

女川原子力発電所2号炉
火山影響評価について
(審査会合での指摘事項に対する回答)

平成31年3月
東北電力株式会社

【審査会合における指摘事項①】

降下火砕物の堆積による静的負荷に関し、降下火砕物と重畳させる積雪の荷重について、関連する基準要求を踏まえて、重畳の考え方を整理して提示すること。除灰の効果を期待する場合は、積雪下での除灰の実現性について、整理して提示すること

【回答①】

- 設置許可基準規則第6条のうち「外部事象の考慮」における荷重の組合せの考え方を踏まえて、降下火砕物による荷重を主荷重(最大値)とし、組み合わせる積雪荷重を従荷重(平均値)として設定した
- 設定した積雪荷重(平均値)は「石巻地域の年最大積雪深さの平均値」を適用することとした
- 降下火砕物による荷重と積雪による荷重の組合せにおいては、除灰の効果は期待しないものとする。積雪については適切に除雪を行い、雪を長期間堆積状態にしない方針とすることで、積雪荷重に対する設計裕度を確保する

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項①】(2/4)

1. 関連する基準要求に対する適合確認

設置許可基準規則第6条(外部からの衝撃による損傷の防止)のうち「外部事象の考慮」において、火山の影響(降下火砕物)と積雪を安全施設に影響を及ぼすおそれがある自然現象として抽出しており、荷重の組合せの要否の検討を実施している。具体的な荷重の組合せの考え方は以下のとおり

(1) 荷重の組合せの考え方

- 降下火砕物及び積雪による堆積荷重は、同時に発生する場合を考慮し、組み合わせることとしている
- 荷重の組合せは、「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(平均値)の和」で示されるTurkstraの法則※1に基づき設定しており、それぞれの荷重の考え方は表1のとおり

表1 組み合わせる荷重の考え方

組み合わせる荷重	荷重の特徴	荷重の種類
主たる作用(主事象)の最大値	発生頻度が相対的に低い荷重が大きい	降下火砕物による荷重
従たる作用(副事象)の任意時点の値(平均値)	発生頻度が相対的に高い荷重が小さい	積雪による荷重

降下火砕物の荷重に組み合わせる積雪荷重は従荷重として平均値を設定する

※1: 日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」や建築基準法, 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」, EN1990(ユーロコード), ASCE 7-02(米国土木学会), ANSI(米国国家規格協会), ISO等で採用されている荷重の組合せの考え方

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項①】(3/4)

(2) 従荷重として組み合わせる積雪荷重の設定方法

a. 確率過程的に平均値を求める場合

- 建築物荷重指針・同解説で引用しているTurkstraの法則に基づき、高橋※²が従荷重として組み合わせを考える際の積雪荷重の係数を求めている
- 高橋※²の論文によると、いつ襲来するか明らかでない荷重に対して考慮すべき積雪荷重係数について、積雪日数との関係性を検討しており、女川原子力発電所に近接する気象観測所である石巻の積雪日数(80日)において、積雪荷重係数は約0.05である(図1参照)
- 設計基準値の積雪量(43cm)に対して積雪荷重係数(0.05)を考慮した場合積雪荷重として組み合わせる積雪深さは約2.2cmと算出される

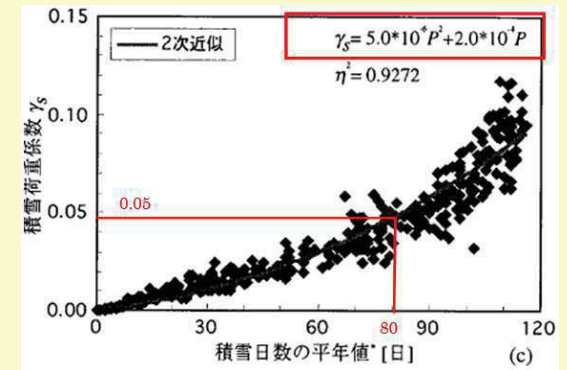


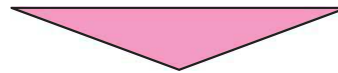
図1 積雪荷重が従となる場合に掛け合わせる荷重係数※²
(赤枠、赤字等は追記)

b. 建築基準法施行細則の考え方を準用して平均値を求める場合

- 発電所の立地は多雪地域ではないものの、先行プラントと同様に建築基準法施行細則の考え方を準用した場合には、従荷重として組み合わせる積雪荷重の係数は0.35である
- 設計基準値の積雪量(43cm)に対して積雪荷重係数(0.35)を考慮した場合には積雪荷重として組み合わせる積雪深さは約15.1cmと算出される

c. 観測記録により平均値を求める場合

- 積雪の平均値は気象庁の気象観測データ(年最大積雪深さ)から求めることが可能であることから、石巻地域の年最大積雪深さの平均値(観測期間1962年～2017年)について確認した結果約17.0cmとなる



- 最も大きな値となった「観測記録による平均値(17.0cm)」を従荷重として組み合わせる積雪荷重とする

※2: 高橋 徹: 積雪荷重の推移過程モデルに関する一考察(日本建築学会 構造工学論文集 Vol.44B(1998年3月))

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項①】（4／4）

2. その他の降下火砕物による荷重への考慮

- 降下火砕物に対して、同時期に想定される降雨や積雪によって、荷重が増大する可能性があることから、以下について考慮している

- 乾燥状態の降下火砕物の密度($0.7\text{g}/\text{cm}^3$)に対して、同時期に想定される降雨等による荷重影響として、湿潤状態の降下火砕物の密度($1.5\text{g}/\text{cm}^3$)を設定し、更に17cmの積雪荷重を組み合わせることとしている
- 荷重の設定にあたり、除灰の効果は期待しない。除雪については適切に除雪を行い、雪を長期間堆積状態にしない方針とすることで、積雪荷重に対する裕度を確保する設計とする

3. 降下火砕物に組み合わせる積雪荷重の見直し

- 降下火砕物の荷重に組み合わせる積雪荷重の積雪深さは、発電所立地の最寄りの気象観測所である「石巻地域の年最大積雪深さの平均値(17.0cm)」を採用する方針とする
- 降下火砕物による荷重と積雪による荷重の組み合わせにおいては、除灰の効果は期待しないものとする。積雪については適切に除雪を行い、雪を長期間堆積状態にしない方針とすることで、積雪荷重に対する設計裕度を確保する

(参考) 審査会合における指摘事項への回答【指摘事項①】

表1 先行炉との比較結果

条件		柏崎刈羽	東海第二	女川2号	
				見直し前	見直し後
立地条件		日本海側	太平洋側	同左	同左
建築基準法施行細則による垂直積雪量		130cm	30cm	40cm	同左
建築基準法の多雪地域		多雪地域に該当	該当しない	同左	同左
設計基準値		167cm	30cm	43cm	同左
降下火砕物と組合せ	考え方	積雪荷重を従荷重(平均値)として組み合わせる	積雪荷重を従荷重(平均値)として組合せる	同左	同左
	算出方法	1日当たりの積雪量の年超過確率(10^{-2}) + 日最深積雪量の平均値	建築基準法の多雪地域の地震・暴風との組合せ時に平均的な積雪量を与えるための係数(0.35)を考慮	同左	石巻の年最大積雪深さの平均値
	積雪量	115.4cm	10.5cm	15.1cm	17.0cm

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項②】

【審査会合における指摘事項②】

海水ポンプモータの静的負荷に対する評価に関し、静的荷重を直接受けるカバー類について、破損した場合のモータ本体への影響を評価して提示すること

【回答②】

海水ポンプモータのカバー類について、荷重評価を実施し、発生する応力が許容値に対して十分な裕度を有していることを確認した

【評価方法】

(1) 原子炉補機冷却海水ポンプ外扇カバー

外扇カバーの評価は、モータ上面の投影面積の最も大きい外扇カバー全面に均等に降下火砕物が堆積した場合を想定し、荷重評価を行う

(2) 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ雨よけカバー

雨よけカバーの評価は、モータ上面の投影面積の最も大きい雨よけカバー全面に均等に降下火砕物が堆積した場合を想定し、荷重評価を行う

【評価条件】

(1) 堆積荷重

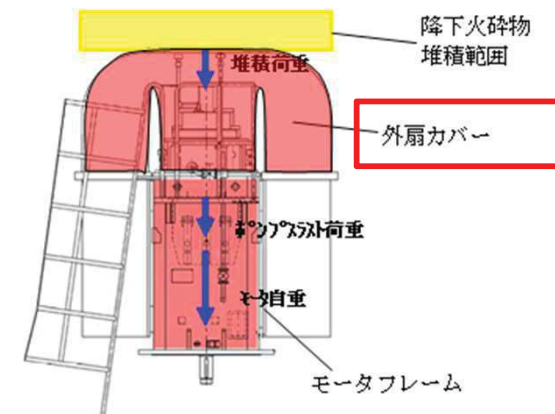
- ・降下火砕物の堆積荷重(2, 207 N/m²)
- +降下火砕物と組み合わせる積雪荷重(340 N/m²)=2, 547 N/m²

表1 海水ポンプモータのカバー類に対する応力評価結果

評価部位	発生応力[MPa]	許容応力※[MPa]	結果
原子炉補機冷却海水ポンプモータ 外扇カバー	147	282	○
高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプモータ 雨よけカバー	14	141	○

※:各部位の許容応力は、JEAG4601-1987の「その他の支持構造物」における許容応力状態Ⅲ_ASIに基づく

● 原子炉補機冷却海水ポンプモータ



● 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプモータ

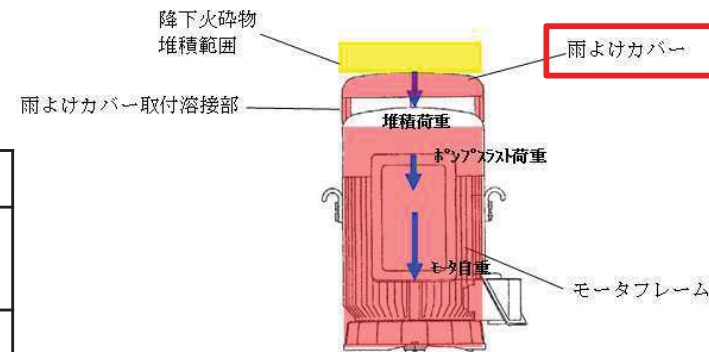


図1 海水ポンプモータのカバー類の評価部位

別添資料-1 火山影響評価について
個別評価-2

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】

【審査会合における指摘事項③】

降下火砕物の成分に酸化アルミニウムおよび酸化カリウムが含まれることを前提として、摩耗や融解の影響を評価して提示すること

【回答③】

a. 降下火砕物の組成に関する調査

- ① 審査会合で「降下火砕物の成分に酸化アルミニウム及び酸化カリウムが含まれているとの指摘のあった論文※¹」の著者である山形大学の八木浩司教授に確認した結果は以下のとおり
 - 論文※¹の主元素組成は、非晶質の火山ガラスの主要元素の割合を把握することでテフラの同定もしくは、マグマ組成を推定するために分析したものであり、降下火砕物中に酸化アルミニウムや酸化カリウムの鉱物相が存在していることを示しているものではない。降下火砕物は酸素に飽和しているため、成分分析の際に構成元素を酸化物としてその量比を求めているに過ぎない
 - ② 文献による調査結果
 - 文献※²を確認した結果、マグマ(火山ガラス含む)の主元素組成は酸化物の形で表現されるが、そのまま酸化物の状態に入っていることを意味するものではなく、分析技術上の制約による便宜的なものであることを確認
- b. 東北地方のテフラに対する調査
- 東北地方のテフラに関する文献※³調査、及び発電所敷地内、敷地周辺の地質調査※⁴の結果、酸化アルミニウム及び酸化カリウムの鉱物相の存在は確認されなかった

降下火砕物の成分を示す場合には、構成元素を酸化物の重量%として示すことが通例であり、酸化物の鉱物相の成分を示すものではないことを確認した。また、調査の結果、降下火砕物中に鉱物相として酸化アルミニウム及び酸化カリウムが含まれる可能性は極めて低いことから、摩耗や融解の影響も極めて小さいと考えられる

※1: 八木浩司・早田勉, 宮城県中部および北部に分布する後期更新世広域テフラとその層位, 地学雑誌, 1989

※2: 谷口宏充, マグマ科学への招待, 裳華房, 2001

※3: 町田洋・新井房夫, 新編 火山灰アトラス[日本列島とその周辺], 東京大学出版会, 2011

※4: 第446回 審査会合資料(女川原子力発電所2号炉 火山影響評価について(コメント回答),(補足説明資料)), 2017.2.24, P67

(参考) 審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(1/2)

【摩耗の影響に関するコメント概要】

- 火山灰の成分分析において、防衛大の八木氏（現在は山形大学教授）の論文（1989年）では肘折・尾花沢テフラの調査をしており、石英の他、酸化アルミニウムが12, 3%, 酸化カリウムが3%ほど入っていることが示されている。八木氏の論文からも降下火砕物にはかなり硬い物質であるアルミナ（モース硬度は8や9）が含まれていることから、砂（モース硬度7）よりも硬度が低いということもないし、脆いというようなことも言えないため、影響を評価して説明すること

1. 降下火砕物による摩耗の影響

- 降下火砕物中に酸化アルミニウムの鉱物相が存在する可能性は極めて低い。一方、摩耗の影響は降下火砕物の硬度の影響を受けることから、女川原子力発電所で想定する降下火砕物（火山ガラス、鉱物結晶片）の硬度について確認を実施した

(1) 火山ガラス

- 降下火砕物の主要成分である火山ガラスの硬度について、鹿児島県垂水市における火山ガラス（主元素組成（ SiO_2 : 約73%, Al_2O_3 : 約14%, K_2O : 約3%））^{※1}の硬度は表1に示すようにモース硬度5であることを確認した
- これは東北地方の主要なテフラの火山ガラスの主元素組成^{※2}（ SiO_2 : 約77~78%, Al_2O_3 : 約12~14%, K_2O : 約1~4%程度）と大差なく、女川原子力発電所で想定する火山ガラスのモース硬度も同様に5程度と考えられる

	Shirasu glass			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Specific gravity	2.70	2.77	2.75	2.76
Hardness (Mohr's)	5	5	5	5
Softening point (°C)	873	868	875	870

表1 火山ガラスの特性^{※1}
(赤枠は追記)

(2) 鉱物結晶片

- 東北地方の主要なテフラに対する文献^{※2}及び発電所敷地内及び敷地周辺の地質調査^{※3}の結果から確認された鉱物結晶片は、石英、（斜方・単斜）輝石、角閃石、カミントン閃石、黒雲母、磁鉄鉱である。各鉱物結晶片のモース硬度は2.5~7^{※4, 5}であり、最大値は石英のモース硬度7である

以上のことから、女川原子力発電所で想定する降下火砕物のモース硬度の最大値は7程度である。また、一般的な砂は石英、長石類、雲母類を主成分^{※6}としており、砂のモース硬度も石英が最大で7程度であることから、設備への影響は砂と同等であると考えられる

(参考) 審査会合における指摘事項への回答【指摘事項③】(2/2)

【融解の影響に関するコメント概要】

- ディーゼル発電機の評価においてシリンダの排気温度が約500度、火山灰の融点が約1000度なので溶融しないとされているが、火山灰には酸化カリウムが含まれる可能性がある。酸化カリウムの融点は約350度なので、影響を評価して説明すること

2. 降下火砕物による融解の影響

- 降下火砕物中に酸化カリウムの鉱物相が存在する可能性は極めて低い。一方、融解の影響は降下火砕物の融点の影響を受けることから、女川原子力発電所で想定する降下火砕物(火山ガラス、鉱物結晶片)の融点について確認を実施した

(1) 火山ガラス

- 火山ガラスの融解については、鹿児島県垂水市における火山ガラス(主元素組成(SiO_2 :約73%, Al_2O_3 :約14%, K_2O :約3%))に対する実験において、約700°Cからガラスが転移し、表1に示すように軟化温度が868~875°Cであることが確認された※1
- これは東北地方の主要なテフラの火山ガラスの主元素組成※2 (SiO_2 :約77~78%, Al_2O_3 :約12~14%, K_2O :約1~4%程度)と大差なく、女川原子力発電所で想定する火山ガラスの軟化温度は同様に約860~880°C程度と考えられる。よって火山ガラスの融点は860°C以上であると推定される

(2) 鉱物結晶片

- 鉱物結晶片は火成岩の構成鉱物であることから、火成岩(マグマ)の融点と同等と考えられる。火成岩の融点は850~1125°C※7であることを確認した

以上のことから、女川原子力発電所で想定する降下火砕物の融点は850°C以上であると考えられる。非常用ディーゼル発電機のシリンダから排出される排気ガス温度が約500°Cであり、シリンダ内の金属表面付近はシリンダ冷却水及びピストン冷却用潤滑油の効果により冷却されていることを踏まえると、降下火砕物は融解の可能性は極めて小さいと考える

※1:恒松修二・井上耕三・松田応作,シラスを主原料とする結晶化ガラス, 窯業協会誌84[6], 1976,P32-40

※2:八木浩司・早田勉,宮城県中部および北部に分布する後期更新世広域テフラとその層位,地学雑誌,1989,P48

※3:審査会合資料(女川原子力発電所2号炉 火山影響評価について(コメント回答),(補足説明資料)),2017.2.24,P67

※4:青木正博・目代邦康,増補改訂版 地層の見方がわかるフィールド図鑑,誠文堂新光社,2017,P200

※5:理科年表,国立天文台編 第91冊,平成30年,P668

※6:小田匡寛・榎本文勇他,砂粒子の形状・組成が砂の土質工学的性質に及ぼす影響に関する研究,土と基礎,19-2,1971,P7

※7:下鶴大輔・荒牧重雄他,火山の事典 第2版,朝倉書店,2008,P147

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項④】(1/2)

【審査会合における指摘事項④】

降下火砕物による金属材料の腐食影響評価について、評価対象と影響因子が不明確なため、網羅的に抽出・整理した上で評価していることを示すこと

【回答④】

降下火砕物による化学的影響(腐食)として、影響因子と評価対象施設、腐食対策について網羅的に抽出・整理し、短期的な腐食に対する対策が実施されていることを確認した

表1 降下火砕物による化学的影響(腐食)に対する影響対策(1/2)

影響因子	評価対象施設等	評価対象部位		腐食対策	仕様※1
構造部への 化学的影響 (腐食)	・原子炉建屋, 制御建屋, タービン建屋	外壁		塗装	エポキシ樹脂 系塗料による 防食塗装
	・海水ポンプ(原子炉補機冷却海水ポンプ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ)	ポンプ	ケーシング	塗装	
		モータ	外面	塗装	
	・海水ストレーナ (高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ)	ストレーナ外面		塗装	
	・非常用ガス処理系(屋外配管)	配管, 支持構造物		塗装	
	・排気筒	排気筒, 支持構造物		塗装	
	・復水貯蔵タンク	タンク		塗装	
	・地下軽油タンクピット	ハッチ		塗装	
・非常用ディーゼル発電機(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む) 排気消音器及び排気管	排気消音器		塗装		
	排気管				

※1: 塗装ハンドブックによると、プラントの塗装として、酸、アルカリなどに水分の加わった強度腐食環境での塗装には耐薬品性のある塗料として、エポキシ樹脂塗料、タールエポキシ樹脂塗料などが使用されるとの記載がある。[参考文献]: 石塚末豊・中道敏彦, 塗装ハンドブック, 1996, 朝倉書店, P312

(注): 評価対象施設のうち、屋内設備(非常用ディーゼル発電機(屋内設備)、計測制御設備(安全保護系)及び非常用電源設備(所内低圧系))は、外気取入口に設置されているバグフィルタ(粒径約2μmに対して80%以上を捕捉する性能)を介した換気空気を吸入することから、降下火砕物が大量に侵入する可能性は少なく、短期での腐食により安全機能が損なわれることはない

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項④】(2/2)

表1 降下火砕物による化学的影響(腐食)に対する影響対策(2/2)

影響因子	評価対象施設等	評価対象部位		腐食対策	仕様※1
水循環系への化学的影響(腐食)	・海水ポンプ(原子炉補機冷却海水ポンプ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ)	ポンプ	コラムパイプ	ライニング	ゴムライニング
			インペラ, 主軸	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装
	・海水ストレーナ(原子炉補機冷却海水ストレーナ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ)及び下流設備	ストレーナ内面		ライニング	樹脂ライニング(原子炉補機冷却海水ストレーナ) ゴムライニング(高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ)
		配管		ライニング	樹脂ライニング, ゴムライニング
		熱交換器水室		ライニング	ゴムライニング
		伝熱管		金属材料, 保護被膜※2	アルミニウム黄銅
	・海水取水設備(除塵装置)	スクリーン		塗装	タールエポキシ樹脂系塗料による防食塗装
換気系, 電気系及び計測制御系に対する化学的影響(腐食)	・海水ポンプ(原子炉補機冷却海水ポンプ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ)	モータ	空気冷却器	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装
	・非常用換気空調設備(外気取入口)	外気取入口	ルーバ	金属(塗装)	アルミニウム合金にアクリル樹脂系塗料による塗装

※1: 塗装ハンドブックによると、プラントの塗装として、酸、アルカリなどに水分の加わった強度腐食環境での塗装には耐薬品性のある塗料として、エポキシ樹脂塗料、タールエポキシ樹脂塗料などが使用されるとの記載がある。[参考文献]: 石塚末豊・中道敏彦, 塗装ハンドブック, 1996, 朝倉書店, P312

※2: 伝熱管材料は降下火砕物による腐食成分である硫酸イオン(SO₄²⁻)に耐食性のあるアルミニウム黄銅を使用しており、さらに鉄イオン注入による管内内面の保護被膜による腐食対策を実施している。

(注): 評価対象施設のうち、屋内設備(非常用ディーゼル発電機(屋内設備), 計測制御設備(安全保護系)及び非常用電源設備(所内低圧系))は、外気取入口に設置されているバグフィルタ(粒径約2μmに対して80%以上を捕捉する性能)を介した換気空気を吸入することから、降下火砕物が大量に侵入する可能性は少なく、短期での腐食により安全機能が損なわれることはない

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑤】(1/2)

【審査会合における指摘事項⑤】

間接的影響(長期間の外部電源の喪失および交通の途絶)の評価について、外部からの支援が7日間以降可能となる妥当性を提示すること。開閉所の除灰について検討して提示すること

【回答⑤】

- 外部からの支援については、技術的能力1.0 支援に係る事項において、事象発生後6日間までに発電所外からの支援が受けられるよう支援計画を定め、体制を整備する
- 支援を受けるまでの7日間については、設置許可基準規則解釈第33条第7項の要求として7日間分の非常用電源設備の燃料を有している
- 開閉所および構内の燃料補給ルートについて、7日間以内の除灰が可能であることから、外部からの支援が7日間以降可能となることを確認した

1. 開閉所の降灰除去について

- 降灰後に外部電源を受電するにあたり、送電線引込部の碍子(ブッシング)が降灰の影響を受ける可能性があることから、除灰の成立性検討を行った(図1参照)
- 除灰作業は図2に示すように、碍子(ブッシング)に足場を構築し、清掃(洗浄、乾拭き)を実施する
- 女川原子力発電所の送電線引込部(5回線)については、平行作業が可能であることから、外部電源の復旧状況に合わせて除灰作業を実施する

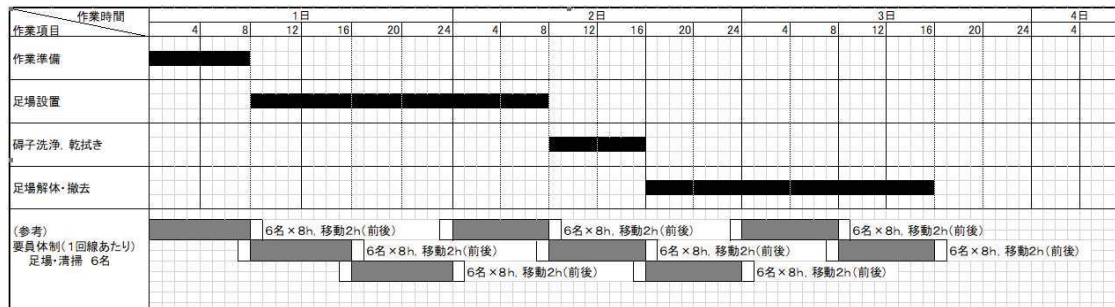


図1 碍子(ブッシング)の除灰作業のタイムチャート

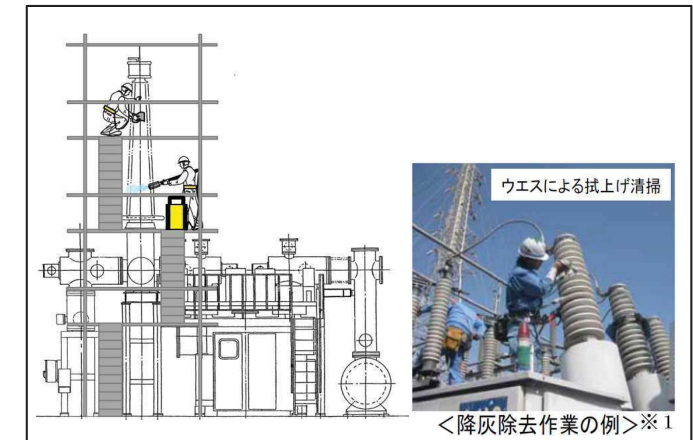


図2 碍子(ブッシング)の除灰イメージ

※1写真出典:産業構造審議会 保安分科会 電力安全小委員会 電気 設備 自然災害等対策ワーキンググループ - 中間報告書(平成26年 6月24日 経済産業省 商務流通保安グループ 電力安全課)

審査会合における指摘事項への回答【指摘事項⑤】(2/2)

2. 燃料補給ルートの除灰

- 燃料補給ルートの確保については、敷地内に降下火砕物が堆積した場合において、タンクローリーなどによる燃料の陸送を想定し、敷地内の燃料補給ルート(図3参照)のうち、距離が長いルートに対する除灰成立性検討を行った
- 除灰作業は当社所有のブルドーザによって、降下火砕物を道路脇に押し出すこととし、約5時間で燃料補給ルートの確保が可能であることを確認した(図4参照)

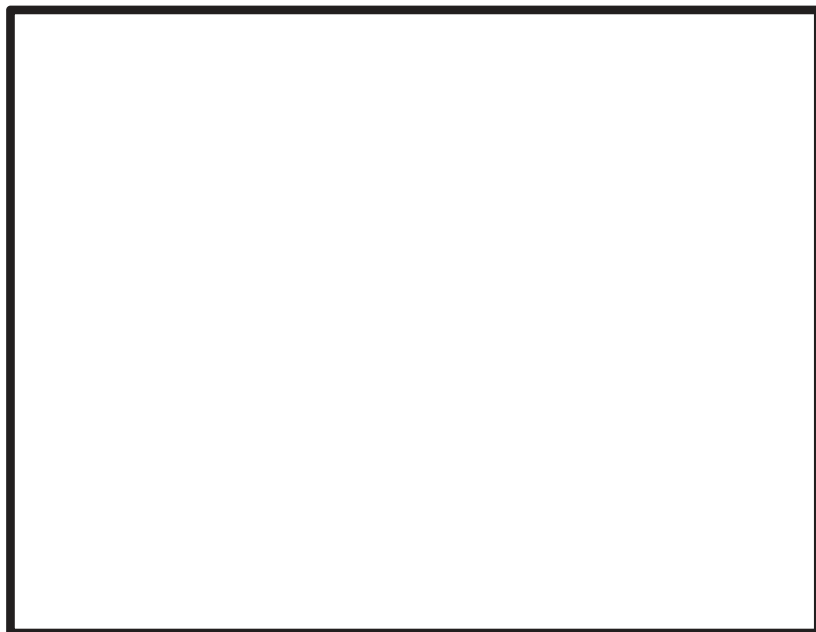


図3 燃料補給ルート

作業項目	作業時間		時間					
	1	2	3	4	5	6		
状況確認・作業準備	■							
ルート確認・判断	■	■						
作業準備・移動		■	■					
重機による除灰作業			■	■	■			
片付け					■	■		
要員体制	ブルドーザ1台(運転手, 補助) 2名 誘導 1名 作業補助(入力による除灰) 2名							

図4 除灰作業のタイムチャート