設計飛来物の諸元

飛来物の種類	鋼製パイプ		鋼製材		乗用車	
	長さ×直径	長さ×幅×奥行	長さ×幅×奥行	長さ×幅×奥行	質量(kg)	質量(kg)
サイズ(m)	2×0.05	4.2×0.3×0.2	4.2×0.3×0.2	4.6×1.6×1.4	8.4	2,000
本評価	最大水平速度 (m/s)	49	57	47		
	最大鉛直速度 (m/s)	33	38	32		
	運動エネルギー(水平) (kJ)	11※1	226※1	2,210		
	運動エネルギー(鉛直) (kJ)	5※2	98※2	1,024		

※1: ガイドの参考文献(3)に記載されている値。

※2: 最大鉛直速度より算出した値。

5.4 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設の評価に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻の風圧力による荷重 (Ww)、気圧差による荷重 (Wp) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (Wm) を組み合わせた複合荷重とし、ガイドに従い算定している。

$$W_{T1} = W_p$$

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

W_{T1}, W_{T2} : 設計竜巻による複合荷重

W_w : 設計竜巻の風圧力による荷重

W_p : 設計竜巻の気圧差による荷重

W_m : 設計飛来物による衝撃荷重

6. 竜巻防護対策の概要

竜巻防護対策は、設計飛来物が衝突した際の衝撃力に耐え、飛来物を竜巻防護施設に到達させないこと、または衝撃力を和らげることを目的としている。また、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設に対しては、防護対策により、竜巻防護施設に影響を及ぼさないようにすることを目的としている。

対策対象施設 (施設・区画) に対する竜巻防護対策は、対策対象施設の構造、強度及び設置場所、ならびに周囲の状況に応じて、防護金網、防護板、防護材及び構造物の補強等から、適切な対策を選択している。

竜巻防護対策の基本設計条件等を踏まえ、建屋躯体及び屋外土木構築物への影響確認も実施している。

表3に「竜巻防護施設ならびに竜巻防護施設の外郭となる施設」及び「竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設」に対する「竜巻防護対策」(概要)を示す。

なお、赤枠で囲っている竜巻防護対策 (海水ピットポンプ室、重油タンク) について、伊方発電所3号機の実機適用事例として、次章にて説明する。

表3 伊方発電所3号機 竜巻防護対策の概要

対策対象施設 (施設・区画)		防護対策概要
竜巻防護施設ならびに竜巻防護施設の外郭となる施設		
屋外構築物	海水ピットポンプ室	落石防護対策に使用されている防護金網及び防護板等を設置する。
	補助給水タンクエリア	落石防護対策に使用されている防護金網及び防護板等を設置する。
	重油タンク	衝撃吸収が可能な防護材 (アルミパイプ継ぎ材を内装) を設置する。
原子炉建屋 原子炉補助建屋	開口部 (扉・シャッター等)	防護板等を設置する。
竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設		
屋外構築物	海水ピットクレーン	クレーン転倒防止、トロリーの落下防止装置等を設置する。

7. 竜巻防護対策 (実機適用事例)

7.1 海水ピットポンプ室竜巻防護対策設備

海水ピットポンプ室に設置されている海水ポンプ等の防護対象設備は、地面を掘り込んだピット内に設置されていることから、海水ピットクレーンレールより内側の海水ピット開口部に防護板、防護金網等からなる竜巻防護対策設備を設置し、対象設備を防護する。

設計飛来物のうち、水平方向の飛来物は防護板及び鉄骨構造物で防護し、鉛直方向の飛来物は、ピット開口部にH形鋼などを用いた鉄骨構造物を設置し、それをすり抜けた飛来物は、下面に設置した高強度金網からなる防護金網で防護する。鉛直方向の飛来物のうち、乗用車は防護材 (H形鋼など)、鋼製材などは高強度金網 (2枚重ね) で捕捉する設計とし、金網の端部に飛来物が直接落下することを防止するため、端部落下防止用の防護材 (鋼板など) を設置している。

防護金網が設計飛来物を捕捉して撓んでも、防護対象設備及び火災感知器との離隔が確保でき、衝突しない設計としている。

防護金網は6分割構造とし、固定機構を解除後、1ブロック毎に海水ピットクレーンを用いて取り外し可能な設計としている。(図8 - 10 参照)



図8 海水ピットポンプ室 竜巻防護対策 (鳥瞰図)

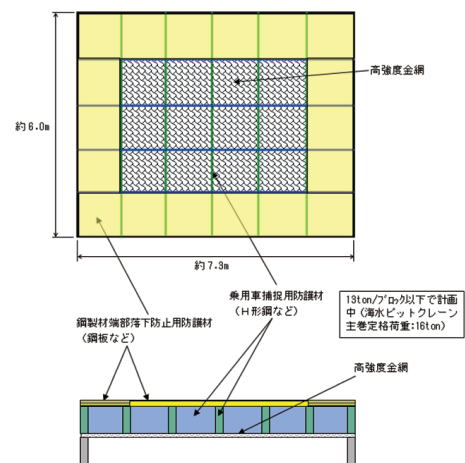


図9 海水ピットポンプ室 防護金網平面図

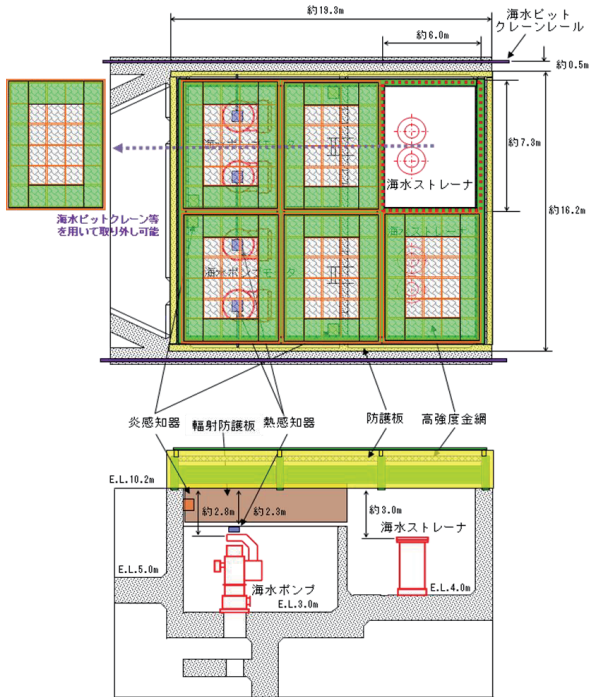


図10 海水ピットポンプ室 竜巻防護対策 (概要図)

7.2 重油タンク竜巻防護対策設備

重油タンクは、屋外 EL.84m エリアに設置されているため、タンク外面に竜巻による飛来物の衝撃荷重を吸収低減可能な防護材（衝撃吸収材）を設置している。防護材は、設計飛来物の衝突により変形しても、タンク本体に直接影響を及ぼさない設計としている。（図 11, 12 参照）

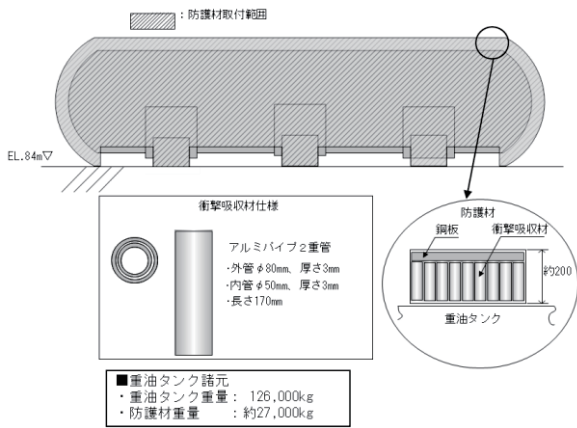


図11 重油タンク竜巻防護対策 (概要図)

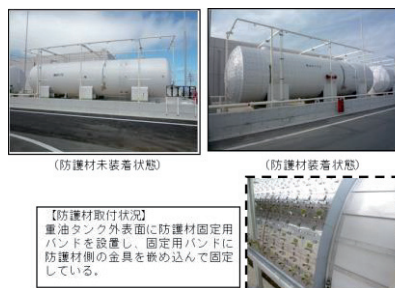


図12 防護材取付状況

「衝撃吸収材」として、アルミパイプが軸方向に座屈変形する際、衝突エネルギーを吸収できると考え、各種アルミパイプの圧縮試験を行い、最適な特性を持つ衝撃吸収材を選定し、実機に適用している。

図 13 に実機に適用した「衝撃吸収材」の単位要素試験結果を示す。試験過程において、オイラー座屈せずに、安定的に軸圧壊することを確認している。

なお、「衝撃吸収材」を複数本同時に圧縮した場合の挙動についても、試験装置の能力限界内（3本）で確認している。図 14 に複数本同時試験結果を示すが、試験過程において、3本ともオイラー座屈せずに、安定的に軸圧壊することを確認した。

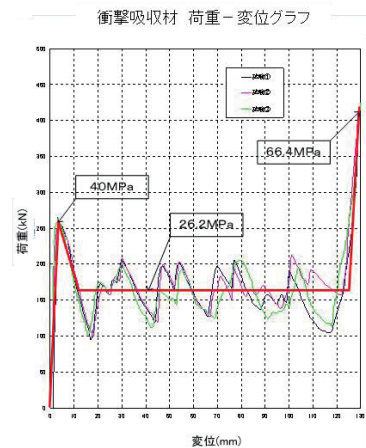
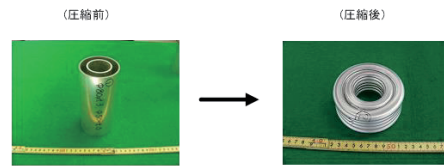


図13 衝撃吸収材剛性 (圧縮試験結果)

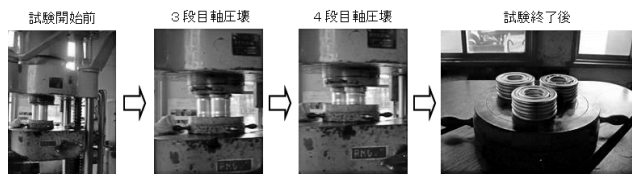


図14 複数本圧縮試験結果

単位要素試験結果で得られた衝撃吸収材剛性を用いて、設計飛来物に対する竜巻防護対策を考慮した強度評価を行った。

具体的には、図 15 に示すように、重油タンク及び防護材を2自由度の「バネ-質点系」でモデル化し、表 4 に示す衝突解析で算定された応答加速度に対する構造健全性の確認を行った。

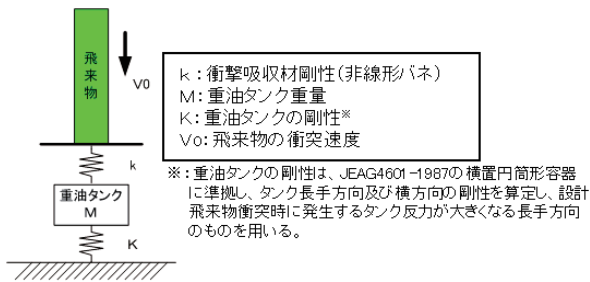


図15 バネ - 質点系モデル

表4 衝突荷重換算に用いる応答加速度

評価対象	重油タンク応答加速度(m/s ²)
鋼製材	16.396[1.68G]
乗用車	1.823[0.19G]

8. おわりに

東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、伊方発電所では、継続的に安全性・信頼性の向上に取り組んでいる。

今後とも、「原子力の安全性向上への取り組みに終わりは無い。」との強い思いのもと、原子力規制委員会が策定している新規制基準への対応にとどまらず、新たな知見が得られた場合には、迅速・前広に安全対策を検討・実施し、伊方発電所の更なる安全性・信頼性の向上に努めてまいりたい。

参考文献

- [1] “原子力発電所の竜巻影響評価ガイド”、原子力規制委員会、2013.6
- [2] “原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説”、JNES-RE-2013-9009、独立行政法人原子力安全基盤機構、2013.10
- [3] “伊方発電所3号炉 竜巻影響評価 説明資料”、第65回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、2013.12.27
- [4] “伊方発電所3号炉 竜巻影響評価 補足説明資料”、第65回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、2013.12.27
- [5] “伊方発電所3号炉 竜巻影響評価 外部火災 モニタリング設備 原子炉冷却材バウンダリ弁に関する設計上の考慮 [審査会合における指摘事項の回答]”、第75回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、2014.1.30、pp.1-19
- [6] “伊方発電所3号炉 竜巻影響評価 外部火災 モニタリング設備 原子炉冷却材バウンダリ弁に関する設計上の考慮 補足説明資料”、第75回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、2014.1.30、pp.1-0-1-54