

1. 降下火砕物と砂の破碎しやすいの違いについて

降下火砕物と砂の破碎しやすいの違いについては、「武若耕司(2004)：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，vol. 42, No. , P38-47.」による調査報告があり，図1に示すとおり，「シラスは川砂等比べて極めて脆弱な材料である」とされており，シラスと同様，火山ガラスを主成分とする降下火砕物は，砂と比較して破碎しやすいと考えられる。

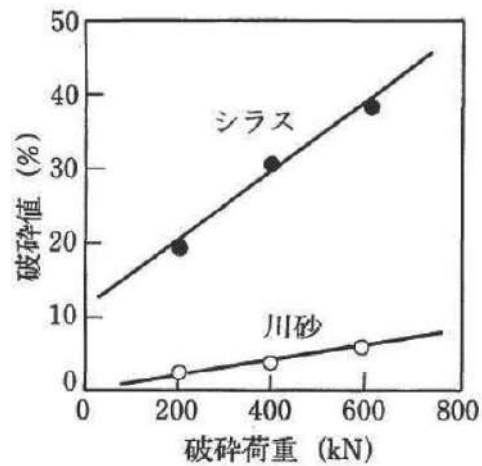


図1 シラスの破碎試験結果

2. 降下火砕物と砂及び設備材料の硬度の比較について

鉱物の硬度は掻傷硬度で表されており、ここではモース硬度による比較を行う。以下のとおり、主要な降下火砕物の硬度は砂と同等又は砂より低いため、設備への影響は軽微と考える。

- ・降下火砕物の主成分は、火山ガラスであり、「恒松修二・井上耕三・松田応作（1976）：シラスを主原料とする結晶化ガラス，窯業協会誌 84[6], P32-40.」によると、火山ガラスのモース硬度は5と記載されている。
- ・泊発電所で想定する降下火砕物の成分である鉱物結晶片は石英，（斜方・単斜）輝石，角閃石であり，これらのモース硬度の最大値は7である（補足資料－19 参照）。

上記降下火砕物成分等の記載については立地評価が確定した後，再度評価する。

- ・砂の主成分は石英，長石類，雲母類であり，モース硬度の最大値は石英の7である。

また，発電所運用期間中において海水取水中に含まれる砂等による摩耗やディーゼル発電機の機関内部における砂等による摩耗によるトラブルは経験していないことから，設備材料は砂に対して耐性を有すると考える。

以 上

降下火砕物の化学的影響（腐食）について

泊発電所3号炉の降下火砕物による化学的影響（腐食）については、「構造物への化学的影響（腐食）」、「水循環系への化学的影響（腐食）」又は「換気系・電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）」を影響因子として、評価対象施設等に対する評価を行い、評価対象施設等が耐食性のある金属材料の使用や防食塗装、ライニングの実施により短期的な腐食による安全機能への影響がないことを評価している。影響因子と評価対象施設等について整理した。詳細について以下に示す。

1. 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物には腐食性ガス（ SO_2 ）が付着しており、水に濡れると硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）が流出することから、建屋及び屋外施設の外面を腐食させることで設備に影響を与える可能性がある。

評価対象施設等について評価を行った結果、A1、A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ、B1、B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチについてはコンクリート構造としていること、原子炉建屋、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋、循環水ポンプ建屋、排気筒、A1、A2-燃料油貯油槽タンク室、B1、B2-燃料油貯油槽タンク室、主蒸気逃がし弁消音器、主蒸気安全弁排気管、タービン動補助給水ポンプ排気管、ディーゼル発電機排気消音器及び排気管については、強度腐食環境に対する塗料であるアクリルゴム系やシリコン系の塗装を外面に実施していることで、直ちに金属表面等の腐食が進むことはないことを確認した。

2. 水循環系の化学的影響（腐食）

海水中には元々多量の腐食性成分が含まれているが、降下火砕物が海水に接触して腐食性成分（硫酸イオン（ SO_4^{2-} ））が溶出することにより、設備に影響を与える可能性がある。

評価対象施設等について評価を行った結果、原子炉補機冷却海水ポンプ、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ及びその下流設備、取水装置（除塵設備）についてはエポキシ樹脂系の塗装やゴムライニング等を実施していることで、直ちに金属表面等の腐食が進むことはないことを確認した。また、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナの下流設備である熱交換器の伝熱管及び伝熱板については、耐食性に優れたチタン合金を使用することにより腐食対策を実施していることから、短期での腐食により設備の健全性に影響を与えるものではないと考える。

3. 換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

降下火砕物を含む空気が流路等を腐食させることで設備に影響を与える可能性がある。

評価対象施設等について評価を行った結果、原子炉補機冷却海水ポンプのモータ冷却器については、エポキシ樹脂系の塗装、換気空調設備（外気取入口）には耐食性のある鋼板にアクリルエマルジョン系樹脂又はアクリル樹脂による塗装を実施しているので、直ちに金属表面等の腐食が進むことはないことを確認した。

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，原子炉補助建屋，ディーゼル発電機建屋	外壁	塗装	アクリルゴム系塗料による防食塗装
	循環水ポンプ建屋	スレート	金属材料	耐酸被覆鋼板による防食
	排気筒	排気筒，支持構造物	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装
	主蒸気逃がし弁消音器	主蒸気逃がし弁消音器	塗装	シリコン系塗料による防食塗装
	主蒸気安全弁排気管（屋外配管）	配管，支持構造物	塗装	
	タービン動補助給水ポンプ排気管（屋外配管）	配管，支持構造物	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装
		排気消音器	金属材料	ステレンス鋼
	ディーゼル発電機排気消音器及び排気管		塗装	シリコン系塗料による防食塗装
			塗装	
	A1，A2-燃料油貯油槽タンク室， B1，B2-燃料油貯油槽タンク室	鋼製蓋	塗装	エポキシ樹脂系塗料・シリコン系塗料による防食塗装
	A1，A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ， B1，B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ	トレンチ蓋	コンクリート	コンクリート
		上部鋼製蓋（点検口）	金属材料	溶融亜鉛メッキ鋼板

※1：塗装ハンズブックによると，プラントの塗装として，酸，アルカリ等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等が使用されたとの記載がある。

〔参考文献〕：石塚末豊・中道敏彦，塗装ハンズブック，1996，朝倉書店，P312

注）評価対象施設等のうち，屋内設備（ディーゼル発電機（屋内設備），安全保護計装盤及び非常用の計装用インバータ（無停電電源装置）は外気取入口に設置されている平型フィルタ（粒径約5μmに対して85%以上の捕捉する性能）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。

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}	
		ボンプ	揚水管 インペラ, 主軸			
水循環系への化学的影響（腐食） 換気系、電気系及び計測制御系に 対する化学的影響（腐食）	原子炉補機冷却海水ボンプ	ボンプ	揚水管 インペラ, 主軸	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装	
	原子炉補機冷却海水ボンプ出口 ストレーナ及び下流設備	ストレーナ内面			金属材料	耐食ステンレス鋼
		配管			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 ポリエチレンライニング
		伝熱管及び伝熱板 ^{※2}			ライニング	ゴムライニング
	取水設備（除塵設備）			金属材料	チタン合金	
	ディーゼル発電機吸気消音器		スクリーン	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装	
	換気空調設備 （原子炉建屋給気ガラリ） 換気空調設備 （補助建屋給気ガラリ）	換気空調設備 （原子炉建屋給気ガラリ）	ガラリフード		塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装 アクリルエマルジョン系樹脂による表面被覆
		換気空調設備 （補助建屋給気ガラリ）	ガラリフード		塗装	アクリル系樹脂による表面被覆
			ガラリフード		塗装	アクリル系樹脂による表面被覆

※1: 塗装ハンドブックによると、プラントの塗装として、酸、アルカリ等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等が使用されたとの記載がある。

[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: 伝熱管及び伝熱板材料は降下火砕物による腐食成分である硫酸イオン (SO₄²⁻) に耐食性のあるチタン合金を使用することにより腐食対策を実施している。

注) 評価対象施設等のうち、屋内設備（ディーゼル発電機（屋内設備）、安全保護系計装盤及び非常用の計装用インバータ（無停電電源装置）は外気取入口に設置されている平型フィルタ（粒径約5 μm に対して85%以上の捕捉する性能）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。

ディーゼル発電機吸気消音器の吸気フィルタへの影響について

大気中の降下火砕物を吸入することによるディーゼル発電機吸気消音器の吸気フィルタへの影響について以下に示す。

1. ディーゼル発電機の吸気消音器吸気フィルタの閉塞

図1のとおり、ディーゼル発電機の吸気消音器は屋外からの給気口が下向きに設置されており、降下火砕物を吸い込みにくい構造である。

仮に浮遊性粒子の吸い込みを考慮しても、浮遊性粒子は粒径が小さいこと、降下速度が比較的遅いことから、フィルタは目詰まりしにくく、フィルタは容易に閉塞しない。仮にディーゼル機関内に侵入しても降下火砕物は硬度が小さく、破碎しやすいことから、ディーゼル機関内部の摩耗等による影響は小さい。また、ディーゼル発電機は、万一フィルタが閉塞するおそれが生じたとしても、フィルタの清掃や取替えを行うことも可能である。

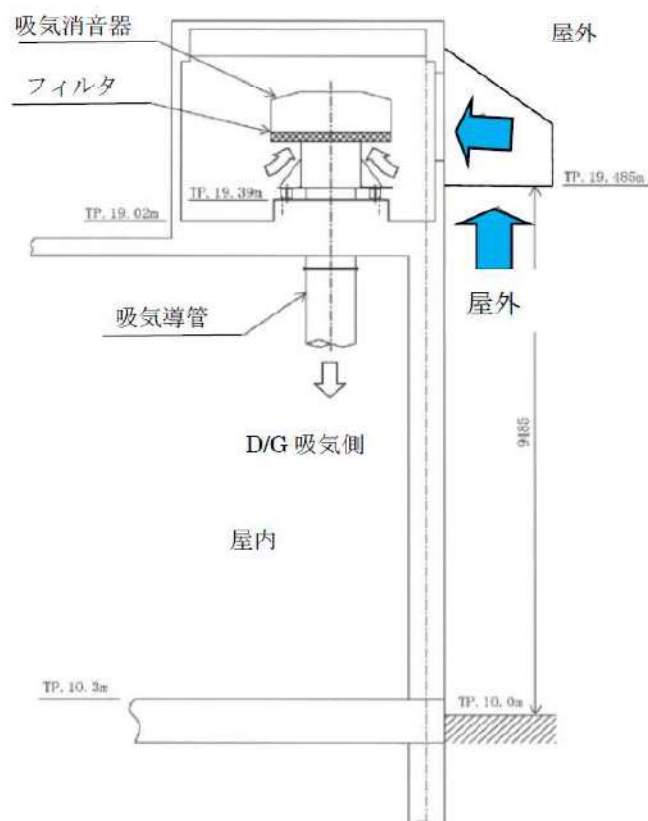


図1 ディーゼル発電機の吸気口

なお、念のため、仮に大気中の降下火砕物がフィルタへすべて付着したと想定し、アイスランド火山による観測最大濃度を用いて評価した結果、以下に示すとおり、フィルタ閉塞時間は約 19 時間であり、フィルタ交換は概ね 1 台当たり約 0.7 時間で取替えが可能である。

<参考>ディーゼル機関の吸気フィルタの閉塞時間の試算

以下の想定時におけるディーゼル発電機の吸気フィルタの閉塞までの時間評価を行うと、約 19 時間運転が可能との結果となる。

[ダスト捕集 / 1 時間あたりの付着量 = ⑤ ÷ (① × ②)]

【想定】

① 降下火砕物の大気中濃度 : $3,241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ※1

② ディーゼル発電機吸気流量 : $38,000\text{m}^3/\text{h}$

③ ディーゼル発電機吸気フィルタ降下火砕物捕集容量 : $1,000\text{g}/\text{m}^2$ ※2

④ ディーゼル発電機吸気フィルタ表面積 : 2.3m^2

⑤ ディーゼル発電機吸気フィルタでのダスト捕集量 : $2,300\text{g}$ ※2

※1 アイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生 (H22 年 4 月) した火山噴火地点から約 40km 離れたヘイマランド地区における大気中の降下火砕物濃度値 (24 時間観測ピーク値)

※2 ディーゼル発電機吸気フィルタの「降下火砕物捕集容量」, 「ダスト (降下火砕物) 捕集量」については、添付の参考資料「ディーゼル発電機吸気フィルタの降下火砕物捕集容量 (捕集量) の算定方法について」参照

【手順】

1. 層状フィルタの押さえ板の取り付けナットを緩めて、押さえ板を外す。
2. 層状フィルタを外す。
3. 層状フィルタ及び収納部を清掃する。
4. 組立前の内部確認をする。
5. 層状フィルタを取り付ける。
6. 押さえ板を取り付ける。

【要員】 : 3 人, 【所要時間】 : 40 分

記号	用途	口径	個数	規格	備考
A	型気出口	32B	1	JISF7505	#812.8x7.1
B	Fの線	G1/2	1		盲栓付

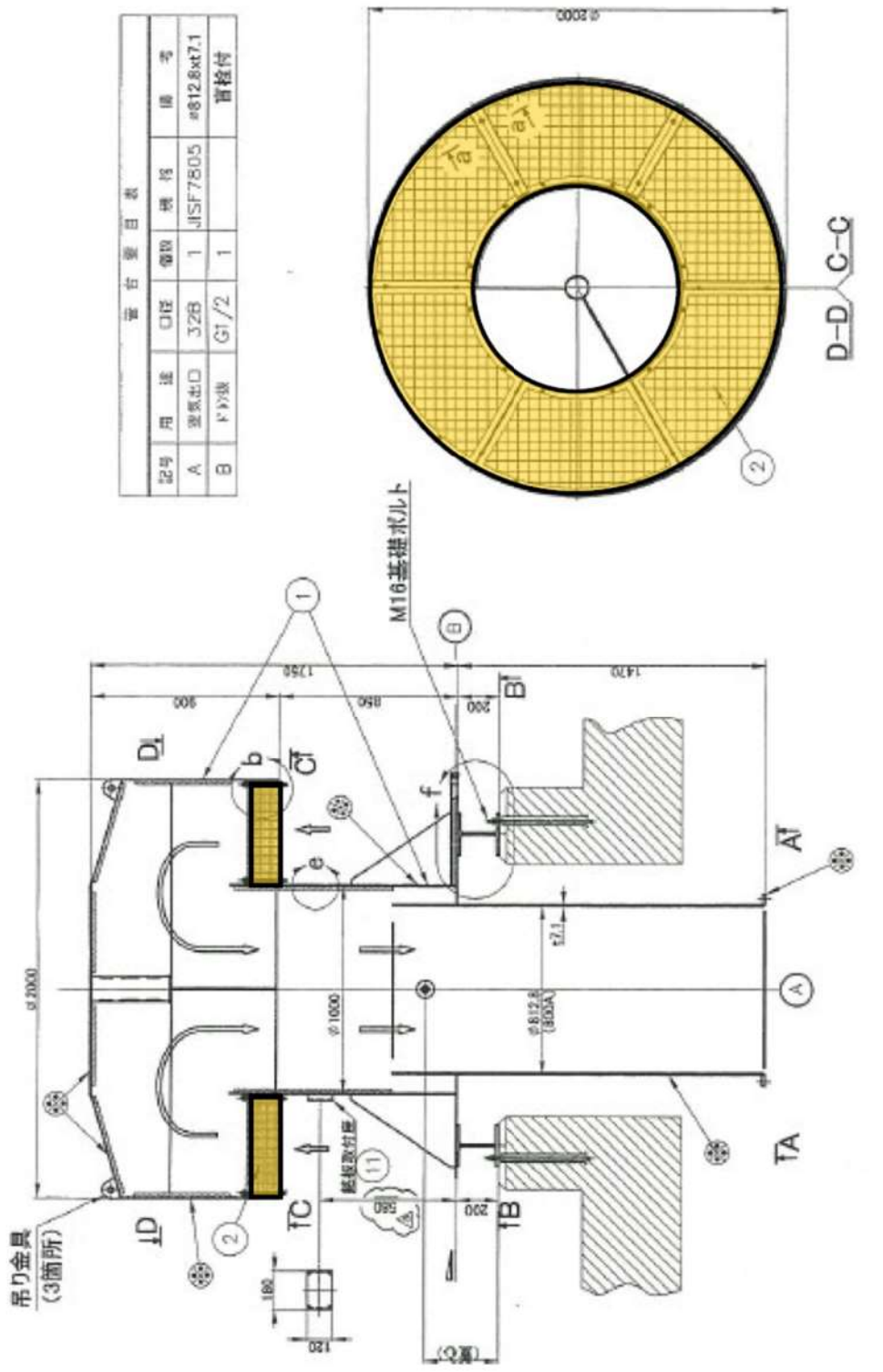


図2 ディーゼル発電機の吸気口

以上

ディーゼル発電機吸気フィルタの降下火砕物捕集容量（捕集量）の
算定方法について

1. ディーゼル発電機吸気フィルタ降下火砕物捕集容量：1,000g/m² の算定方法
ディーゼル発電機吸気フィルタは鋼線を格子状に編み込んだフィルタが多層に積層された構造（図3「ディーゼル発電機吸気フィルタの多層構造（概念図）」参照）をしており、本フィルタの仕様は以下の通りである。

- ・ディーゼル発電機吸気フィルタの空間率：98.2%（フィルタメーカーのカタログ値）
- ・ディーゼル発電機吸気フィルタの表面積：2.3m²
- ・ディーゼル発電機吸気フィルタの厚さ：
- ・ディーゼル発電機吸気フィルタの積層数：

※ 製品製作上の機微データのため公開不可

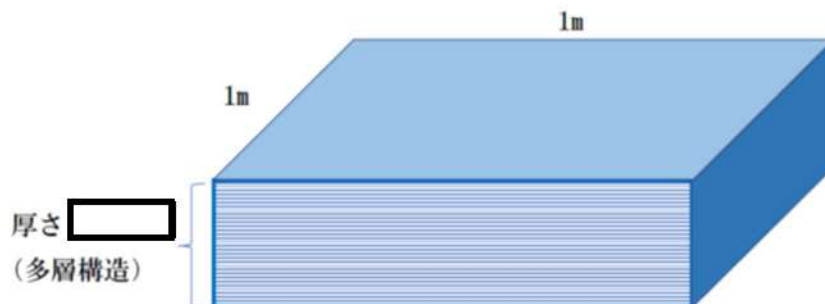


図3 ディーゼル発電機吸気フィルタの多層構造（概念図）

なお、本フィルタについて、降下火砕物の捕集容量に係る性能規定値等がないため、上記の仕様を用いて、以下の通り、単位面積当たりの降下火砕物捕集容量を試算し設定している。

(1) 単位面積当たりのディーゼル吸気フィルタの空間量 (m³/m²)

[]

(2) 単位面積当たりのフィルタ灰捕集容量 (g/m²)

降下火砕物の捕集容量の想定に当たり、厚さ [] のフィルタのすべての空間に降下火砕物を取り込まれたと想定すると、添付六記載の降下火砕物の最低密度 0.7g/cm³ より、降下火砕物捕集容量は次の通りとなる。

[]

しかしながら、理想的にすべての空間に降下火砕物が捕集されるとは考えにくいことから、ここでは、保守的に、多層フィルタのうち、表層1層目だけに降下火砕物の捕集が期待されるものと想定し、以下の通りフィルタの降下火砕物捕集容量を試算し設定している。

①単位面積当たりの表層のフィルタ1層分の空間量 (m³/m²)

[]

②単位面積当たりの表層のフィルタ1層分による降下火砕物捕集容量 (m³/m²)

降下火砕物の最低密度 0.7g/cm³ より、降下火砕物捕集容量は次の通りとなる。

[] (約 1,000 g/m²)

この捕集容量を「ディーゼル発電機の吸気フィルタの閉塞時間の試算」に用いる降下火砕物の捕集容量として設定し、ディーゼル発電機吸気フィルタの閉塞時間の試算を行っている。

2. ディーゼル発電機吸気フィルタでのダスト捕集量：2,300g の算定方法

ディーゼル発電機吸気フィルタでのダスト捕集量は、前述の1. で設定した降下火砕物の捕集容量 1,000g/m² より、以下の通りディーゼル発電機吸気フィルタの表面積 2.3m² を乗じて算出している。

・ディーゼル発電機吸気フィルタでのダスト（降下火砕物）捕集量：

$$1,000\text{g/m}^2 \times 2.3\text{m}^2 = 2,300\text{g}$$

以上

[]
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません

降下火砕物の侵入によるディーゼル発電機空気冷却器への影響について

ディーゼル発電機空気冷却器への降下火砕物による冷却機能への影響について以下に示す。

ディーゼル機関の吸気系統の構造は以下のようになっており、給気ガラリーから給気された大気中の降下火砕物がフィルタや過給機を経て一部空気冷却器に侵入し、空気冷却器を通過する際に、仮に冷却器内が結露していた場合、伝熱管に降下火砕物が付着し冷却機能へ影響を及ぼす可能性があるが、空気冷却器出口温度は、吸入空気温度（外気温度）より常に高い状態で運転されるため冷却器は結露することはなく、降下火砕物の付着による冷却機能への影響はない。図1にディーゼル機関吸気系の概略系統図を示す。

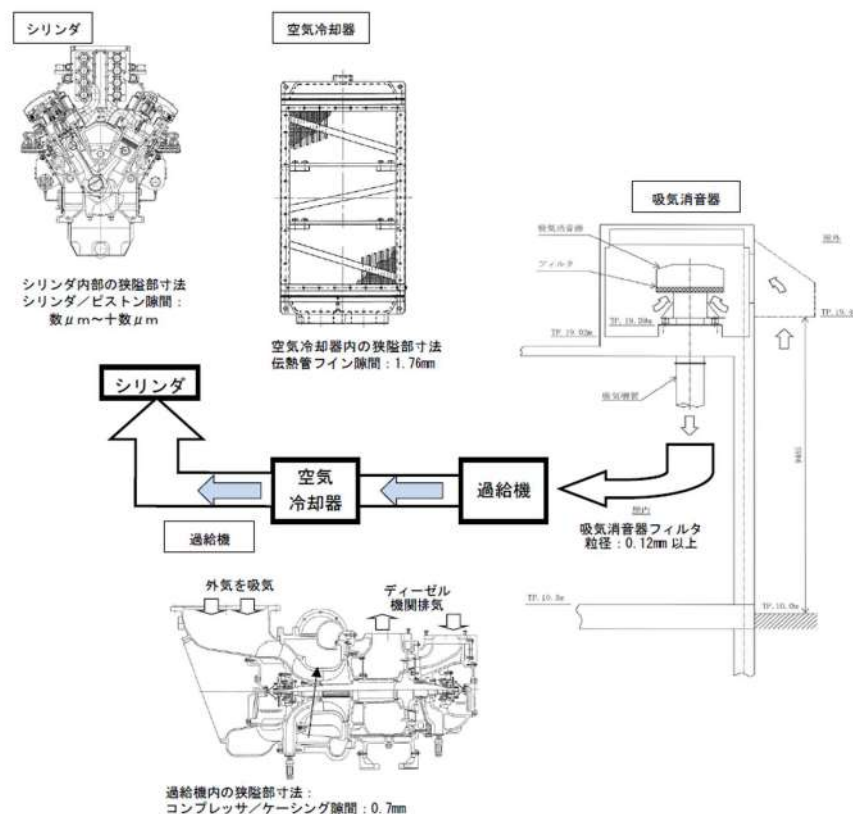


図1 ディーゼル機関吸気系概略系統図

以上

降下火砕物の侵入による潤滑油への影響について

降下火砕物が、ディーゼル発電機吸気口上流に設置されている吸気フィルタを通過し、燃焼用空気とともに機関内に取り込まれ、潤滑油へ混入する場合を想定し、潤滑油に降下火砕物を混入させた状態での潤滑油の成分分析を実施した結果を以下に示す。

1. 試験概要

ディーゼル発電機に使用しているものと同様の潤滑油（マリン T104）に降下火砕物を混入・攪拌させ、間接的影響で期待される運転期間である 7 日間保管した後、粘性等の成分分析を実施した。

2. 試験条件

(1) 潤滑油中の降下火砕物濃度

想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度は、表 1 より \square g/L となるが、本試験においては保守的に降下火砕物の濃度を \square g/L とした。

また、潤滑油中の降下火砕物の濃度依存性を確認するため、参考に \square g/L の降下火砕物の濃度においても試験を実施した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません

表1 想定される潤滑油中の降下火砕物濃度

	ディーゼル発電機
①ディーゼル発電機の吸気用として吸入口から取込まれる降下火砕物の総量(g) =a×b×c	<input type="text"/>
a. ディーゼル発電機の吸気風量(m ³ /h)	<input type="text"/>
b. 気中降下火砕物算定時に仮定する降灰継続時間(h)	24
c. 火山影響評価ガイドに定める手法で算定した気中降下火砕物濃度(g/m ³) ^{※1}	3.7
②ディーゼル発電機機関に取込まれる降下火砕物(g) =①×(100-d)/100×e/100	<input type="text"/>
d. 吸気フィルタの除去効率(%)	90
e. 吸気フィルタを通過する降下火砕物の粒径割合(%) ^{※2}	<input type="text"/>
③ディーゼル発電機潤滑油系統の潤滑油量(L)	<input type="text"/>
④潤滑油中の降下火砕物濃度(g/L) =②÷③	<input type="text"/>

※1：降下火砕物の大気中濃度は、評価対象火山の1つである恵庭岳に対して、「原子力発電所の火山影響評価ガイド」に示される気中降下火砕物濃度を数値シミュレーションにより推定する手法に基づき、算出される値 3.7g/m³を用いた。

※2：0.12mm以下の降下火砕物の割合。

(2) 粒径

混入させる降下火砕物の粒径は、吸気フィルタ（粒径約 0.12mm に対し 90%以上を捕獲する性能）を通過し、ディーゼル発電機機関に取り込まれたのち、潤滑油系統に取り込まれる場合に想定される 20 μm 程度とする。

なお、20 μm 程度は、潤滑油に有意な影響を与えるディーゼル発電機潤滑油こし器のこし網寸法（30 μm）と比べて十分小さいため本試験においても降下火砕物の粒径分布は設定しない。

(3) 潤滑油温度

潤滑油の温度は、ディーゼル発電機の運転時における潤滑油の最高温度である とする。

ディーゼル発電機の運転時における潤滑油の状況を考慮し、降下火砕物を潤滑油に混入させた後の保管期間（7日間）中は、潤滑油の温度を上記温度に保つとともに、定期的に攪拌を実施した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません

3. 試験項目及び判定基準等

降下火砕物が混入した際の潤滑油の粘性等への影響を確認する観点から、表2の試験項目について分析を実施した。

補足資料-2より、降下火砕物の影響としては、その粒子による機械的影響（閉塞等）や水に濡れると酸性を呈することによる化学的影響（腐食等）が想定される。そのため、表2の試験項目は、降下火砕物（酸性の可能性がある物質）が混入した場合における塩基価を確認することとした。

また、表2の試験項目については、ディーゼル発電機の分解点検の際にも確認している項目であり、判定基準については分解点検の基準と同様とした。なお、各試験項目における分析方法については、JIS規格等に定まるそれぞれの方法にて実施した。

表2 試験項目及び判定基準

試験項目	選定理由	判定基準	試験方法
引火点 PM	本項目は潤滑油の粘性に直接影響する項目ではないが、石油製品全般の安全管理面で最も重視されている項目の1つであることから選定した。		(JIS K2265) 引火点試験器を用いて、試料の引火点を求める。
動粘度 (40°C)	潤滑油の油膜厚さが適正に保持できなくなる項目であるため選定した。動粘度が高いと油温度の異常な上昇、始動不良等の原因となり、動粘度が低すぎると油膜強度不足による異常摩耗が発生することから選定した。		(JIS K2283) 粘度計を用いて、試料の動粘度を求める。
水分 (カールフイッシャー式電量滴定法)	水分は発錆の原因となるとともに、潤滑油の酸化を促進させ、油膜切れれによる潤滑不良を起すことから選定した。		(JIS K2275) よう化物イオンを含んだ陽極液を電気分解して発生したよう素を試料中の水と反応させ、反応したよう素の量とよう素を発生させたため消費した電流量から水の量を測定する。
塩基価	塩基価は潤滑油中に混入する酸性物質を中和するため添加されている塩基成分の残存量を示す値であり、潤滑油の劣化状況を把握できることから選定した。		(JIS K2501) 試料を溶剤に溶かし、ガラス電極と比較電極を用いて、電位差的滴定する。電位計の読みと、これに対応する液の滴定量との関係を作図し求める。
ペンタン不溶分 (A法)	潤滑油の不溶分が増加すると粘度の上昇、潤滑油系統の清浄性の悪化、フィルタ目詰まり等を起すことから選定した。		(ASTM D893) 試料に溶剤を加えて均一に溶解した後、遠心分離処理し上澄み液を除去し不溶分を分離する。この操作を数回繰り返し、不溶分を乾燥させ重量を測定する。
トルエン不溶分 (A法)			

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません

4. 試験結果

以下の表3のとおり、各試験項目における判定基準を満足していることから、潤滑油の各性状に影響がないことを確認した。

なお、降下火砕物が潤滑油に混入した際の影響の度合いは、降下火砕物の給源やディーゼル発電機の運転状態（ディーゼル発電機が運転している状態においては、潤滑油に運転圧が加わる）によって異なる可能性があるが、系統内において常にその運転圧が加わることがないこと、また、想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度より保守的な条件で実施した本試験においても潤滑油の性状に有意な変化がなかったことから、想定される降下火砕物の濃度に対して、ディーゼル発電機の機能に影響はないと判断した。

表3 潤滑油の成分分析結果

試験結果	代表性状	判定基準 ^{※1}	試験結果 ^{※3}	判定	参考 ^{※4}
引火点 [PM]	230.0			○	
動粘度 [mm ² /s]	141.7			○	
水分 [vol%]	<0.03			○	
塩基価 [mgKOH/g]	13.0			○	
ペンタン不溶 [%]	<0.05			○	
トルエン不溶 [%]	<0.05			○	

※1 引火点及び動粘度については、構内に保管してある新油を基準値とする。

※2 引火点の試験結果が代表性状に比べて低い値となっているのは、代表性状を確認するため新油に対して実施される試験方法「C.O.C法」に比べ、今回実施した「P.M法（分解点検等の際に実施される）」では、引火点が測定値より10～20度程度低く示される。なお、試験結果の比較より、降下火砕物濃度が□g/Lより低い□g/Lの場合においても、引火点に大きい違いは見られなかったことから、降下火砕物の侵入による引火点への影響はなかったものと考えられる。

※3 降下火砕物濃度 □g/L

※4 降下火砕物濃度 □g/L

以上

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません

降下火砕物の金属腐食研究について

火山灰を用いた火山ガス（SO₂）による金属腐食研究結果を泊発電所における降下火砕物（火山灰）による金属腐食の影響評価に適用する考え方について以下に示す。

1. 適用の考え方

降下火砕物による金属腐食については、主として火山ガス（SO₂）が付着した降下火砕物の影響によるものである。

降下火砕物による腐食影響において引用した研究文献「火山環境における金属材料の腐食」では、桜島の降下火砕物を用いて、実際の火山環境に近い状態を模擬するため、高濃度の亜硫酸ガス（SO₂）雰囲気を保った状態で金属腐食試験を行ったものである。

火山ガスの成分は亜硫酸ガス、硫化水素、フッ化水素等が挙げられ、成分構成は各火山、同一火山でも噴火ごとに異なるとされている^{*1}が、硫酸イオンが金属腐食の原因となることを踏まえた、降下火砕物の主要な腐食成分である亜硫酸ガスを高濃度で模擬した腐食試験結果であることから、特定の火山によらず、泊発電所で考慮する火山についても本研究結果が十分適用可能である。

2. 研究文献「火山環境における金属材料の腐食」の概要

(1) 試験概要

「火山環境における金属材料の腐食（出雲茂人，末吉秀一ほか），防食技術 Vol. 39, pp. 247-253, 1990」によると，降下火砕物を水で洗浄し，可溶性の成分を除去した後，金属試験片（SS41, Cu, Al, Zn めっき鋼板）に堆積させ，高濃度の SO₂ ガス雰囲気（150～200ppm）で，加熱（温度 40℃，湿度 95% を 4 時間），冷却（温度 20℃，湿度 80% を 2 時間）を最大 18 回繰り返すことにより，結露，蒸発を繰り返し金属試験片の腐食を観察している。

(2) 試験結果

図 1 に例として SS41 の腐食による質量変化を示す。降下火砕物の堆積量が多い場合は，降下火砕物の堆積なし，又は堆積量が少ない場合と比較して，金属試験片の腐食が促進される。腐食量は表面厚さにして数十 μm 程度との結果が得られた。

これは火山灰が金属表面に堆積していると結露しやすいこと，並びに保水効果が大きいことにより腐食が促進されると結論づけられている。同様に，降下火砕物の堆積の影響は，Cu, Al, Zn めっき鋼板とも降下火砕物の堆積量が多い

場合のほうが、腐食が促進される傾向である。腐食量も表面厚さにして十数～数十 μm 程度である。

(3) 試験結果からの考察

降下火砕物による腐食については、主として火山ガスが付着した降下火砕物の影響によるものであり、本研究においては、金属試験片の表面に降下火砕物を置き、実際の火山環境を模擬して高濃度の SO_2 雰囲気中で暴露し、腐食実験を行っているものである。

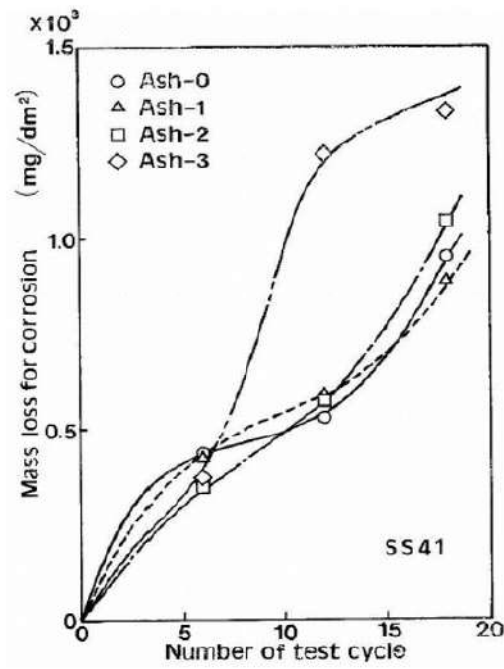
腐食の要因となる火山ガスを高濃度の雰囲気を常に保った状態で行っている試験であり、自然環境に存在する火山灰よりも高い腐食条件^{※2}で金属腐食量を求めている。泊発電所の評価対象施設等のうち、A1, A2-燃料油貯油槽タンク室及びB1, B2-燃料油貯油槽タンク室の鋼製蓋（炭素鋼）については、降下火砕物に付着した火山性ガスが水に濡れたときに生ずる硫酸イオン等により腐食が発生する可能性がある。このため、鋼製蓋については、外装塗装^{※3}を施すことによって、降下火砕物による短期での腐食により機能に影響を及ぼすことはない設計とする。

※1：「火山噴火等から電気設備を守るには（河内清高），電気設備学会誌 33 巻(2013)3号」

※2：

- ・三宅島火山の噴火口付近の観測記録：20～30ppm
（「三宅火山ガスに関する検討会報告書」より）
- ・桜島火山上空の噴煙中火山ガスの観測記録 17～68ppm
（「京大防災研究所年報」より）

※3：鋼製蓋（炭素鋼）部は酸，アルカリ等に水分の加わった強度腐食環境での塗装としてエポキシ樹脂系及びシリコン系の塗装を実施



- Ash-0: 火山灰のない状態
- Ash-1: 表面が見える程度に積もった状態
- Ash-2: 表面が見えなくなる程度に積もった状態
- Ash-3: 約 0.8mm の厚さに積もった状態

図 SS41の腐食による重量変化

以 上

安全保護系計装盤及び非常用の計装用インバータ（無停電電源装置）への降下火
碎物の影響について

降下火碎物の建屋内侵入については、換気空調設備（外気取入口）からの侵入が考えられるが、平型フィルタは、粒径 $5\mu\text{m}$ 以上に対して85%以上を捕獲する性能を有していることから、系統内へ侵入する降下火碎物の影響は小さいと考えられるものの、ここでは降下火碎物の粒子が一部侵入した場合を想定し、その影響を確認する。

屋内の電気系及び計測制御系の盤の設置されるエリアは空調管理されており、外気取入口に平型フィルタが設置されており、降下火碎物の侵入を防止することができる。

しかしながら、屋内の電気系及び計測制御系の盤についてはその発生熱量に応じて盤内に換気ファンを設置している場合があり、強制的に盤内に室内空気を取り込むことから、仮に、降下火碎物が侵入することを考慮し、以下のとおり検討した。

1. 侵入する降下火碎物の粒径

外気を取り込む屋内の電気系及び計測制御系の盤の設置されるエリアの換気空調設備である、安全補機開閉器室空調装置及び原子炉補助建屋空調装置の外気取入口には平型フィルタ（粒径 $5\mu\text{m}$ 以上に対して85%以上を捕獲する性能）に加えて下流側にさらに細かな粒子を捕集可能な粗フィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して90%以上を捕捉する性能）が設置されている。

このため、仮に室内に侵入したとしても、降下火碎物の粒径は、 $5\mu\text{m}$ 以下の細かな粒子であると推定される。

2. 安全保護系計装盤及び非常用の計装用インバータ（無停電電源装置）に対する降下火碎物の影響

安全保護系計装盤及び非常用の計装用インバータ（無停電電源装置）において、数 μm 程度の線間距離となるのは、集積回路（IC等）の内部であり、これら部品はモールド（樹脂）で保護されているため、降下火碎物が侵入することはない。また、端子台等の充電部が露出している箇所については、端子間の距離は数 mm 程度あることから、降下火碎物が付着しても、短絡等を発生させることはない。したがって、万一、細かな粒子の降下火碎物が盤内に侵入した場合においても、降下火碎物の付着等により短絡等を発生させる可能性はない。

以 上

建屋等の降灰除去について

降下火砕物の除灰に要する概算時間について、土木工事の人力作業^{*}を参考に試算した結果を表1に示す。

表1 除灰に要する概算時間

項目		評価諸元
①堆積面積 (m ²)	原子炉建屋	約 4,600m ²
	原子炉補助建屋	約 3,600m ²
	ディーゼル発電機建屋	約 470m ²
	循環水ポンプ建屋	約 2,800m ²
	A1, A2-燃料油貯油槽タンク室	約 10m ²
	B1, B2-燃料油貯油槽タンク室	約 10m ²
	A1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ	約 80m ²
	B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ	約 90m ²
	合計	約 11,660m ²
②堆積厚さ (m)		0.2m
③堆積量=①×② (m ³)		2,332m ³
④1m ³ あたりの作業量 [*] (人・日)		0.39人・日

1. 作業量 (上記のとおり)

0.39人日/m³×2,332m³=約910人日

2. 作業日数 (試算例)

(1) 作業人数：132人(6人/組×22組)

・1組あたり6人体制とする。

原子炉建屋：8組

原子炉補助建屋：6組

ディーゼル発電機建屋：2組

循環水ポンプ建屋：5組

A1, A2-燃料油貯油槽タンク室, B1, B2-燃料油貯油槽タンク室, A1, A2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ, B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ：1組

合計：22組

(2) 所要日数： 約 7 日

※「国土交通省土木工事積算基準 (H24)」における人力掘削での人工を保守的に採用

以 上

降下火砕物降灰時の平型フィルタ取替手順について

換気空調設備の外気取入口のフィルタの取替作業を行う際は、以下の手順を実施することとしている。図1に平型フィルタの取替え・交換イメージを示す。

- ・フィルタの取替作業はガラリ内にて行うため、降灰の影響を受けにくいと考えられるが、保護具（防塵マスク、防塵ゴーグル）を装備する。
- ・グレーチング及び柵に対して養生を行う。
- ・設備影響を勘案し、必要に応じて対象となる系統の運転を停止し、系統を隔離してから取り替え作業を行う。
- ・取り替え作業前に、換気空調設備内への取り込み低減のため、周囲の降下火砕物を清掃する。
- ・交換後、フィルタ差圧にて差圧が低下することを確認する。
- ・作業終了後、降下火砕物の再浮遊の影響を低減させるため、作業エリアの降下火砕物は清掃する。

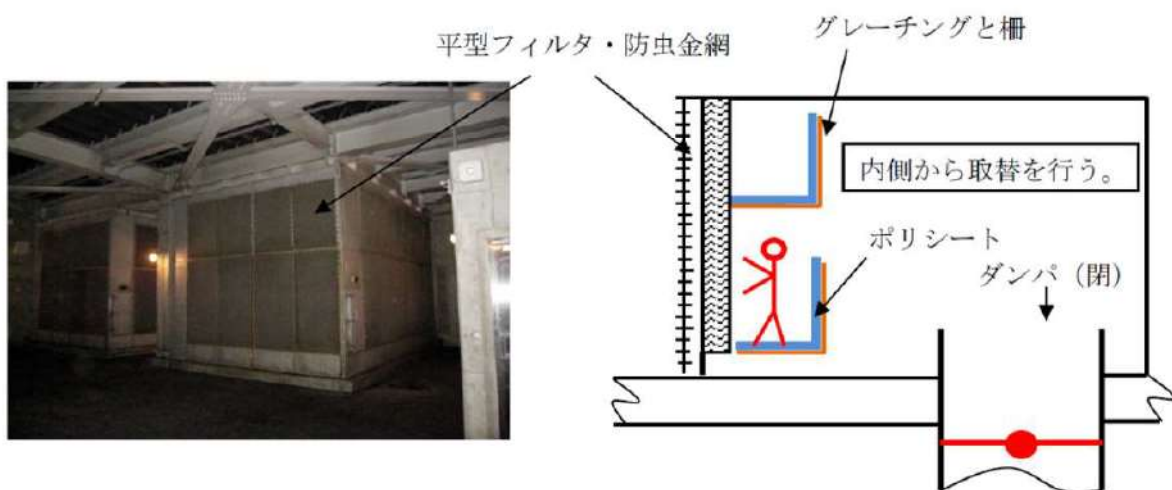


図1 平型フィルタの清掃・取替イメージ

以上

観測された諸噴火の最盛期における噴出率と継続時間について

図1に示すとおり、富士山（宝永噴火 1707 年）の噴出継続時間は、断続的に約 16 日間継続している。

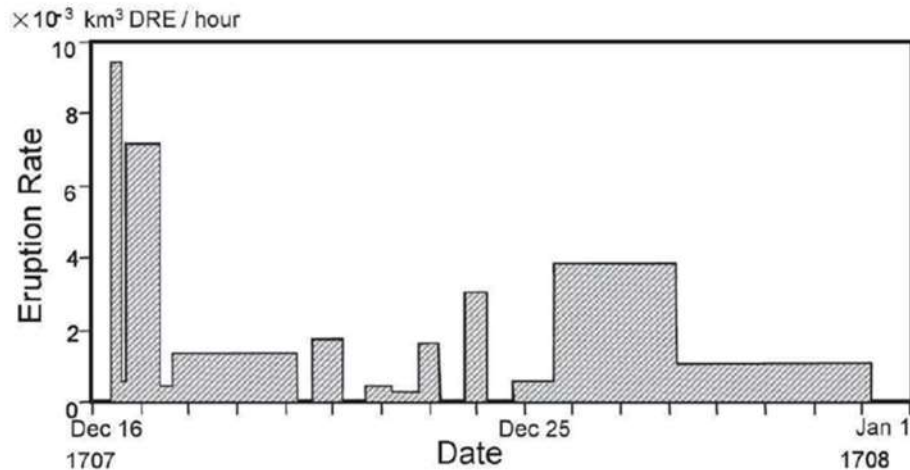


図1 富士山（宝永噴火 1707 年）の噴出率の推移（宮地・小山（2007））

表1に示すとおり、火山観測データが存在する最近の観測記録では、噴火の継続時間は殆どが数時間程度であり、長いものでも 36 時間程度である。

表1 観測された諸噴火最盛期における噴出率と継続時間

噴火年（地域名）	噴煙柱高度 (km)	噴出率 (m ³ /s)	継続時間 (h)
Pinatubo 1991 (フィリピン)	35	250,000	9
Bezymianny 1956 (カムチャッカ)	36	230,000	0.5
Santa Maria 1902 (グアテマラ)	34	17,000-38,000	24-36
Hekla 1947 (アイスランド)	24	17,000	0.5
Soufriere 1979 (西インド諸島)	16	6,200	9
Mt. St. Helens 1980 (アメリカ合衆国)	18	12,600	0.23
伊豆大島 1986 (伊豆)	16	1,000	3
Soufriere 1902 (西インド諸島)	14.5-16	11,000-15,000	2.5-3.5
Hekla 1970 (アイスランド)	14	3,333	2
駒ヶ岳 1929 (北海道)	13.9	15,870	7
有珠山 1977-I (北海道)	12	3,375	2
Fuego 1971 (グアテマラ)	10	640	10
桜島 1914 (九州)	7-8	4,012	36
三宅島 1983A-E (伊豆)	6	570	1.5
Heimaey 1973 (アイスランド)	2-3	50	8.45
Ngauruhoe 1974 (ニュージーランド)	1.5-3.7	10	14

[Wilson et al. (1978), Cas & Wright (1987), 遠藤ほか(1986), 早川(1991b), Pyle(2000) から編集]

以上

重大事故等対処設備に対する考慮について

設置許可基準規則第 43 条（重大事故等対処設備）の要求を踏まえ、降下火砕物によって、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、外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な機能を維持できることを確認する。

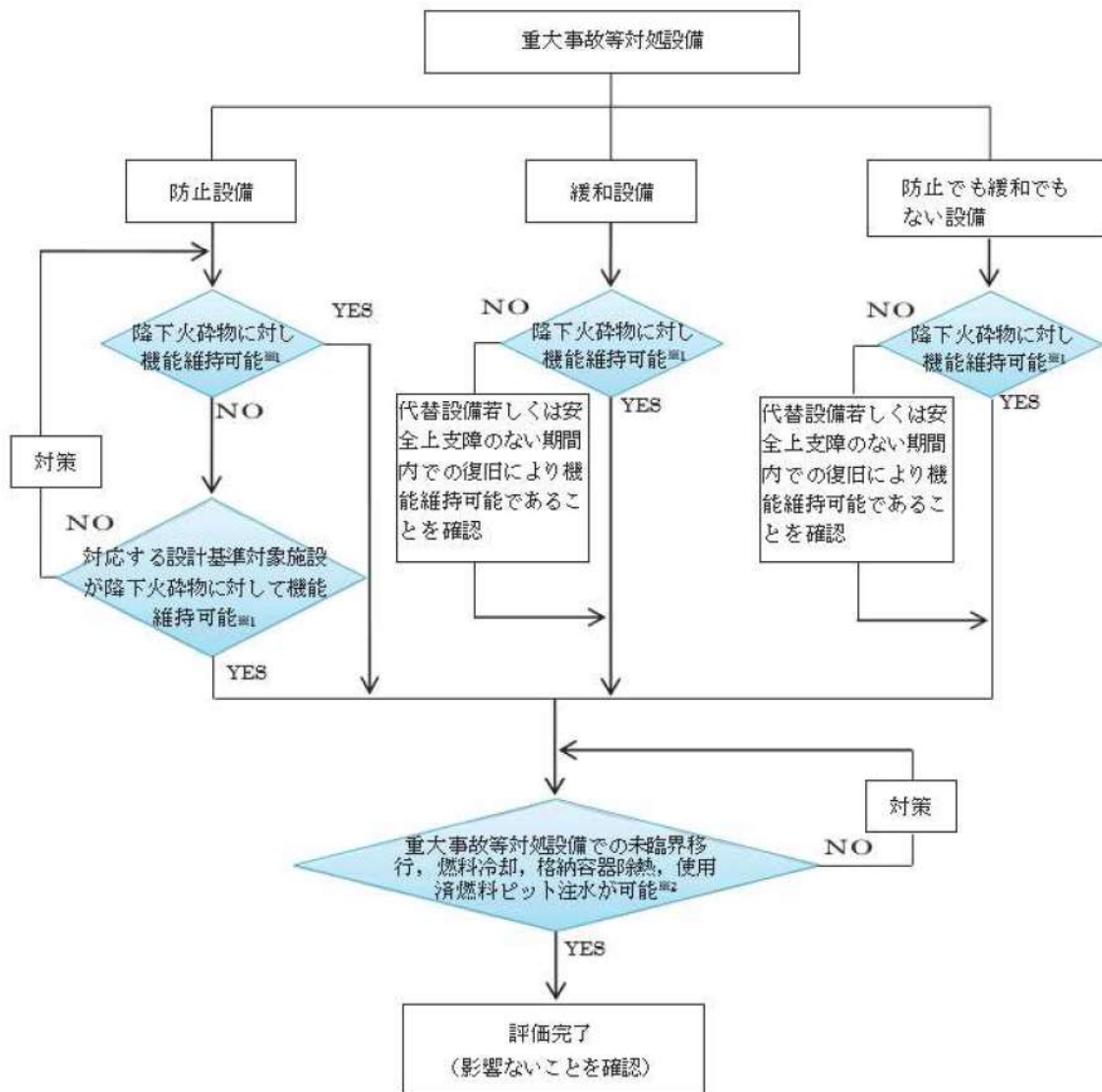
重大事故等対処設備の機能維持は、以下の方針に従い評価を実施する。

- (1) 重大事故防止設備は、降下火砕物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、代替設備若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) 降下火砕物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，使用済燃料ピット注水機能）が維持できること（降下火砕物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）

降下火砕物に対する重大事故等対処施設の影響評価フロー並びに方針（1）及び（2）に対する評価結果をそれぞれ図 1，表 1 に示す。また，方針（3）に示したプラント安全性に関する主要な機能は，以下に例示するとおり重大事故等対処設備により維持される。

- ・未臨界移行機能：手動による原子炉緊急停止，原子炉出力抑制（自動），原子炉出力抑制（手動），ほう酸水注入
- ・燃料冷却機能：代替炉心注水（代替格納容器スプレイポンプ）
- ・格納容器除熱機能：格納容器内自然対流冷却
- ・使用済燃料ピット注水機能：使用済燃料ピットへの注水（可搬型大型送水ポンプ車）

なお，重大事故等対処施設の設計方針は，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、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋及び循環水ポンプ建屋）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：降下火砕物により重大事故等対処設備と設計基準対象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

図 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の評価フロー

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（1/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響			
					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設備	—	特定重大事故等対処施設	申請範囲外	—	—	—		
第43条 重大事故等対処設備	アクセスルートの確保	ホイールローダ, バックホウ	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)		
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	手動による原子炉緊急停止	原子炉トリップスイッチ	防止設備	A/B	○	建屋内		
		制御棒クラスタ	防止設備	C/V	○	建屋内		
		原子炉トリップ遮断器	防止設備	R/B	○	建屋内		
	原子炉出力抑制(自動)	共通要因故障対策盤(自動制御盤)(ATWS緩和設備)		防止設備	A/B	○	建屋内	
		主蒸気隔離弁 電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 主蒸気安全弁 配管等		防止設備	R/B	○	建屋内	
		加圧器逃がし弁 加圧器安全弁 蒸気発生器 配管等		防止設備	C/V	○	建屋内	
		主蒸気管		防止設備	C/V, R/B	○	建屋内	
		1次冷却設備		1次冷却設備に記載		—	—	
		原子炉出力抑制(手動)	主蒸気隔離弁 電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 主蒸気安全弁 配管等		防止設備	R/B	○	建屋内
			加圧器逃がし弁 加圧器安全弁 蒸気発生器 配管等		防止設備	C/V	○	建屋内
主蒸気管			防止設備	C/V, R/B	○	建屋内		
1次冷却設備			1次冷却設備に記載		—	—		

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる(防止設備)
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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
 ※ R/B：原子炉建屋, A/B：原子炉補助建屋, C/V：原子炉格納容器, DG/B：ディーゼル発電機建屋, CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（2/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	ほう酸水注入（ほう酸タンク→充てんライン）	ほう酸ポンプ 緊急ほう酸注入弁 ほう酸タンク 充てんポンプ ほう酸フィルタ 配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		再生熱交換器，配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
		充てんポンプ，配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
	ほう酸水注入（燃料取替用水ピット→充てんライン）	燃料取替用水ピット，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器，配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
		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	1次側のフィードアンドブリード（高圧注入ポンプ）	高圧注入ポンプ 余熱除去ポンプ 余熱除去冷却器 ほう酸注入タンク，配管等	防止設備	A/B
加圧器逃がし弁 格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン 蓄圧タンク 蓄圧タンク出口弁，配管等	防止設備			C/V	○	建屋内
燃料取替用水ピット，配管等	防止設備			R/B	○	建屋内
原子炉補機冷却設備	48条に記載			—	—	
1次冷却設備	1次冷却設備に記載			—	—	
蒸気発生器2次側からの除熱（タービン動補助給水ポンプの手动起動）	タービン動補助給水ポンプ 主蒸気逃がし弁 補助給水ピット タービン動補助給水ポンプ駆動蒸気入口弁，配管等		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	蒸気発生器，配管等		（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
	主蒸気管		（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側からの除熱（電動補助給水ポンプへの給電）		電動補助給水ポンプ 主蒸気逃がし弁 補助給水ピット，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○
蒸気発生器2次側からの除熱	蒸気発生器，配管等		（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
	主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内	
	監視及び制御に用いる設備	加圧器水位 蒸気発生器水位（広域） 蒸気発生器水位（狭域） 補助給水流量 補助給水ピット水位	58条に記載		—	—
蒸気発生器2次側からの除熱	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 主蒸気逃がし弁 補助給水ピット，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内	
	蒸気発生器，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内	
	主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内	

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して，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
 ※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（3/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所*	火山の影響		
				評価	防護方法	
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	1次側のフィードアンドブリード（高圧注入ポンプ）	加圧器逃がし弁 格納容器再循環サンブ 格納容器再循環サンブスクリーン 蓄圧タンク 蓄圧タンク出口弁，配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		高圧注入ポンプ 余熱除去ポンプ 余熱除去冷却器 ほう酸注入タンク，配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	蒸気発生器2次側からの除熱	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 主蒸気逃がし弁 補助給水ピット，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側からの除熱（タービン動補助給水ポンプの手動起動）	タービン動補助給水ポンプ 主蒸気逃がし弁 補助給水ピット タービン動補助給水ポンプ駆動蒸気入口弁，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内
	蒸気発生器2次側からの除熱（電動補助給水ポンプへの給電）	電動補助給水ポンプ 主蒸気逃がし弁 補助給水ピット，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内
	加圧器逃がし弁の機能回復	可搬箇所：加圧器逃がし弁操作用可搬型窒素ガスポンベ，ホース等	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所：加圧器逃がし弁操作用バッテリー	防止設備	A/B	○	建屋内
		常設箇所：加圧器逃がし弁	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
	加圧器逃がし弁による1次冷却系統の減圧（炉心損傷時）	加圧器逃がし弁	緩和設備	C/V	○	建屋内
	1次冷却系の減圧（SG伝熱管破損発生時，IS-LOCA発生時）	主蒸気逃がし弁，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		加圧器逃がし弁，配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
	余熱除去設備の隔離（IS-LOCA発生時）	余熱除去ポンプ入口弁	防止設備	A/B	○	建屋内
	加圧器逃がし弁による1次冷却系の減圧	加圧器逃がし弁，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
	蓄圧注入	蓄圧タンク 蓄圧タンク出口弁，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
蒸気発生器2次側からの除熱	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁，配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内	
	蒸気発生器，配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内	
	主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内	

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して，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）
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（4/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	炉心注水（充てんポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	充てんポンプ、配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器、配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載	—	—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載	—	—	—
	代替炉心注水（B-格納容器スプレイポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	B-格納容器スプレイポンプ B-格納容器スプレイ冷却器 配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載	—	—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載	—	—	—
	代替炉心注水（代替格納容器スプレイポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載	—	—	—
	代替炉心注水（可搬型大型送水ポンプ車） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、ホース延長・回収車（送水車用）、可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし （適切に除灰）
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備	A/B, R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載	—	—	—
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載	—	—	—
	再循環運転（高圧注入ポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク、配管等	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンブ 格納容器再循環サンブスクリーン	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		安全注入ポンプ再循環サンブ側入口 C/V外側隔離弁	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載	—	—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載	—	—	—
	代替再循環運転（B-格納容器スプレイポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	B-格納容器スプレイポンプ B-格納容器スプレイ冷却器、配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンブ 格納容器再循環サンブスクリーン	防止設備	C/V	○	建屋内
		B-安全注入ポンプ再循環サンブ側入口 C/V外側隔離弁	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載	—	—	—
	炉心注水（高圧注入ポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障時）	高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク、配管等	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載	—	—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載	—	—	—

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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）
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（5/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	炉心注水（充てんポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障喪失時）	充てんポンプ、配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器、配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	代替炉心注水（B-格納容器スプレイポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障喪失時）	B-格納容器スプレイポンプ B-格納容器スプレイ冷却器 配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	代替炉心注水（代替格納容器スプレイポンプ） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障喪失時）	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	代替炉心注水（可搬型大型送水ポンプ車） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、フロントライン系故障喪失時）	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 ホース延長・回収車（送水車用）、可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし （適切に除灰）
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備	A/B, R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—
	代替炉心注水（代替格納容器スプレイポンプ）（代替電源） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、サポート系故障喪失時）	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	代替炉心注水（可搬型大型送水ポンプ車：海水） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、サポート系故障喪失時）	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 ホース延長・回収車（送水車用）、可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし （適切に除灰）
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備	A/B, R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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
 ※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（6/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	代替炉心注水（B-充てんポンプ（自己冷却）） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、サポート系故障時）	B-充てんポンプ，配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット，配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器，配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	代替再循環運転（A-高圧注入ポンプ（代替補機冷却）） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、サポート系故障時）	A-高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク，配管等	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車， ホース延長・回収車（送水車用），可搬型ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	影響なし （適切に除灰）
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内	○	影響なし （2箇所は建屋内）
		格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		A-安全注入ポンプ再循環サンプ側入口 C/V 外側隔離弁	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	格納容器スプレイ（格納容器スプレイポンプ）（残留溶融炉心の冷却） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、溶融炉心が原子炉容器に残存する場合）	格納容器スプレイポンプ 格納容器スプレイ冷却器 配管等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット，配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		-	-
	代替格納容器スプレイ（代替格納容器スプレイポンプ）（残留溶融炉心の冷却） （1次冷却材喪失事象が発生している場合、溶融炉心が原子炉容器に残存する場合）	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器 2 次側からの除熱 （1次冷却材喪失事象が発生していない場合、フロントライン系故障時）	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○
	蒸気発生器，配管等		（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
	主蒸気管		（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して，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）
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（7/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所*	火山の影響		
				評価	防護方法	
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	蒸気発生器 2 次側からの除熱（代替電源）（1 次冷却材喪失事象が発生していない場合、サポート系故障時）	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器、配管等	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
		主蒸気管	(設計基準対象施設)	C/V, R/B	○	建屋内
	炉心注水（充てんポンプ）（原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	充てんポンプ、配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器、配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備 1 次冷却設備	48 条に記載 1 次冷却設備に記載		—	—
	炉心注水（高圧注入ポンプ）（原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク、配管等	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備 1 次冷却設備	48 条に記載 1 次冷却設備に記載		—	—
	代替炉心注水（B-格納容器スプレイポンプ）（原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	B-格納容器スプレイポンプ B-格納容器スプレイ冷却器 配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備 1 次冷却設備	48 条に記載 1 次冷却設備に記載		—	—
		代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替炉心注水（可搬型大型送水ポンプ車）（原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 ホース延長・回収車（送水車用）、可搬型ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備	A/B, R/B	○	建屋内
		1 次冷却設備	1 次冷却設備に記載		—	—
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—
	再循環運転（高圧注入ポンプ）（原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク、配管等	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
		B-安全注入ポンプ再循環サンプ側入口 C/V 外側隔離弁	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備 1 次冷却設備	48 条に記載 1 次冷却設備に記載		—	—

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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
 ※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（8/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	代替再循環運転（B-格納容器スプレイポンプ） （原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	B-格納容器スプレイポンプ B-格納容器スプレイ冷却器、配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン	防止設備	C/V	○	建屋内
		B-安全注入ポンプ再循環サンプ側入口 C/V 外側隔離弁	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		-	-
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	蒸気発生器2次側からの除熱 （原子炉停止中の場合、フロントライン系故障時）	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器、配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内
	代替炉心注水 （代替格納容器スプレイポンプ） （代替電源） （原子炉停止中の場合、サポート系故障時）	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	代替炉心注水 （可搬型大型送水ポンプ車） （原子炉停止中の場合、サポート系故障時）	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 ホース延長・回収車（送水車用）、可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし （適切に除灰）
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備	A/B, R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	代替炉心注水 （B-充てんポンプ（自己冷却）） （原子炉停止中の場合、サポート系故障時）	非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
		B-充てんポンプ、配管等	防止設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器、配管等	防止設備	C/V	○	建屋内
	代替再循環運転（A-高圧注入ポンプ） （代替補機冷却） （原子炉停止中の場合、サポート系故障時）	1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
		A-高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク、配管等	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 ホース延長・回収車（送水車用）、可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし （適切に除灰）
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備	屋外A/B廻り及びR/B内	○	影響なし （2箇所は建屋内）
		格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		A-安全注入ポンプ再循環サンプ側入口 C/V 外側隔離弁	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-		

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）

又は降下火砕物により損傷を考慮して、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

※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価（9/24）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所*	火山の影響		
				評価	防護方法	
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	蒸気発生器2次側からの除熱（代替電源） （原子炉停止中の場合、サポート系故障時）	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		蒸気発生器、配管等	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		主蒸気管	（設計基準対象施設）	C/V, R/B	○	建屋内
	炉心注水（高圧注入ポンプ） （熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	高圧注入ポンプ ほう酸注入タンク、配管等	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	炉心注水（余熱除去ポンプ） （熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	余熱除去ポンプ 余熱除去冷却器、配管等	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	炉心注水（充てんポンプ） （熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	充てんポンプ、配管等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器、配管等	緩和設備	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—
	代替炉心注水（B-格納容器スプレイポンプ） （熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合）	B-格納容器スプレイポンプ B-格納容器スプレイ冷却器 配管等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット、配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		—	—

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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）
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (10/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	降下火砕物	
					評価	防護方法
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	代替炉心注水 (代替格納容器スプレイポンプ) (熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	代替炉心注水 (B-充電ポンプ(自己冷却)) (熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時)	B-充電ポンプ, 配管等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		再生熱交換器, 配管等	緩和設備	C/V	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	代替炉心注水 (代替格納容器スプレイポンプ)(代替電源) (熔融炉心の原子炉格納容器下部への落下遅延及び防止、全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	余熱除去設備	余熱除去ポンプ 余熱除去冷却器 配管等	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		-	-
		1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
	高圧注入系 高圧時再循環	高圧注入ポンプ	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		ほう酸注入タンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット, 配管等	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
		格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		-	-
	低圧注入系 低圧時再循環	1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-
		余熱除去ポンプ 余熱除去冷却器 配管等	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンプ 格納容器再循環サンプスクリーン	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
		燃料取替用水ピット, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
原子炉補機冷却設備		48条に記載		-	-	
1次冷却設備	1次冷却設備に記載		-	-		

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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）
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋, A/B：原子炉補助建屋, C/V：原子炉格納容器, DG/B：ディーゼル発電機建屋, CWP/B：循環水ポンプ建屋

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (11/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所*	火山の影響			
				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	蒸気発生器 2 次側からの除熱 (フロントライン系故障時)	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
		蒸気発生器, 配管等	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内	
		主蒸気管	(設計基準対象施設)	C/V, R/B	○	建屋内	
	格納容器内自然対流冷却 (海水) (フロントライン系故障時)	C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備		C/V	○	建屋内
		可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所		○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内		○	影響なし (2 箇所は建屋内)
		可搬型温度計測装置	58 条に記載			-	-
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載			-	-
	代替補機冷却 (A-高圧注入ポンプ (代替補機冷却)) (フロントライン系故障時)	可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所		○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内		○	影響なし (2 箇所は建屋内)
		A-高圧注入ポンプ	(設計基準対象施設)	A/B		○	建屋内
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載			-	-
	蒸気発生器 2 次側からの除熱 (代替電源) (サポート系故障時)	電動補助給水ポンプ タービン動補助給水ポンプ 補助給水ピット 主蒸気逃がし弁 配管等	(設計基準対象施設)		R/B	○	建屋内
		蒸気発生器, 配管等	(設計基準対象施設)		C/V	○	建屋内
		主蒸気管	(設計基準対象施設)		C/V R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却 (海水) (サポート系故障時)	C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備		C/V	○	建屋内
		可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所		○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内		○	影響なし (2 箇所は建屋内)
		可搬型温度計測装置	58 条に記載			-	-
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載			-	-
	代替補機冷却 (A-高圧注入ポンプ (海水冷却) (代替電源)) (サポート系故障時)	可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所		○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内		○	影響なし (2 箇所は建屋内)
		A-高圧注入ポンプ	(設計基準対象施設)	A/B		○	建屋内
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載			-	-

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる (防止設備)

又は降下火砕物により損傷を考慮して, 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)

一: 他の項目にて整理

※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (12/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					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	原子炉補機冷却設備	原子炉補機冷却水ポンプ 原子炉補機冷却水冷却器 原子炉補機冷却水サージタンク 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却海水ポンプ 配管等	(設計基準対象施設)	CWP/B	○	建屋内
第49条 原子炉格納容器内の冷却等のための設備	格納容器内自然対流冷却 (原子炉補機冷却水) (炉心の著しい損傷防止, フロントライン系故障時)	C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備	C/V	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却水ポンプ C, D-原子炉補機冷却水冷却器 原子炉補機冷却水サージタンク C, D-原子炉補機冷却水冷却器海水 入口ストレーナ 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: 原子炉補機冷却水サージタンク加圧用可搬型窒素ガスポンペ, ホース等	防止設備	R/B	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ 配管等	防止設備	CWP/B	○	建屋内
		可搬型温度計測装置	58条に記載		-	-
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	代替格納容器スプレイ (代替格納容器スプレイポンプ) (炉心の著しい損傷防止, フロントライン系故障時)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ビット 補助給水ビット 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ビット 補助給水ビット 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
	格納容器内自然対流冷却 (海水) (炉心の著しい損傷防止, サポート系故障時)	常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外A/B廻り及びR/B内	○	影響なし (2箇所は建屋内)
		C, D-格納容器再循環ユニット	防止設備	C/V	○	建屋内
		可搬型温度計測装置	58条に記載		-	-
非常用取水設備		非常用取水設備に記載		-	-	

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる (防止設備)

又は降下火砕物により損傷を考慮して, 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)

一: 他の項目にて整理

※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (13/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
第49条 原子炉格納容器内の冷却等のための設備	格納容器内自然対流冷却 (原子炉補機冷却水) (格納容器破損防止、フロントライン系故障時)	C, D-格納容器再循環ユニット	緩和設備	C/V	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却水ポンプ C, D-原子炉補機冷却水冷却器 原子炉補機冷却水サージタンク C, D-原子炉補機冷却水冷却器海水入口ストレーナ 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所：原子炉補機冷却水サージタンク加圧用可搬型窒素ガスボンベ、ホース等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ 配管等	緩和設備	CWP/B	○	建屋内
		可搬型温度計測装置	58条に記載		-	-
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	代替格納容器スプレィ (代替格納容器スプレィポンプ) (格納容器破損防止、フロントライン系故障時)	代替格納容器スプレィポンプ 燃料取替用水ビット 補助給水ビット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	代替格納容器スプレィ (代替格納容器スプレィポンプ) (代替電源) (格納容器破損防止、サポート系故障時)	代替格納容器スプレィポンプ 燃料取替用水ビット 補助給水ビット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器内自然対流冷却 (海水) (格納容器破損防止、サポート系故障時)	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、ホース延長・回収車(送水車用)、可搬型ホース等	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所：接続口、配管等	緩和設備	屋外A/B廻り及びR/B内	○	影響なし (2箇所は建屋内)
		C, D-格納容器再循環ユニット	緩和設備	C/V	○	建屋内
		可搬型温度計測装置 非常用取水設備	58条に記載 非常用取水設備に記載		- -	- -
	格納容器スプレィ 格納容器スプレィ再循環	格納容器スプレィポンプ 格納容器スプレィ冷却器 配管等	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ビット、配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		格納容器再循環サンブ 格納容器再循環サンブスクリーン 配管等	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
原子炉補機冷却設備		48条に記載		-	-	

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる(防止設備)
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (14/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	格納容器スプレィ (格納容器スプレィポンプ) (交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	格納容器スプレィポンプ 格納容器スプレィ冷却器 配管等	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
	格納容器内自然対流冷却 (原子炉補機冷却水) (交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	C, D-格納容器再循環ユニット	緩和設備	C/V	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却水ポンプ C, D-原子炉補機冷却水冷却器 原子炉補機冷却水サージタンク C, D-原子炉補機冷却水冷却器海水 入口ストレーナ	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: 原子炉補機冷却水サージタンク加圧用可搬型窒素ガスポンプ, ホース等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ C, D-原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ 配管等	緩和設備	CWP/B	○	建屋内
		可搬型温度計測装置	58条に記載		—	—
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—
	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	代替格納容器スプレィ (代替格納容器スプレィポンプ) (交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	代替格納容器スプレィポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○
C, D-格納容器再循環ユニット			緩和設備	C/V	○	建屋内
格納容器内自然対流冷却 (海水) (全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時)		可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 接続口, 配管等	緩和設備	屋外A/B廻り及びR/B内	○	影響なし (2箇所は建屋内)
		可搬型温度計測装置	58条に記載		—	—
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—
代替格納容器スプレィ (代替格納容器スプレィポンプ) (代替電源) (全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時)		代替格納容器スプレィポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる (防止設備)
 又は降下火砕物により損傷を考慮して, 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
 ※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (15/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響		
					評価	防護方法	
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	原子炉格納容器下部への注水 (格納容器スプレイポンプ)	格納容器スプレイポンプ 格納容器スプレイ冷却器 配管等	緩和設備	A/B	○	建屋内	
	(交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	燃料取替用水ピット, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
	原子炉格納容器下部への注水 (代替格納容器スプレイポンプ)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
	(交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—	
	原子炉格納容器下部への注水 (代替格納容器スプレイポンプ) (代替電源) (全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
溶融炉心の落下遅延・防止	炉心注水 (高圧注入ポンプ) 炉心注水 (余熱除去ポンプ) 炉心注水 (充てんポンプ) 代替炉心注水 (B-格納容器スプレイポンプ) 代替炉心注水 (代替格納容器スプレイポンプ) 代替炉心注水 (B-充てんポンプ)	47条に記載		—	—		
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	水素濃度低減 (原子炉格納容器内水素処理装置)	原子炉格納容器内水素処理装置 原子炉格納容器内水素処理装置温度監視装置	緩和設備	C/V	○	建屋内	
	水素濃度低減 (格納容器水素イグナイタ)	格納容器水素イグナイタ 格納容器水素イグナイタ温度監視装置	緩和設備	C/V	○	建屋内	
	水素濃度監視	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプ	可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプ	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置	可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: 格納容器空気サンプルライン隔離弁操作作用可搬型窒素ガスポンプ, ホース等	可搬箇所: 格納容器空気サンプルライン隔離弁操作作用可搬型窒素ガスポンプ, ホース等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車 (送水車用), 可搬型ホース等	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 接続口, 配管等	常設箇所: 接続口, 配管等	緩和設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内	○	影響なし (2箇所は建屋内)
格納容器雰囲気ガス試料採取設備, 配管等	格納容器雰囲気ガス試料採取設備, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内		
非常用取水設備	非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—		

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる (防止設備)
 又は降下火砕物により損傷を考慮して, 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
 ※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (16/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	アンユラス空気浄化設備による水素排出(交流動力電源及び直流電源が健全である場合)	アンユラス空気浄化ファン アンユラス空気浄化フィルタユニット, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	影響なし
	アンユラス空気浄化設備による水素排出(全交流動力電源又は直流電源が喪失した場合)	B-アンユラス空気浄化ファン B-アンユラス空気浄化フィルタユニット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: アンユラス全量排気弁等 作用可搬型窒素ガスポンペ, ホース等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	影響なし
	水素濃度監視	可搬箇所: 可搬型アンユラス水素濃度計測ユニット, ホース等	緩和設備	R/B	○	建屋内
第54条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	使用済燃料ピットへの注水	可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車(送水車用), 可搬型ホース等	防止設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	使用済燃料ピットへのスプレイ	可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車(送水車用), 可搬型スプレイノズル, 可搬型ホース等	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	燃料取扱棟(貯蔵槽内燃料体等)への放水	可搬型大容量海水送水ポンプ車, 可搬型ホース等 放水砲	55条に記載		-	-
	使用済燃料ピットの監視	使用済燃料ピット水位(AM用) 使用済燃料ピット温度(AM用)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
使用済燃料ピット水位(可搬型) 使用済燃料ピット可搬型エリアモナタ		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
使用済燃料ピット監視カメラ (使用済燃料ピット監視カメラ空冷装置(注)を含む。)		防止設備・緩和設備	R/B, A/B	○	建屋内	
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	大気への拡散抑制(炉心の著しい損傷, 原子炉格納容器及びアンユラス部の破損又は使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時)	可搬型大容量海水送水ポンプ車, 可搬型ホース等 放水砲	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	海洋への拡散抑制(炉心の著しい損傷, 原子炉格納容器及びアンユラス部の破損又は使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時)	集水桝シルトフェンス	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる(防止設備)
 又は降下火砕物により損傷を考慮して, 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
 ※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (17/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
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	大気への拡散抑制 (使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時)	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、ホース延長・回収車(送水車用)、可搬型スプレイノズル、可搬型ホース等	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
	航空機燃料火災への泡消火	可搬型大容量海水送水ポンプ車、放水砲、泡混合設備、可搬型ホース等	緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
第56条 重大事故等の収束に必要な水の供給設備	重大事故等の収束のための水源 ※水源としては、海も使用可能	補助給水ピット 燃料取替用水ピット	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		ほう酸タンク	44条に記載		-	-
	水の供給(代替淡水源又は海を水源)	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、ホース延長・回収車(送水用)、可搬型大容量海水送水ポンプ車、可搬型ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備・緩和設備	A/B, R/B	○	建屋内
		常設箇所：接続口、配管等	防止設備・緩和設備	屋外A/B廻り及びR/B内	○	影響なし (2箇所は建屋内)
	水の供給(原子炉格納容器を水源)	非常用取水設備	非常用取水設備に記載		-	-
		格納容器スプレイポンプ	47条及び49条に記載		-	-
		高圧注入ポンプ	47条に記載		-	-
第57条 電源設備	常設代替交流電源設備による給電	代替非常用発電機	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽 燃料タンク(SA)	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ、 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型タンクローリー、ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		代替格納容器スプレイポンプ変圧器盤	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
	可搬型代替交流電源設備による給電	可搬箇所：可搬型代替電源車	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所：接続盤	防止設備・緩和設備	屋外R/B及びA/B廻り	○	影響なし (適切に除灰)
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽 燃料タンク(SA)	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ、 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型タンクローリー、ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
代替格納容器スプレイポンプ変圧器盤	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内		

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる(防止設備)

又は降下火砕物により損傷を考慮して、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)

一：他の項目にて整理

※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (18/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
第57条 電源設備	所内常設蓄電池 直流電池設備による給電	蓄電池（非常用）、後備蓄電池、A充電器、B充電器	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型直流電源用発電機	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
	可搬型代替直流電源設備による給電	可搬箇所：可搬型直流変換器	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		常設箇所：接続盤	防止設備・緩和設備	屋外R/B及び A/B廻り	○	影響なし (適切に除灰)
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽 燃料タンク (SA)	防止設備・緩和設備	屋外 (地下)	○	影響なし
		可搬箇所：可搬型タンクローリー、ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
	代替所内電気設備による給電	代替非常用発電機	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
		可搬型代替電源車	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所：接続盤	防止設備・緩和設備	屋外R/B及び A/B廻り	○	影響なし (適切に除灰)
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽 燃料タンク (SA)	防止設備・緩和設備	屋外 (地下)	○	影響なし
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ、 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型タンクローリー、ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		代替所内電気設備変圧器 代替所内電気設備分電盤 代替格納容器スプレイポンプ変圧器盤	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
	燃料補給設備	ディーゼル発電機燃料油貯油槽 燃料タンク (SA)	防止設備・緩和設備	屋外 (地下)	○	影響なし
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ、 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型タンクローリー、ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備 保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
	非常用交流電源設備	ディーゼル発電機 ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ ディーゼル発電機燃料油サービスタ ンク 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外 (地下)	○	影響なし
		原子炉補助冷却設備	48条に記載		-	-

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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）
 ー：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (19/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所*	火山の影響		
				評価	防護方法	
第58条 計装設備	温度計測（原子炉容器内の温度）	1次冷却材温度（広域－高温側） 1次冷却材温度（広域－低温側）	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	圧力計測（原子炉容器内の圧力）	1次冷却材圧力（広域）	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	水位計測（原子炉容器内の水位）	加圧器水位 原子炉容器水位	防止設備	C/V	○	建屋内
	注水量計測（原子炉容器への注水量）	高压注入流量 低压注入流量	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
		代替格納容器スプレィポンプ出口積算流量 B－格納容器スプレィ冷却器出口積算流量（AM用）	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
	注水量計測（原子炉格納容器への注水量）	代替格納容器スプレィポンプ出口積算流量 B－格納容器スプレィ冷却器出口積算流量（AM用）	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		高压注入流量 低压注入流量	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内
	温度計測（原子炉格納容器内の温度）	格納容器内温度	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	圧力計測（原子炉格納容器内の圧力）	原子炉格納容器圧力 格納容器圧力（AM用）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	水位計測（原子炉格納容器内の水位）	格納容器再循環サンプ水位（広域） 格納容器再循環サンプ水位（狭域）	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
		格納容器水位 原子炉下部キャビティ水位	緩和設備	C/V	○	建屋内
	水素濃度計測（原子炉格納容器内の水素濃度）	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット（格納容器内水素濃度）	緩和設備	R/B	○	建屋内
	水素濃度計測（アニュラス内の水素濃度）	可搬型アニュラス水素濃度計測ユニット（アニュラス水素濃度（可搬型））	緩和設備	R/B	○	建屋内
	線量計測（原子炉格納容器内の放射線量率）	格納容器内高レンジエリアモニタ（低レンジ） 格納容器内高レンジエリアモニタ（高レンジ）	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	出力計測（未臨界の維持又は監視）	出力領域中性子束 中間領域中性子束 中性子源領域中性子束	防止設備	C/V	○	建屋内
	温度計測（最終ヒートシンクの確保）	可搬型温度計測装置（格納容器再循環ユニット入口温度／出口温度）	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所	○	建屋内
	水位計測（最終ヒートシンクの確保）	蒸気発生器水位（狭域） 蒸気発生器水位（広域）	（設計基準対象施設）	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却水サージタンク水位	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	注水量計測（最終ヒートシンクの確保）	補助給水流量	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	圧力計測（最終ヒートシンクの確保）	原子炉格納容器圧力	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
主蒸気ライン圧力		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内	
原子炉補機冷却水サージタンク圧力（可搬型）		防止設備・緩和設備	R/B 緊急時対策所	○	建屋内	

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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）
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (20/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響		
					評価	防護方法	
第58条 計装設備	水位計測 (格納容器バイパスの監視)	蒸気発生器水位 (狭域)	防止設備	C/V	○	建屋内	
	圧力計測 (格納容器バイパスの監視)	主蒸気ライン圧力	防止設備	R/B	○	建屋内	
		1次冷却材圧力 (広域)	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内	
	水位計測 (水源の確保)	燃料取替用水ピット水位	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
		ほう酸タンク水位	防止設備	A/B	○	建屋内	
		補助給水ピット水位	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
	水位計測 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット水位 (AM用)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
		使用済燃料ピット水位 (可搬型)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	温度計測 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット温度 (AM用)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	線量計測 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット可搬型エリアモニタ	防止設備・緩和設備	R/B, A/B	○	建屋内	
	状態監視 (使用済燃料ピットの監視)	使用済燃料ピット監視カメラ (使用済燃料ピット監視カメラ空冷装置 (注)を含む。)	防止設備・緩和設備	R/B, A/B	○	建屋内	
	温度, 圧力, 水位及び流量に係わるものの計測	可搬型計測器	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所	○	建屋内	
	パラメータ記録	可搬型温度計測装置 (格納容器再循環ユニット入口温度/出口温度)		防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所	○	建屋内
		データ収集計算機		緩和設備	A/B	○	建屋内
		データ表示端末		緩和設備	緊急時対策所	○	建屋内
	その他	6-A, B母線電圧 A, B-直流コントロールセンタ母線電圧		(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
A-高圧注入ポンプ及び油冷却器補機冷却水流量 (AM用) A-高圧注入ポンプ電動機補機冷却水流量 (AM用)		防止設備	A/B	○	建屋内		
原子炉補機冷却水冷却器補機冷却海水流量 (AM用) A, B-原子炉補機冷却水供給母管流量 (AM用)		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内		

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる (防止設備)

又は降下火砕物により損傷を考慮して、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)

一: 他の項目にて整理

※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (21/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
第59条 運転員が原子炉制御室にとどまるための設備	居住性の確保	中央制御室	(重大事故等対処施設)	A/B	○	建屋内
		中央制御室遮へい 中央制御室非常用循環ファン 中央制御室給気ファン 中央制御室循環ファン 中央制御室非常用循環フィルタユニット 中央制御室給気ユニット, ダクト等	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		可搬型照明(SA) 酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	汚染の持ち込み防止	可搬型照明(SA)	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	放射性物質の濃度低減 (交流動力電源及び直流電源が健全である場合)	アニュラス空気浄化ファン アニュラス空気浄化フィルタユニット, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	影響なし
	放射性物質の濃度低減 (全交流動力電源又は直流電源が喪失した場合)	B-アニュラス空気浄化ファン B-アニュラス空気浄化フィルタユニット, ダクト等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所: アニュラス全量排気弁等操作用 可搬型窒素ガスポンプ, ホース等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	影響なし
	第60条 監視測定設備	モニタリングポストの代替測定	可搬型モニタリングポスト	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所	○
放射能観測車の代替測定		可搬型ダスト・よう素サンブラ NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ GM汚染サーベイメータ	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所	○	建屋内
放射線量の測定		可搬型モニタリングポスト 電離箱サーベイメータ	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所	○	建屋内
		小型船舶	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
放射性物質濃度(空气中・水中・土壌中)及び海上モニタリング		可搬型ダスト・よう素サンブラ NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ GM汚染サーベイメータ α線シンチレーションサーベイメータ β線サーベイメータ	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所	○	建屋内
		小型船舶	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
気象観測設備の代替測定		可搬型気象観測設備	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所	○	建屋内
緊急時対策所付近の気象観測項目の測定		可搬型気象観測設備	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所	○	建屋内

凡例 ○: 降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる(防止設備)

又は降下火砕物により損傷を考慮して, 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)

一: 他の項目にて整理

※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (22/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
第61条 緊急時対策所	居住性の確保	緊急時対策所	(重大事故等対処施設)	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
		緊急時対策所指揮所遮へい 緊急時対策所待機所遮へい	緩和設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
		可搬箇所：可搬型新設緊急時対策所空気 浄化ファン 可搬型新設緊急時対策所空気浄化フィル タユニット、配管等	緩和設備	緊急時対策所	○	建屋内
		常設箇所：配管等	緩和設備	緊急時対策所内及 び屋外緊急時対策 所廻り	○	影響なし (適切に除灰)
		可搬箇所：空気供給装置（空気ポン プ）、配管等	緩和設備	緊急時対策所	○	建屋内
		常設箇所：配管等	緩和設備	緊急時対策所内及 び屋外緊急時対策 所廻り	○	影響なし (適切に除灰)
		圧力計 酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設 備	緊急時対策所	○	建屋内
		緊急時対策所可搬型エリアモニタ	緩和設備	緊急時対策所	○	建屋内
		可搬型モニタリングポスト 可搬型気象観測設備	60条に記載		—	—
	必要な情報の 把握	データ収集計算機 ERSS 伝送サーバ データ表示端末	62条に記載	—	—	—
	電源の確保 (緊急時対策 所)	可搬箇所：緊急時対策所用発電機	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所：接続盤	防止設備・緩和設備	緊急時対策所内及 び屋外緊急時対策 所廻り	○	影響なし (適切に除灰)
	通信連絡 (緊急時対策 所)	衛星電話設備（固定型） 衛星電話設備（FAX） 衛星電話設備（携帯型） 無線連絡設備（固定型） 無線連絡設備（携帯型） インターフォン テレビ会議システム（指揮所・待機所 間） 統合原子力防災ネットワークを用いた通 信連絡設備	62条に記載	—	—	—

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (23/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
第62条 通信連絡を行うために必要な設備	発電所内の通信連絡	衛星電話設備 (固定型) 衛星電話設備 (携帯型)	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし。屋外設備は除灰により機能維持可能
		無線連絡設備 (固定型) 無線連絡設備 (携帯型)	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし。屋外設備は除灰により機能維持可能
		携行型通話装置	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		インターフォン テレビ会議システム (指揮所・待機所間)	防止設備・緩和設備	緊急時対策所	○	建屋内
		データ収集計算機	緩和設備	A/B	○	建屋内
		データ表示端末	緩和設備	緊急時対策所	○	建屋内
	発電所外の通信連絡	衛星電話設備 (固定型) 衛星電話設備 (FAX) 衛星電話設備 (携帯型)	緩和設備	A/B 緊急時対策所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし。屋外設備は除灰により機能維持可能
		統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備	防止でも緩和でもない設備	A/B 緊急時対策所	○	建屋内
		データ収集計算機 ERSS 伝送サーバ	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる

又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる (防止設備)

又は降下火砕物により損傷を考慮して、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)

一：他の項目にて整理

※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

表1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (24/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	火山の影響	
					評価	防護方法
1次冷却設備	1次冷却設備	蒸気発生器 1次冷却材ポンプ 原子炉容器（炉心支持構造物を含む） 加圧器 1次冷却材管 加圧器サージ管	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
原子炉格納容器	原子炉格納容器	原子炉格納容器	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
燃料取扱及び貯蔵設備	使用済燃料貯蔵槽	使用済燃料ピット	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
非常用取水設備	非常用取水設備	貯留堰 取水口 取水路 取水ピットスクリーン室 取水ピットポンプ室	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし

凡例 ○：降下火砕物に対し安全機能を維持できる
 又は降下火砕物による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が降下火砕物に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は降下火砕物により損傷を考慮して、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）
 ー：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

以上

水質汚染に対する補給水等への影響について

1. 外部から供給される水源の概略系統及び供給先

純水を補給する設備には、燃料取替用水ピット及び原子炉補機冷却水サージタンクがあるが、点検時の水張りや系統内でリークが生じた際に補給等が必要になるもので、降下火砕物襲来時に補給が必要となるものではない。

しかし、降下火砕物が海水に混入することによる、水質汚染（補給水等の汚染）が考えられることから以下のとおり確認した。

泊発電所3号炉は海水を取水源としており、図1に示すとおり、海水はまず海水淡水化設備に受け入れられる。海水淡水化設備に受け入れられた海水は、海水淡水化設備のろ過器と逆浸透膜を經由してろ過水タンクへ移送されるが、この過程で降下火砕物粒子は除去される。プラント系統に補給されるろ過水は純水装置を經由し2次系純水タンクに移送されるが、この過程で降下火砕物が水に濡れた場合に溶出すると考えられるイオン成分は脱塩処理される。

また、海水淡水化設備のろ過器が降下火砕物粒子によって差圧が上昇した場合には逆洗により再生が可能であり、また、純水装置の脱塩装置がイオン成分処理によってイオン交換能力が低下した場合には再生剤による再生が可能である。

さらに、ろ過水タンク及び2次系純水タンクにおいて水質管理も行っていることから、海水が適切に処理されていることを確認した上で使用することができる。

以上から、海水に降下火砕物が混入した場合にも、各負荷に補給される水の水質に影響を及ぼすことはない。

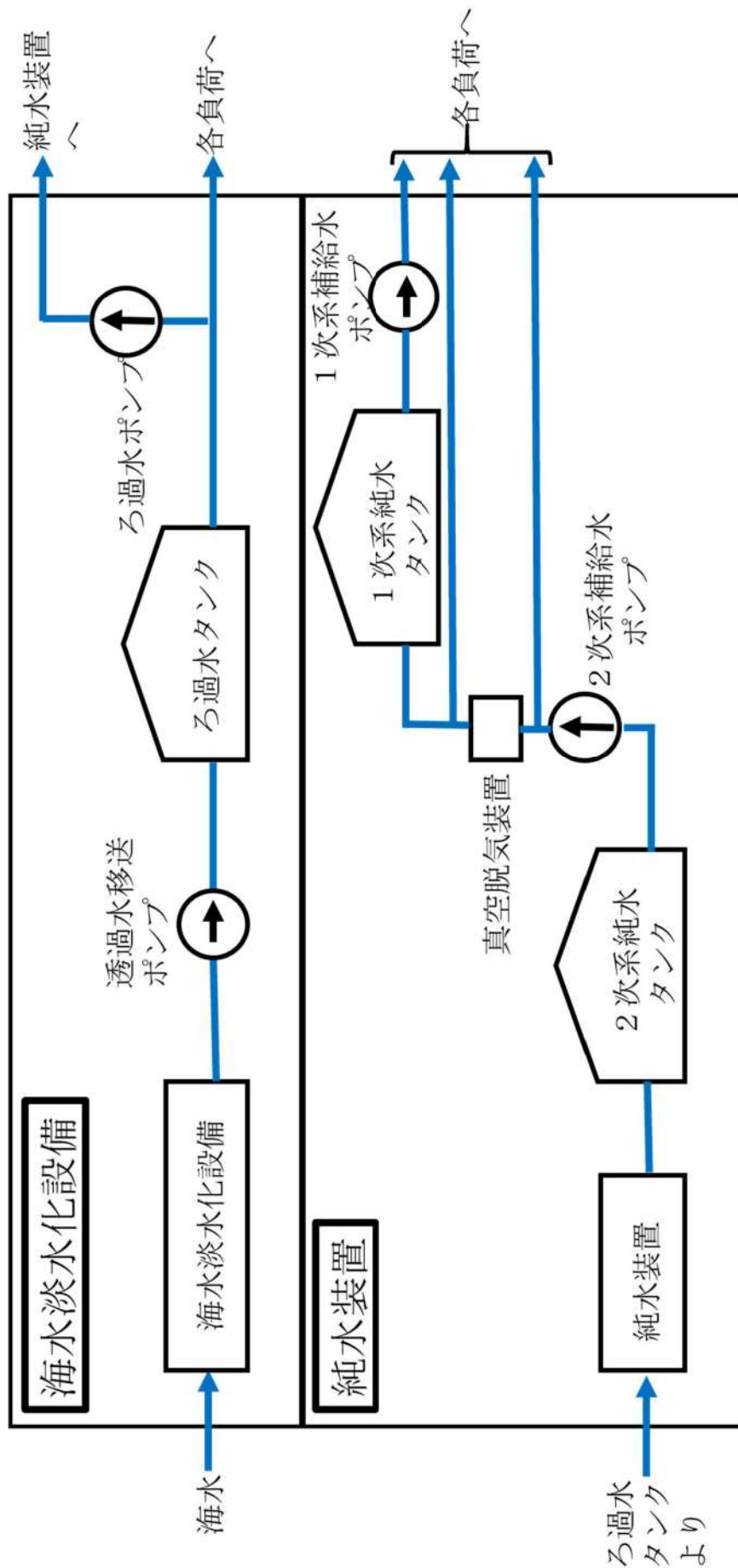


図1 外部から供給される水源の概略系統図（泊発電所3号炉）

以上

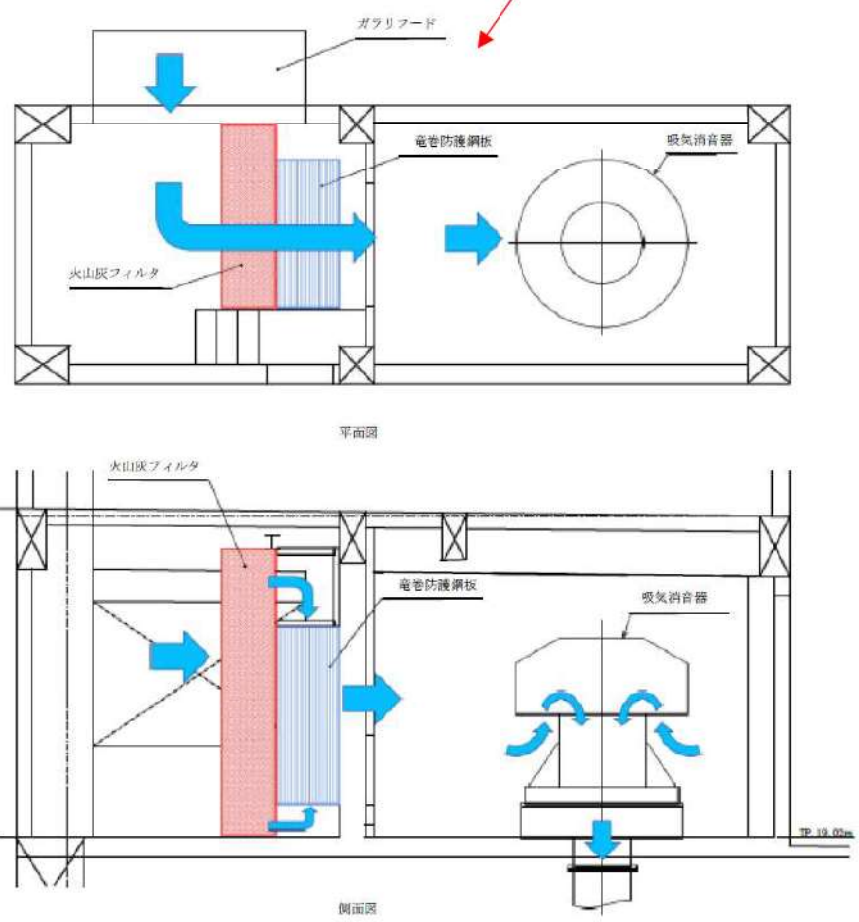
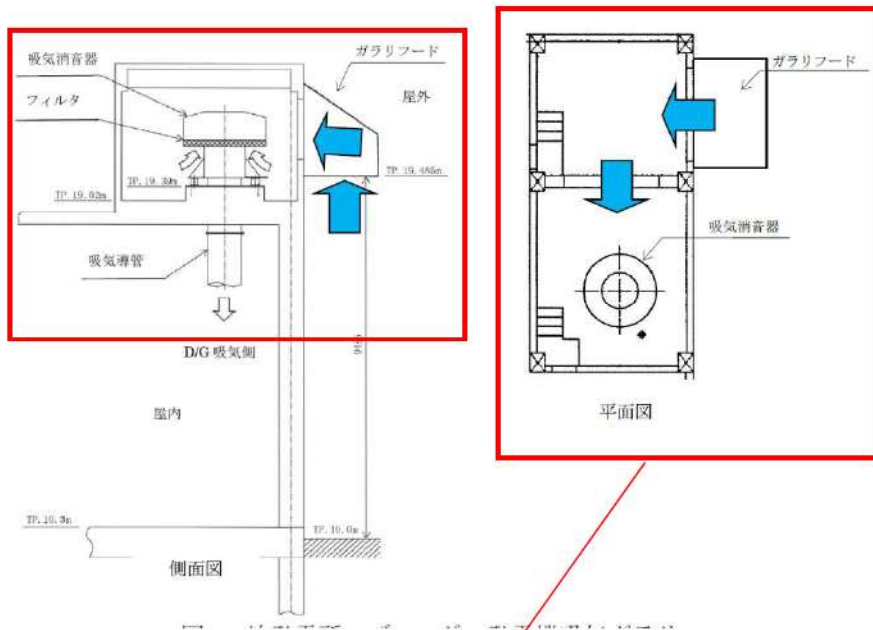
気中降下火砕物の対策に係る検討状況について

平成 29 年 12 月 14 日に実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（以下「実用炉規則」という。）の一部改正で追加され、その後、令和 2 年 1 月 23 日に改正された、火山影響等発生時における発電用原子炉施設の保全のための活動を行う体制の整備については、保安規定認可までに対応を図る。現在の対応状況を表 1 に示す。

表 1 実用炉規則の一部改正に関する対応状況

条項	規則	対応状況
第 83 条 第 1 号	次に掲げる事象の区分に応じてそれぞれ次に定める事項を含む発電用原子炉施設の必要な機能を維持するための活動に関する計画を定めるとともに、当該計画の実行に必要な要員を配置し、当該計画に従って必要な活動を行わせること。	—
ロ	火山現象による影響	
(1)	火山現象による影響が発生し、又は発生するおそれがある場合（以下この号において「火山影響等発生」という。）における非常用交流動力電源設備の機能を維持するための対策に関すること。	非常用ディーゼル発電機の吸気ラインに火山灰フィルタの設置等の対策を行う。
(2)	(1)に掲げるもののほか、火山影響等発生時における代替電源設備その他の炉心を冷却するために必要な設備の機能を維持するための対策に関すること。	炉心を冷却するための設備として、タービン動補助給水ポンプにより対応する。
(3)	(2)に掲げるもののほか、火山影響等発生時に交流動力電源が喪失した場合における炉心の著しい損傷を防止するための対策に関すること。	代替電源設備の吸気ラインに火山灰対策を行う。

「実用炉規則第 83 条第 1 号」の対応としては、図 1 の手段が考えられる。今後、気中降下火砕物濃度の環境下において、ディーゼル発電機の機能を維持するため最適な対策を検討し、保安規定認可までに対応を行う。



以上

泊発電所における気中降下火砕物濃度の算出について

1. 降下火砕物濃度の推定手法

試算に用いる大気中の降下火砕物濃度は、「原子力発電所の火山影響評価ガイド（令和元年12月18日改正）」（以下「ガイド」という。）の添付1「気中降下火砕物濃度の推定手法について」に定められた手法により推定した気中降下火砕物濃度とする。ガイドに定められている手法は以下の2つである。

- a. 降灰継続時間を仮定して、降灰量から気中降下火砕物濃度を推定する手法
- b. 数値シミュレーションにより気中降下火砕物濃度を推定する手法

2. 気中降下火砕物濃度の算出

泊発電所では、上記手法のうちaの手法により気中降下火砕物の濃度を推定した。本手法は、原子力発電所の敷地において発電所の運用期間中に想定される降下火砕物が降灰継続時間（24時間）に堆積したと仮定し、降下火砕物の粒径の割合から求められる粒径ごとの堆積速度と終端速度から算出される粒径ごとの気中濃度の総和を気中降下火砕物濃度として求める。以下に計算方法を示す。

泊発電所における入力条件及び計算結果を表1，2に示す。

粒径 i の降下火砕物の降灰量 W_i は

$$W_i = p_i W_T \quad (p_i : \text{粒径 } i \text{ の割合 } W_T : \text{総降灰量}) \cdots (A)$$

で表され、粒径 i の堆積速度 v_i は

$$v_i = \frac{W_i}{t} \quad (t : \text{降灰継続時間}) \cdots (B)$$

粒径 i の気中濃度 C_i は

$$C_i = \frac{v_i}{r_i} \quad (r_i : \text{粒径 } i \text{ の降下火砕物の終端速度}) \cdots (C)$$

で表され、気中降下火砕物濃度 C_T は

$$C_T = \sum_i C_i \cdots (D)$$

となる。

表 1 気中降下火砕物濃度の入力条件及び計算結果

	入力条件	数値	備考
①	降灰継続時間 t [h]	24	ガイドより
②	堆積層厚 [cm]	20	泊発電所で想定する降下火砕物堆積量
③	降下火砕物密度 [g/cm ³]	1	Tephra2 における設定値
④	降下火砕物の総降灰量 W_T [g/m ²]	200,000	②×③×10 ⁴
⑤	粒径ごとの降灰量 W_i [g/m ²]	表 2 参照	粒径の割合はTephra2 によるシミュレーション結果を使用
⑥	粒径ごとの堆積速度 v_i [g/s・m ²]	表 2 参照	(B) 式
⑦	粒径ごとの終端速度 r_i [m/s]	表 2 参照	Suzuki (1983) 参考
⑧	粒径ごとの気中濃度 C_i [g/m ³]	表 2 参照	(C) 式
⑨	気中降下火砕物濃度 C_T [g/m ³]	3.7	(D) 式

表 2 粒径ごとの入力条件及び計算結果

粒径 $i\phi$ (μm)	-1~0 (1,414)	0~1 (707)	1~2 (354)	2~3 (177)	3~4 (88)	4~5 (44)	5~6 (22)	6~7 (11)	合計
割合 P_i (wt%)	2.5×10^{-12}	0.80	49.7	42.8	6.6	0.18	4.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	
降灰量 W_i (g/m ²)	5.0×10^{-9}	1591	99,420	85,501	13,123	358	8	0.2	$W_T=200,000$
堆積速度 v_i (g/(s・m ²))	5.8×10^{-14}	0.02	1.2	0.99	0.15	4.1×10^{-3}	9.3×10^{-5}	2.3×10^{-6}	
終端速度 r_i (cm/s)	250	180	100	50	35	10	3	1	
気中濃度 C_i (g/m ³)	2.3×10^{-14}	1.0×10^{-2}	1.2	2.0	0.43	4.1×10^{-2}	3.1×10^{-3}	2.3×10^{-4}	$C_T=3.7$

降下火砕物と積雪荷重との組合せについて

火山（降下火砕物）と積雪は相関性が低い事象同士の組合せであるが、重畳した場合には堆積荷重が増加することになるため、組合せを考慮することとしている。以下に火山（降下火砕物）と組み合わせる際の積雪荷重の設定について整理する。

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、設計上考慮すべき荷重評価における自然現象の組合せとして、降下火砕物による荷重及び積雪による荷重の組合せを設定している。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）の和として作用の組合せを考慮する Turkstra の法則^{*1} の考え方に基づき設定している。この考え方は、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 等でも採用されている。

積雪荷重は降下火砕物による荷重に対して、発生頻度が相対的に高く、また、荷重が大きく、安全機能への影響が大きくなると考えられることから主事象として扱い、設計基準で想定している積雪荷重（積雪 189cm）を設定する。降下火砕物は発生頻度が主荷重（積雪）と比べて相対的に低く、また、荷重は主荷重に比べて小さく安全機能への影響も主荷重に比べて小さいと考えられるため、主事象に対して考慮する副事象として扱うこととする。なお、別紙-1に降下火砕物による荷重を主荷重、積雪荷重を従荷重と想定した場合の確認結果を示す。

2. 従荷重として組み合わせる降下火砕物による荷重の設定方法

副事象である降下火砕物による荷重は、積雪荷重のように平均値を求める

ことが困難であるため、副事象として考慮する場合は、基準降下火砕物堆積量の設定において想定する噴火規模から1段階下げた噴火規模を考慮する。噴火規模を1段階下げた場合、降下火砕物堆積量は10分の1になることから基準降下火砕物堆積量の層厚20cmの10分の1である層厚2cmによる荷重を想定する。別紙-2に副事象として降下火砕物による荷重を設定する際に噴火規模を1段階下げた降下火砕物堆積量を想定することの妥当性について示す。

[参考文献]

- ※1:建築物荷重指針・同解説(2015)(2章荷重の種類と組合せ,付5.5 許容応力度設計に用いる組合せ荷重のための荷重係数)

降下火砕物による荷重を主荷重，積雪荷重を従荷重と想定した場合の確認結果

火山（降下火砕物）と積雪の組合せは補足資料—17 に示すように，積雪荷重を主荷重，降下火砕物による荷重を従荷重として設定している。

これに対して，降下火砕物による荷重を主事象（主荷重），積雪荷重を副事象（従荷重）と想定した場合について確認する。

1. 評価条件

主事象である降下火砕物による荷重は設計基準値（20cm）の荷重とする。

主荷重である降下火砕物に対して組み合わせる積雪荷重の平均値については，関連する規格・基準等を踏まえて，以下のとおり検討を行った。

(1) 確率過程的に平均値な積雪量を求める

副事象として想定する積雪荷重の考え方として高橋^{*1}が Turkstra の法則に従って，荷重の組合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，年最深積雪の 100 年再現期間期待値と積雪荷重の荷重係数の関係に対して，積雪日数の平年値を横軸とした場合の関係を示している（図 1 参照）。これは，一年間のうち，いつ襲来するか明らかでない荷重（例えば地震荷重等）と積雪荷重を組み合わせる場合の荷重係数を示している。泊発電所の近隣である寿都特別地域気象観測所の観測データより，積雪日数の最大値が 149 日（観測期間 1961 年～2022 年において）であることを踏まえると，この場合の荷重係数は近似式より約 0.14 となる。設計基準値の積雪量を考慮した場合には，組み合わせる積雪量は約 26.5cm（189cm×0.14）と算出される。

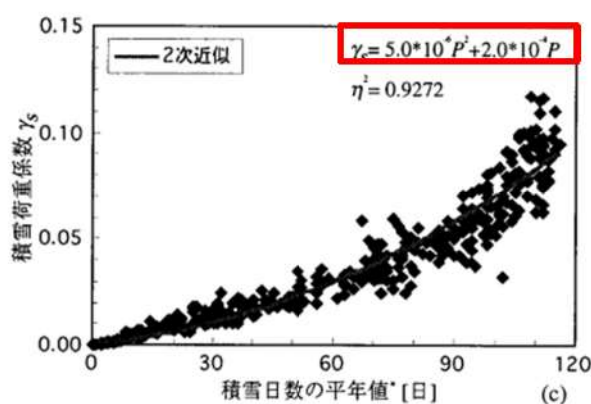


図 1 積雪荷重が従となる場合に掛け合わせる荷重係数^{*2}（赤枠は追記）

(2) 建築基準法の考え方を準用して平均値を求めた場合

建築基準法では、多雪地域において主荷重である地震・暴風と組み合わせる場合の平均的な積雪量として、短期積雪荷重の 0.35 倍の積雪量を考慮することとしており、算出される平均的な積雪量は約 66.2cm（設計基準積雪量 189cm × 0.35）であることを確認した。

(3) 観測記録により年最深積雪の平均値を求めた場合

副事象として想定する積雪荷重について、平均的な積雪荷重の一般的な設定方法として最寄りの気象観測所における年最深積雪の平均値を求める方法がある。泊発電所の最寄りの気象観測所である寿都における年最深積雪の平均値は気象観測データ（観測期間：1961年～2022年）より 75.2cm であることを確認した。

検討の結果、算出される平均的な積雪量は、観測記録により年最深積雪の平均値を求めた場合（75.2cm）が最も大きな値となることを確認した。

2. 火山影響評価ガイドを踏まえて考慮すべき事項

「原子力発電所の火山影響評価ガイド」（以下、火山影響評価ガイドという）において、降雨、積雪などの自然現象は、火山灰等の堆積物の静的負荷を著しく増大させる可能性があるとしていることから、乾燥状態の降下火砕物の密度（ 0.7g/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（ 1.5g/cm^3 ）を設定し、更に 75.2cm の積雪荷重を組み合わせることとしている。

また、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し、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。

以上の検討より、泊発電所における降下火砕物の荷重に組み合わせる積雪荷重の積雪量は、発電所立地の最寄りの気象観測所である寿都地域における年最深積雪の平均値（75.2cm）を採用する方針とする。

3. 評価結果

評価結果は表 1 に示すとおりであり、降下火砕物による荷重を主事象（主荷重）、積雪荷重を副事象（従荷重）と想定した場合の評価（ケース 2）は、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」の荷重の組合せで設定している評価（ケース 1）に対して小さいことを確認した。

表 1 組合せ荷重の評価結果

ケース	主事象	副事象	堆積荷重(N/m ²)	備考
1	積雪(189cm)	降下火砕物(2cm)	5,970	—
2	降下火砕物(20cm)	積雪(75.2cm)	5,256	—

[参考文献]

※1：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)）

降下火砕物による荷重を従荷重とした場合における設定方法について

泊発電所3号炉の積雪荷重（主荷重）及び降下火砕物による荷重（従荷重）の組合せの評価においては、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）の和として作用の組合せを考慮する Turkstra の法則の考え方にに基づき設定している。

主事象の最大値には既往最大の積雪量による荷重、副事象の任意時点の値には降下火砕物堆積量による荷重とするが、降下火砕物堆積量については積雪のように観測記録が十分ではなく、平均値を求めることが困難であるため、想定する噴火規模から1段階下げた噴火規模を考慮した値としている。

ここでは、従荷重として降下火砕物による荷重を設定する際に噴火規模を1段階下げることについての妥当性について、組合せ事象の年超過確率（1年間でそのような事象が発生する確率）の比較で検討を行った。

具体的には以下の組合せ事象の年超過確率の比較を行った。

- ①設計基準の降下火砕物堆積量（想定される噴火規模）と年平均積雪量の組合せ
- ②設計基準より噴火規模を1段階下げた降下火砕物堆積量と既往最大の積雪量の組合せ

設計基準の噴火規模の年超過確率を Eva 、噴火規模を1段階下げた噴火規模の年超過確率を Evb 、既往最大の積雪量となる年超過確率を Esa 、平均の積雪量となる年超過確率を Esb とすると、①の年超過確率は $Eva \times Esb$ 、②の年超過確率は $Evb \times Esa$ となる。

ここで Eva と Evb は図2に示す文献^{*1}の噴火規模及び発生頻度の関係より以下の関係となる。

$$Evb = 10^{0.78} \times Eva = 6.026 \times Eva \cdots (1)$$

つまり

$$Eva = 1/6.026 \times Evb \cdots (2)$$

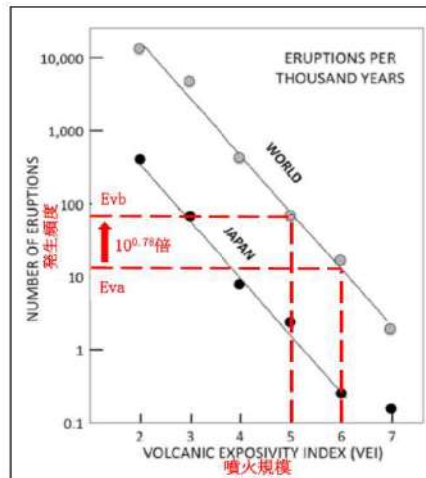


図2 噴火規模と発生頻度の関係

一方、積雪の観測記録から求めた年超過確率である E_{sa} 及び E_{sb} はそれぞれ以下の通りである。

$$E_{sa}=0.016 \cdots (3)$$

$$E_{sb}=0.5 \cdots (4)$$

以上、(1)～(4)より①及び②の年超過確率の関係は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \text{①の年超過確率} &= E_{va} \times E_{sb} \\ &= 1/6.026 \times E_{vb} \times 0.5 \\ &= 1/6.026 \times E_{vb} \times 0.5 \times E_{sa}/0.016 \\ &= 1/6.026 \times 0.5/0.016 \times E_{vb} \times E_{sa} \\ &= 5.19 \times \text{②の年超過確率} \end{aligned}$$

②の年超過確率は①の年超過確率よりもかなり小さいことが分かる。仮に①の年超過確率と同じ年超過確率となるA段階下げた噴火規模を想定すると以下の関係となる。

$$\begin{aligned} \text{①の年超過確率/噴火規模をA段階下げた場合の年超過確率} \\ = 1/(6.026)^A \times 0.5/0.016 = 1 \cdots (5) \end{aligned}$$

(5) より

$$A=1.91$$

噴火規模を 1.9 段階程度下げた場合において①と同じ年超過確率となることから、従荷重として降下火砕物による荷重を設定する際に噴火規模を1段階下げた噴火規模に設定することは安全側の設定であり妥当である。

[参考文献]

※1：中田節也：日本の火山噴火の現状と低頻度大規模噴火に備えた研究のあり方（日本学術協力財団 学術の動向 19巻9号（2014年9月））

降灰時の外部支援及び開閉所の除灰の成立性検討について

泊発電所3号炉における降灰時の間接的影響（長期間の外部電源喪失及び交通の途絶）に対して、外部からの支援については、技術的能力1.0支援に係わる事項において、事象発生後6日間までに発電所外からの支援受けられるよう支援計画を定め、体制を整備する。また、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日間分の非常用交流電源設備の燃料を有しており、燃料油貯油槽への燃料補給なしで運転が継続できる。その後は外部からの燃料油貯油槽への燃料補給や開閉所の除灰を実施し、外部電源の受電を行うことで、継続して電源を確保することとしているが、外部からの支援を受け入れるために開閉所の除灰、及び所内の燃料補給ルート確保が必要であることから、これらの成立性について検討を行った。

1. 開閉所の降灰除去

泊発電所の開閉所は、高台に建設されており、送電線との接続部は屋根付き構造の遮風建屋で覆われており、降下火砕物による影響は受けにくくなっている。

また、遮風建屋は屋上へのアクセスが可能であり、必要に応じて除灰が可能である。

引込み線の碍子に降下火砕物が付着することが考えられるが、系統隔離の上、清掃することにより、影響を緩和できる。



図1 開閉所（遮風建屋）

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、敷地内に設計層厚である 20cm の降下火砕物が堆積した場合において、タンクローリ等による燃料の陸送を想定し、茶津守衛所から燃料油貯油槽までの燃料補給ルートの除灰成立性検討を行った。

(1) 除灰方法の概要

図 2 に示す茶津守衛所から燃料油貯油槽までの燃料補給ルートに降り積もった灰を当社所有のホイールローダで道路脇へ押土する。なお、茶津守衛所から燃料油貯油槽までの燃料補給ルートを含むアクセスルート（車両）全体で評価を行うこととする。

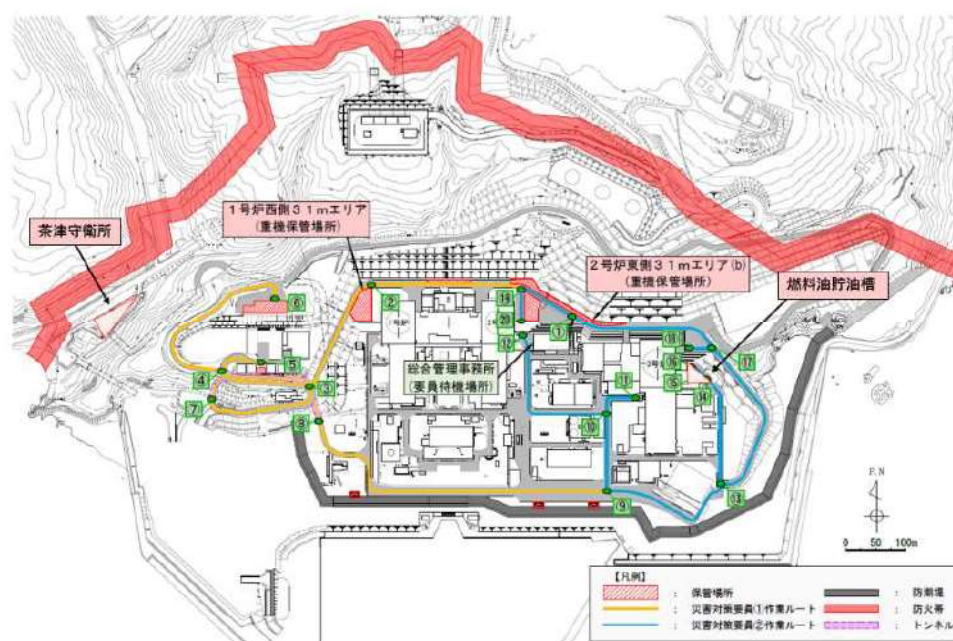


図 2 燃料補給ルート

(2) 評価条件

a. 降下火砕物条件

- ・堆積量：20cm，密度：1.5g/cm³（湿潤密度）

b. ホイールローダの仕様

- ・最大押し出し可能重量：4.5 t
（がれき撤去試験より 4.5t 押し出せることを確認済み）
- ・バケット全幅：337cm
- ・走行速度（1速）：前進 11.6km/h，後進 11.6km/h

c. 除灰距離

- ・災害対策要員①作業ルート：3.3km
- ・災害対策要員②作業ルート：2.3km

d. 除灰時間の算出方法

ホイールローダが降下火砕物を道路脇に押し出す作業を1サイクルとして、ホイールローダの除灰能力から、除灰速度を算出し、燃料補給ルートを含むアクセスルート（車両）全体の除灰時間を算出する。

なお、災害対策要員2名が別々のルートを並行して除灰する。

(3) 算出結果

注1：1サイクルの除灰時間の考え方

- ・1サイクル当りの作業時間は、作業速度（1速の走行速度である前進 11.6 km/h，後進 11.6km/h の平均 5.8km/h（前進），5.8km/h（後進））で作業すると仮定して

A：押し出し（①→②→③）： $(2\text{ m} + 5\text{ m}) \div 5.8\text{ km/h} = 4.3\text{ 秒} \approx 5\text{ 秒}$

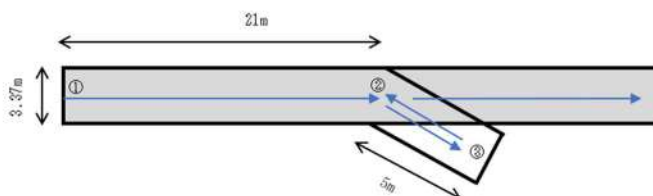
B：ギア切替え：3秒

C：後進（③→②）： $5\text{ m} \div 5.8\text{ km/h} = 3.1\text{ 秒} \approx 4\text{ 秒}$

D：ギア切替え：3秒

1サイクル当りの作業時間（A+B+C+D）

= 5秒 + 3秒 + 4秒 + 3秒 = 15秒



(4) アクセスルート（車両）全体の除灰成立性検討結果

除灰作業に関する作業の除灰時間を表1，2に示す。記載のとおり約10時間で除灰が可能であることを確認した。

表1 災害対策要員①による除灰時間評価

区間	距離（約m）	時間評価項目	速度（km/h）	所要時間（分）	累積（分）
①→②	360	徒歩移動	4.0	6	6
②→⑩	260	降灰除去	0.4	44	50
⑩→②	260	重機移動	11.6	2	52
②→⑤	420	降灰除去	0.4	70	122
⑤→④	90	重機移動	11.6	1	123
④→⑥	340	降灰除去	0.4	57	180
⑥→③	490	重機移動	11.6	3	183
③→⑦	210	降灰除去	0.4	35	218
⑦→⑧	250	重機移動	11.6	2	220
⑧→⑨	560	降灰除去	0.4	94	314

表2 災害対策要員②による除灰時間評価

区間	距離（約m）	時間評価項目	速度（km/h）	所要時間（分）	累積（分）
①→⑯	160	降灰除去	0.4	27	27
⑯→①	160	重機移動	11.6	1	28
①→⑰	300	降灰除去	0.4	50	78
⑰→⑱	50	重機移動	11.6	1	79
⑱→⑮	510	降灰除去	0.4	85	164
⑮→⑭	40	重機移動	11.6	1	165
⑭→⑮	30	降灰除去	0.4	5	170
⑮→⑬	210	重機移動	11.6	2	172
⑬→⑪	440	降灰除去	0.4	74	246
⑪→⑩	80	重機移動	11.6	1	247
⑩→⑫	270	降灰除去	0.4	45	292

以上

降下火砕物による摩耗や融解の影響について

降下火砕物はマグマを起源とする火山ガラス，鉱物結晶片にて構成されるものであり，想定する火山により，主成分組成が異なることから，泊発電所3号炉で想定する火山の主成分組成を整理し，降下火砕物による摩耗や融解の影響について確認した。

1. 降下火砕物の組成

(1) 火山ガラス

降下火砕物の主成分である火山ガラスは，地下深部の高温高压のマグマが噴火時大気中に噴出されることによる急激な減圧・冷却によって結晶化できずに非晶質化したものである。北海道の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成を表1に示す。

表1 北海道のテフラの火山ガラスの主成分組成 (%) ※1 (赤枠は追記)

テフラ	地 点	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	N	分析者	機器の タイプ	文献
Kc-Hb	網走市音根内川 (pfl)	78.1	0.4	12.0	1.6	0.1	0.3	1.5	4.3	1.8	26	O	W	9
	澤部 (pfl)	78.2	0.3	11.9	1.5	0.1	0.3	1.5	4.4	1.9	32	O	W	9
	〃 (pfl)	78.2	0.3	11.9	1.5	0.1	0.3	1.4	4.3	1.9	21	O	W	9
	鱒浦 (pfl)	78.2	0.4	12.1	1.5	0.1	0.3	1.4	4.2	1.7	28	O	W	9
	鱒浦 (pfl)	78.6	0.4	12.1	1.6	0.1	0.3	1.5	3.7	1.6	28	O	W	9
	藻琴 (pfl)	78.4	0.4	12.1	1.5	0.1	0.3	1.5	4.1	1.7	28	O	W	9
	東御路 (pfl)	78.3	0.4	12.0	1.5	0.1	0.3	1.4	4.2	1.7	28	O	W	9
	羽幌町	78.9	0.4	12.1	1.5	0.1	0.3	1.5	3.5	1.6	26	O	W	9
	羽幌町	78.7	0.4	12.1	1.5	0.1	0.3	1.5	3.8	1.6	22	O	W	9
Kc-Sr	網走市音根内川 (pfl)	78.3	0.3	12.1	1.4	0.0	0.3	1.6	4.0	2.1	22	O	W	9
	東藻琴村 (pfl)	78.3	0.3	12.2	1.4	0.1	0.3	1.6	3.8	2.1	24	O	W	9
	底路	78.4	0.3	12.3	1.4	0.1	0.3	1.7	3.6	2.0	20	O	W	9
	東藻琴村東二線	78.3	0.3	12.0	1.5	0.1	0.3	1.5	4.2	1.7	24	O	W	9
	TYPE	78.5	0.3	12.1	1.3	0.1	0.3	1.3	3.7	2.4	20	A	W	15
	MR99-K04, PC2, 3	78.8	0.3	12.0	1.4	0.1	0.3	1.4	3.5	2.4	51	A	W	15
	MR98-03, PC-1, 4	77.9	0.3	12.6	1.3	0.1	0.3	1.4	3.7	2.5	35	A	W	15
	MR99-K04, PC3, 1	79.0	0.3	11.7	1.4	0.0	0.2	1.4	3.7	2.4	20	A	W	15
	厚真町	78.4	0.2	12.5	1.5	0.1	0.2	1.5	3.7	2.2	31	O	W	10
	清田 (pfl)	78.4	0.2	12.3	1.4	0.1	0.2	1.5	3.8	2.2	26	O	W	10
Spfa-1	小清水町止別	78.4	0.2	12.3	1.5	0.1	0.2	1.5	3.8	2.2	24	O	W	10
	門別町	77.5	0.2	13.1	1.4	0.0	0.4	1.4	3.5	2.6	10	Y	E	8
	苫小牧市 (pfl)	78.6	0.2	12.5	1.4	0.1	0.1	1.2	3.4	2.6	21	A	W	13
	上更別村	78.0	0.2	12.5	1.5	0.1	0.1	1.3	3.8	2.6	23	A	W	13
	MR99-K04, PC1, 3	78.3	0.1	12.4	1.7	0.1	0.2	1.3	3.6	2.5	19	A	W	15
	MR99-K04, PC2, 4	78.6	0.2	12.2	1.5	0.1	0.2	1.3	3.5	2.5	20	A	W	15
	MR98-03, PC1, 5	77.8	0.2	12.6	1.6	0.1	0.2	1.4	3.6	2.7	20	A	W	15
	MR99-K04, PC3, 2	78.7	0.1	12.0	1.6	0.1	0.1	1.3	3.6	2.5	20	A	W	15
	KH94-3, LM-8, 5	78.5	0.1	12.3	1.5	0.1	0.1	1.3	3.7	2.4	39	A	W	13
	KH94-3, LM-8, 5	78.4	0.2	12.4	1.4	0.1	0.1	1.3	3.6	2.6	3	A	W	13
Toya	伊達市	79.2	0.1	12.5	1.0	0.1	0.0	0.4	4.3	2.5	10	O	W	5
	伊達市飯山	79.3	0.0	12.5	0.9	0.1	0.0	0.4	4.3	2.5	19	O	W	5
	長万部町	78.8	0.1	12.5	0.9	0.1	0.0	0.4	4.6	2.6	28	O	W	5
	黒松内町	79.5	0.0	12.5	1.0	0.1	0.0	0.4	4.0	2.5	32	O	W	5
	岩内町	78.9	0.1	12.5	0.9	0.1	0.0	0.4	4.5	2.5	16	O	W	5
	島牧	78.8	0.1	13.1	1.0	0.1	0.0	0.4	4.2	2.4	20	O	W	5
	長万部町	79.8	0.1	12.5	0.9	0.1	0.0	0.4	3.5	2.5	27	O	W	5
	木古内町	78.3	0.1	12.5	1.0	0.1	0.1	0.4	5.1	2.7	23	O	W	5
	奥尻米洞	79.5	0.1	12.8	1.0	0.1	0.0	0.4	3.7	2.4	27	O	W	5
	厚真	78.9	0.1	12.7	1.0	0.1	0.0	0.4	4.2	2.5	27	O	W	5
	広尾町ビョオトリ	79.9	0.1	12.7	1.0	0.1	0.1	0.4	4.2	2.5	29	O	W	5
	苫前町	79.3	0.1	12.7	1.0	0.1	0.1	0.4	4.0	2.4	28	O	W	5
	浦幌町	78.8	0.1	12.8	1.0	0.1	0.0	0.4	4.3	2.5	32	O	W	5
斜里町川上橋	79.4	0.1	12.7	0.9	0.1	0.0	0.4	3.9	2.5	21	O	W	5	

Kc：屈斜路カルデラ
Spfa-1：支笏カルデラ
Toya：洞爺カルデラ

北海道の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成は、SiO₂ が約 78～80%，Al₂O₃ が約 12～13%，K₂O が約 1～3 % 程度の範囲であることを確認した。

(2) 鉱物結晶片

鉱物結晶片は、地下深部のマグマが徐々に冷却される過程で結晶化した造岩鉱物である。北海道の主要なテフラに対する鉱物組成は表 2 に示すように石英、(斜方・単斜)輝石、角閃石が含まれていることを確認した。

また、泊発電所の降下火砕物の調査では、主な鉱物として斜方輝石及び角閃石を確認した。

表 2 北海道のテフラの主な鉱物※1 (赤枠, 赤字は追記)

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	ガラス n	opx r	ho, cum n ²	模式地・その他
Toya	(opx)	pm, bw	1.495-1.498 (1.496-1.497)	1.758-1.761		同上(厚真町軽米)
Toya	(opx, cpx, ho, qt)	pm, bw	1.494-1.496 (1.496)	1.711-1.761 bimodal (1.758-1.761, 1.712-1.729)	1.674-1.684	伊達市上長和, eulite にとむ。
Spfa-1	opx, cpx, ho, qt	pm	1.501-1.505 (1.502-1.503)	1.729-1.735	1.688-1.691	同上(千歳市美々)
Spfa-1	(ho)	pm, bw	1.501-1.503		1.684-1.688	猿払村浅茅野
Spfa-1	opx, cpx	pm	1.502-1.505 (1.503-1.504)	1.729-1.731		斜里町川上
Kc-Hb	(opx)	bw	1.507-1.508	1.706-1.711		同上(厚真町軽米)
Kc-Hb	opx, (cpx, ho)	bw	1.501-1.504			同上(厚真町アチャル)
Kc-Hb	opx, cpx	bw	1.502-1.504	1.705-1.709		羽幌町幸町, 厚真町軽米
Kc-Sr	opx, cpx	pm, bw	1.502-1.505 (1.503-1.504)	1.707-1.710 (1.708-1.709)		白糠町道路
Kc-1	opx, cpx, (ol)	pm	1.502-1.504	1.707-1.710 (1.707-1.709)		網走市オホナイ川上流
Kc-2-3	opx, cpx	pm	1.503-1.508 (1.505-1.508)	1.707-1.710		網走市磯琴
Kc-4	opx, cpx	bw, pm	1.502-1.505 (1.503-1.505)	1.707-1.710 (1.708-1.709)		網走, 中標津一帯, 釧路市大 菜毛

鉱物組成の凡例

- opx : 斜方輝石
- qt : 石英
- cpx : 単斜輝石
- ho : 角閃石

2. 降下火砕物の影響について

(1) 摩耗

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(添付資料-1 参照)。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、泊発電所で想定する降下火砕物の硬度について確認を実施した。

a. 火山ガラス

火山ガラスの硬度については、鹿児島県垂水市における火山ガラスについて調査※2 を実施しており、表 3 に示す主元素組成(SiO₂:約 73%, Al₂O₃:約 14%, K₂O:約 3%) の火山ガラスは表 4 に示すようにモース硬度 5 であることを確認した。

これは北海道の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成(SiO₂:約 78～80%, Al₂O₃:約 12～13%, K₂O:約 1～3 % 程度) と比較しても大きな差異がないこ

とから、泊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。

表3 火山ガラスの主成分組成 (赤枠は追記) ※2

Chemical composition (wt%)											Mineral component (wt%)		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	ig. loss	Total	Volcanic glass	Crystals
72.73	13.69	1.44	0.23	1.82	0.18	3.46	3.42	0.01	0.06	3.16	100.2	78.55	21.45

表4 火山ガラスの特性 ※2 (赤枠は追記)

	Shirasu glass				Crystallized glass ⁺			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Specific gravity	2.70	2.77	2.75	2.76	2.95	2.78	2.79	2.78
Hardness (Mohrs)	5	5	5	5	8	8	8	8
Softening point(°C)	873	868	875	870	over 1200	1170	1190	over 1200

⁺Heat treatment condition No. 8

b. 鉱物結晶片

北海道の主要なテフラに対する文献^{*1} 及び発電所敷地内及び敷地周辺の地質調査の結果から確認された造岩鉱物は、石英、(斜方・単斜)輝石、角閃石である。各造岩鉱物のモース硬度は表5、6に示すとおりであり、最大値は石英のモース硬度7である。

表5 造岩鉱物の硬度^{*1} (赤枠は追記, 対象箇所抜粋)

和名(英名)	晶系	理想化学組成式	硬度	比重	和名(英名)	晶系	理想化学組成式	硬度	比重
閃石ザクロ石(andalusite)	単	Ca ₂ Fe ₃ (SiO ₃) ₇	7	3.9	白雲母(muscovite-2M ₁)	単	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH, F) ₂	2.5~3.5	2.9
灰パンザクロ石(grossular)	単	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	7	3.6	金雲母(phlogopite-1M)	単	KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH, F) ₂	2~2.5	2.8~3.0
灰カラムザクロ石(xenarosite)	単	Ca ₃ Ca ₂ (SiO ₃) ₇	6.5~7	3.85	クリノクワア(緑泥石の一類)(clinochlore)	単	Mg ₂ (Mg, Al) ₂ (Si, Al) ₂ O ₁₀ (OH) ₂	2~3	2.3~2.9
ジルコン(zircon)	正	ZrSiO ₄	7.5	4.7	プレウ石(prehnite)	直	Ca ₂ Al ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	6~6.5	2.9
ケイ緑石(sillimanite)	直	Al ₂ O(SiO ₂) ₂	7	3.2	クリストバル石(cristobalite)	正	SiO ₂	6.5	2.3
紅柱石(andalusite)	直	Al ₂ O(SiO ₂) ₂	7	3.2	リドマイ石(tridymite)	単	SiO ₂	7	2.3
ツァンスタイト(cyanite)	三	Al ₂ O(SiO ₂) ₂	2.6	2.6	石英(α-quartz)	単	SiO ₂	7	2.7
十字石(staurolite)	単	(Fe, Mg) ₂ Al ₂ O ₄ (Si, Al) ₂ O ₄ (OH) ₂	7~7.5	3.7~3.8	コブシ石(coesite)	単	SiO ₂	7.5	3
トバズ(topaz)	直	Al ₂ SiO ₄ F ₂ (OH) ₂	8	3.5	オパール(opal)	非	SiO ₂ ·nH ₂ O	6.5	2.1
チタン石(タタヒ石)(titanite)	単	CaTiO(SiO ₃) ₂	5.5	3.5	正長石(orthoclase)	単	KAlSi ₃ O ₈	6	2.6
ゲーレン石(gehlenite)	正	Ca ₂ AlSi ₂ AlO ₇	5.5	3	サニダイン(sanidine)	単	(K, Na)AlSi ₃ O ₈	6	2.6
スセラン石(sceconite)	三	Ca ₂ FeAl ₂ (Si ₂ O ₇)(OH)	7	3.3	微斜長石(microcline)	三	KAlSi ₃ O ₈	6	2.6
ローソン石(lawsonite)	直	CaAl ₂ (Si ₂ O ₇)(OH) ₂ ·H ₂ O	6	3.1	曹長石(lev-albite)	三	NaAlSi ₃ O ₈	6	2.6
絹綿石(hemimorphite)	直	Zn(Si ₂ O ₇)(OH) ₂ ·H ₂ O	4.5~5	3.5	灰長石(anorthite)	三	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	6	2.8
母岩所レン石(einaxenite)	単	Ca ₂ Al ₂ (SiO ₃)(Si ₂ O ₇)(OH)	6.5	3.3	カスミ石(nepheline)	六	(Na, K)AlSi ₃ O ₈	5.5~6	2.6~2.7
緑レン石(sphenoidite)	単	Ca ₂ Fe ²⁺ Al ₂ (SiO ₃)(Si ₂ O ₇)(OH)	6.5	3.4	白榴石(低温度型 ²⁾ (leucite)	正	KAlSi ₂ O ₆	5.5~6	2.6
藍レン石(saenite)	直	Ca ₂ Al(SiO ₃)(Si ₂ O ₇)(OH)	6	3.4	方沸石(naclsime)	等 ²⁾	Na ₄ (AlSi ₃) ₄ ·H ₂ O	5~5.5	2.3
ベズブ石(vesuvianite)	正	Ca ₂ (Al, Fe, Mg) ₂ (SiO ₃) ₄ (Si ₂ O ₇)(OH, F, O) ₂	5~6.5	3.4	濁沸石(tauntonite)	直	Ca(Al ₂ Si) ₂ O ₁₂ ·4H ₂ O	4	2.3
緑柱石(beryl)	六	B ₂ Al ₂ Si ₆ O ₂₀	7.5	2.7	輝沸石(hueandite)	単	(Ca, Na, K) ₂ (AlSi ₂) ₂ O ₁₂ ·2H ₂ O	3.5~4	2.1~2.3
キン寶石(cordierite)	直	Mg ₂ Al ₂ (AlSi ₂ O ₇) ₂	7	2.6	ソーダ沸石(sodalite)	直	Na ₄ (AlSi ₃) ₄ O ₁₀ ·2H ₂ O	5.5	2.3
微雲灰石(schorl)	歪	NaFe ₃ Al ₂ (BO ₃) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH, F) ₂	7.5	3.1					
大碓石(omumite)	六	(K, Na)(Fe, Mg)(Al, Fe) ₂ (Al ₂ Si ₂ O ₇) ₂ ·H ₂ O	7	2.6					
頑火輝石(enstatite)	直	Mg ₂ Si ₂ O ₆	5.5	3.2					
透輝石(diopside)	単	CaMgSi ₂ O ₆	6	3.3					
ヘブロン輝石(hebronbergite)	単	CaFe ²⁺ Si ₂ O ₆	6	3.65					
普通輝石(augite)	単	(Ca, Mg, Fe, Al, Ti) ₂ (Si, Al) ₂ O ₆	5.5~6	3.2~3.6					
ジュズイ輝石(jadite)	単	NaAlSi ₃ O ₈	7	3.3					
セジリン輝石(segirine)	単	NaFeSi ₃ O ₈	6	3.6					
ケイ灰石(wollastonite-1A)	三	CaSiO ₃	4.5	2.9					
カミンダトン閃石(cummingtonite)	直	(Mg, Fe) ₂ (Si ₂ O ₇)(OH) ₂	6	3.5					
藍閃石(anthophyllite)	直	(Mg, Fe) ₂ (Si ₂ O ₇)(OH) ₂	6	3.1					
結閃石(senoidite)	直	Ca ₂ (Mg, Fe) ₂ (Si ₂ O ₇)(OH) ₂	6	3.1					
普通角閃石(hornblende)	直	Ca ₂ (Mg, Fe) ₂ Al ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	5~6	3.0~3.5					
ツァンスタイト(zinnwaldite)	直	Y ₂ Mg ₂ Al ₂ Si ₂ C ₂ (OH) ₂	6	3.1					
カネリナイト(kaolinite)	三	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1~2	2.6					
アンゴライト(染織輝石)(angulite)	直	Mg ₂ Si ₂ C ₂ (OH) ₂	2.5~4	2.4~2.8					
黒ロウ石(pyrophyllite-1A)	単	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1.5	2.9					
砂石(sand)	単	Mg ₂ Si ₂ C ₂ (OH) ₂	1	2.7					

以上のことから、泊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^{*4}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。

(2) 融解

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(添付資料-1参照)。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、泊発電所で想定する降下火砕物の融解について確認を実施した。

a. 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について分析^{*2}を実施しており、表3に示す主元素組成(SiO₂:約73%, Al₂O₃:約14%, K₂O:約3%)の火山ガラスは約700℃からガラスが転移し、軟化温度は表4に示すように868~875℃であることが認められた。これは北海道地方の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成(SiO₂:約78~80%, Al₂O₃:約12~13%, K₂O:約1~3%程度)と比較しても大きな差異がないことから、泊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℃程度と考えられる。よって火山ガラスの融解温度は860℃以上であると推定される。

b. 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。火成岩の融点は表 6 のとおり約 850～1200℃^{※1}であることを確認した。

表 6 実測された溶岩の温度と粘性係数^{※1}（赤枠は追記，対象箇所を抜粋）

火 山	噴 火 年	溶 岩	温 度 (℃)	粘 度 logη (Pa·s)
三宅島	1940	玄武岩	1 000	5
三原山(伊豆大島)	1950	〃	950～1 100	5～6
〃	1951	〃	1 150～1 200	2
桜 島	1946	安山岩	856～1 000	6～8
秋田駒ヶ岳	1970	〃	1 090	—
昭和神山	1945	デイサイト(石英安山岩)	900～1 000	8～10
バリクティン	1945～46	玄武岩質安山岩	1 070	4～5
エトナ	1957	玄武岩	1 110～1 120	3
〃	1971	〃	1 050～1 100	1～2
ニーラゴンゴ	1959	ペイサナイト	1 180	2
マウナロア	1950	玄武岩	950～1 100	2～3
キラウエア(キラウエア・イキ)	1959	〃	1 120～1 190	—
〃 (マカオブヒ)	1965	〃	1 135	2
〃 (Eリフト)	1955	〃	1 100	2～3
月面の溶岩(合成)(アポロ 11号)*		玄武岩(Fe, Tiに富む)	1 395	0

* 実験による。

以上のことから、泊発電所で想定する降下火砕物の融点は 850℃以上であると考えられる。火山灰の融解の影響について、ディーゼル発電機機関のシリンダから排出される排気ガス温度が約 500℃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、火山灰は融解に至らないと考える。

以 上

[参考文献]

- ※1：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，P160-171，P283-284（別添資料－1）
- ※2：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（別添資料－2）
- ※3：理科年表，国立天文台編 第 91 冊，平成 30 年，P668
- ※4：小田匡寛・榎本文勇ほか，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（別添資料－3）

降下火砕物中の主元素組成が示す影響について

降下火砕物の主元素組成については、酸化物 (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O 等) の重量%として示されていることが多い。これらの主元素組成が及ぼす影響について、以下の確認を実施した。

1. 降下火砕物の組成に関する調査

文献^{※1}によると、マグマによる火成岩をつくる珪酸塩鉱物 (表 1 参照) を示しており、鉱物の多くはアルミニウムやカリウム等を含む化学組成を示している。これらに関してマグマの代表的な化学組成 (表 2 参照) を示しており、文献では、以下のような記載がある。

- ・火山岩の組成は酸化物の形で示したからといって、岩石中において個々の酸化物が必ずしもそのままの状態に入っていることを意味しているわけではない。また、液体 (マグマ) においても各々の酸化物がそのまま入り混じってはいない。
- ・酸化物の形で示したのは、たんなる分析技術上の制約からくる便宜的なものである。

表 1 火成岩をつくる珪酸塩鉱物の代表例^{※1}

鉱物族名	鉱物名	化学組成
シリカ族	石英	SiO_2
	クリストバル石	SiO_2
長石族	斜長石	$\text{Ca}_{1-x}\text{Na}_{x-1}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_{2-x}\text{O}_8$
	カリ長石	$(\text{K}, \text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
準長石族	ネフェリン	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
雲母族	黒雲母	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
	白雲母	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
角閃石族	普通角閃石	$\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
輝石族	斜方輝石	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{SiO}_3$
	単斜輝石	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{SiO}_3$
ざくろ石族	アルマンデイン	$\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{12}$
かんらん石族	かんらん石	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$

表2 マグマ（火成岩）の代表的な化学組成（単位は重量%）※1

	船形山 玄武岩	板島 安山岩	昭和三十九山 デイサイト	神津島 流紋岩
SiO ₂	49.56	57.11	69.74	76.06
TiO ₂	0.72	0.82	0.45	0.22
Al ₂ O ₃	17.88	16.94	15.59	13.62
Fe ₂ O ₃	2.82	1.91	1.52	0.21
FeO	7.54	6.09	2.59	0.57
MnO	0.16	0.13	0.08	0.08
MgO	7.03	3.87	0.85	0.08
CaO	10.92	8.42	3.63	0.73
Na ₂ O	1.50	3.69	3.43	4.25
K ₂ O	0.22	1.37	1.36	3.29
P ₂ O ₅	0.06	0.15	0.22	0.02
H ₂ O*	1.16	0.14	0.67	0.81
H ₂ O	0.86		0.23	0.38
合計	100.43	100.04	100.36	100.32

よって、降下火砕物の主元素組成においては、酸化アルミニウム、酸化カリウム等を重量%として示すことが通例であるが、これらが鉱物相として存在することを示すものではない。

2. 北海道のテフラに対する調査

降下火砕物内に鉱物相として、酸化アルミニウムや酸化カリウムが存在する可能性を確認するため、文献調査を実施した。

文献※2の、北海道のテフラを構成する主な鉱物は、石英、(斜方・単斜)輝石、角閃石であり、構成する鉱物中に、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（別添資料-1参照）。

また、泊発電所の降下火砕物の調査では主な鉱物として斜方輝石、角閃石を確認しており、酸化アルミニウム及び酸化カリウムの鉱物相は確認されなかった。

3. まとめ

降下火砕物の主元素組成については、酸化物（SiO₂、Al₂O₃、K₂O等）の重量%として示されていることが多いが、これらの主元素組成が及ぼす影響について確認した結果を以下に示す。

- ・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るが、酸化物の鉱物相の存在を示すものではないことを確認した。
- ・北海道のテフラを調査した結果、降下火砕物中に鉱物相として、酸化アルミニウムや酸化カリウムが存在す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。

以上

[参考文献]

- ※1：谷口宏充, マグマ科学への招待, 裳華房, 2001, P28-30 (別添資料-4)
- ※2：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, P160-171, P283-284 (別添資料-1)

参考文献

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, P160-171, P283-284

3.5 北海道地方

北海道で第四紀後期に活発な爆発的噴火を反復し、広域にテフラを供給した火山は、(1) 支笏、クッタラ、洞爺など道南の大カルデラ火山群、(2) クッチャロ、摩周を中心とする道東の大カルデラ火山群、(3) 駒ヶ岳など渡島半島の火山群に大別される。とくに (1) と (2) に由来するテフラは広く分布し、体積も大きい。

従来は各地域独立にテフラ層序が研究されてきたが、最近 (1) や (3) からもたらされたテフラが (2) の地域でも見出されるようになり、さらに周辺海域でもこれらの火山群由来のテフラが確認されてきた^{19,10)}。そして他の地域からのテフラとあいまって総合的なテフラ編年ができるようになった^{1,2,10)}。そうした鍵層の役割を果たす代表的テフラを新しいものから挙げると、樽前 a (Ta-a)、駒ヶ岳 c₂ (Ko-c₂) (道東にも分布)、白頭山苔小牧 (B-Tm) (ほぼ全域)、樽前 c (Ta-c)、樽前 d (Ta-d)、濁川 (Ng)、恵庭 a (En-a) (いずれも道東にも分布する)、支笏第 1 (Spfa-1)、クッタラ第 1 (Kt-1)、銭亀女那川 (Z-M)、クッタラ第 6 (Kt-6)、洞爺 (Toya)、クッチャロ庶路 (Kc-Sr)、クッチャロ羽幌 (Kc-Hb) など多数にのぼる。これらのうち Kt-1 は従来 Spfa2 とされていたもの、また Z-M は函館沖の現在沈水している火口から噴出し、日高・十勝までおおうテフラ、そして Kc-Sr と Kc-Hb はクッチャロカルデラ起源のそれぞれ水蒸気プリニアンテフラと coignimbrite テフラである。このほかに阿蘇 4 テフラ (Aso-4) は全道的に認められ、Toya とともに本州のテフラ編年とこの地域の編年とを結びつけている。

北海道には歴史・考古学の研究とつながりがあるテフラが少なくない。これまで埋没遺物・遺跡の時代を知るのに、テフラは主に指標層として取り上げられてきたが、テフラ噴火が自然環境へ及

ぼした打撃の分析を通して人間社会への影響や人間の対応のしかたを知ることは、今後のテフラ研究に必要であろう。この場合、北海道では、17 世紀半ばに相次いだ駒ヶ岳、有珠、樽前の噴火がこの種の問題の研究に貴重な事例を提供している。

各地の海成段丘と海成層の研究は、テフロクロロジーの面から追求され、成果を挙げてきた。十勝平野など氷食を受けた山地から流下する河川沿いにある河成段丘も、テフロクロロジーを主な手段として研究され、気候変化と地形発達との関係について理解が進んだ^{9-5,10)}。また氷期の日高山脈における複数回の氷河の進出とテフラとの関係についてもくわしく解明されてきた^{11,12)}。

北海道のテフラ研究は日本のテフロクロロジーの草分けであり⁶⁻⁹⁾、くわしい研究が進んできた。とくにテフラ単層の設定は細かく、土壌で区切られるひとつづきのテフラ (1 噴火輪廻単位) はもちろん、もっと細かいユニット (連続した同一岩相の部分) で分けられていることが多い。表に整理して示したのはそうしたユニットではなく、土壌の形成で区切られるひとつづきのテフラ累層を単位とする。北海道の更新世のテフラでは、土壌と細粒テフラ層との区別が容易でない場合がある。このことは経過時間そのものが短いためかもしれないが、そればかりでなく、植生の乏しい氷期の環境、したがって腐植などの形成が少ないことなどのためからかもしれない。

文献

- 1) Arai *et al.* (1986), 2) 奥村 (1991), 3) 平川・小野 (1974), 4) 小野・平川 (1975), 5) 十勝団研 (1978), 6) 浦上ほか (1933a), 7) 浦上ほか (1933b), 8) 浦上ほか (1935), 9) 浦上ほか (1938), 10) 青木・新井 (2000), 11) 中村ほか (2000), 12) 岩崎ほか (2000a, b), 13) 田中ほか (2002), 14) 平川・岩崎 (1999).

[1] 渡島半島

表 3.5-1

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]
駒ヶ岳 a ¹⁻⁵⁾	Ko-a	AD 1929	H	pfa, pfl	ESE >25 km			
駒ヶ岳 c ₁ ¹⁻⁵⁾	Ko-c ₁	AD 1856	H	pfa, pfl	ENE >10 km			安政火口生成。
駒ヶ岳 c ₂ ^{2,4,5)}	Ko-c ₂	AD 1694	H ²⁾	pfa, pfl	ENE >350 km 図 3.5-1	4	5?	道東地域での [Ma-a, Me-a] ^{1,10)} の一部 ²⁰⁾ 。
駒ヶ岳 d ¹⁻⁵⁾	Ko-d	AD 1640	H	afa, pfa, pfl	NW >120 km 図 3.5-1	4	5	崩壊・岩屑なだれ発生後 ブリエアン噴火 ²²⁾ 、ユニ ット多数。
白頭山苫小牧 ¹⁴⁾	B-Tm	10 世紀		afa				本文・表 3.4-4, 3.6-2 参 照。
駒ヶ岳 e ¹⁻⁵⁾	Ko-e	>1.7	C*	afa, pfa			>3?	給源不明。
駒ヶ岳 f ¹⁻⁵⁾	Ko-f	6.3	C ²⁰⁾	pfa, pfl	ESE >30 km	3		
駒ヶ岳 g ¹⁻⁵⁾	Ko-g	6.8~7.0; 6.5	C ²⁰⁾ C ²⁷⁾	pfa, pfl	ENE >350 km 道東に及ぶ ²⁷⁾	3		道南の花粉分析では当時 ミズナラ林、その後ブナ 林におおわれる ²⁰⁾ 。
瀧川 ^{6,7)}	Ng	15 (MIS 2 最 末期)	C, ST	ps·afa, pfa, pfl	E >160 km 図 3.5-4	4	5-6	ユニット多数。[Ng-c~ Ng-a] ⁷⁾ 。本テフラ層以 下では亜寒帯林を示す花 粉 ²⁵⁾ 。
駒ヶ岳 h ^{4,5,7)}	Ko-h	17	C*	pfa, afa, pfl	ES, W, N >15 km	>2?		[Ko-h ₁] ⁹⁾
駒ヶ岳 i ^{4,5,7)}	Ko-i	>32	C*	pfa, pfl	EN, ES, W; W >250 km 渡島半島西沖の日 本海にも分布 ²⁴⁾	4	5?	[鹿部] ¹⁹⁾ , [Ko-h ₂] ⁹⁾
鱧亀女那川 ⁹⁾	Z-M	>45 (MIS 3 か)	ST, C	pfa, pfl	E >250 km 図 3.5-4	4	6	[鱧亀沢] ^{9,10)} , [女那川] ¹⁰⁾ , [日高] ¹⁰⁾ , [楽古] ¹⁰⁾ , イン ポリューション発達。
阿蘇 ^{4¹³⁾}	Aso-4	85~90		afa				本文・表 3.1-5 参照。
松前 ¹⁶⁾	Mt			pfa				給源不明。
洞爺 ¹⁷⁾	Toya	112~115		pfa, afa				本文・表 3.5-2 参照。

1) 山田 (1958), 2) 荻々木ほか (1970), 3) 藤井・石川 (1961), 4) 藤井ほか (1986), 5) 藤井ほか (1989), 6) 松下ほか (1973), 7) 藤井ほか
町田ほか (1981a), 10) 町田ほか (1985), 15) Arai et al. (1986), 17) 町田ほか (1987a), 18) 藤井 (1961), 19) 藤井・福澤 (1988), 20) 藤井
(1992), 27) 中村・平川 (2002).

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	ガラス n	opx T	ho, cum n ₂	模式地・その他
Ko-a	opx, cpx	pm	1.500-1.502	1.709-1.714 (1.710-1.713)		鹿部町本別
Ko-c ₁	opx, cpx	pm	1.500-1.503	1.709-1.714		同上
Ko-c ₂	opx, cpx	pm	1.501-1.505	1.709-1.713		同上
Ko-d	opx, cpx	pm	1.502-1.510	1.710-1.714 (1.712)		森町島崎
B-Tm	af	pm	1.509-1.522			af 1.522-1.524, 砂原町
Ko-e	上部 opx, cpx 下部 ho, opx, cpx	pm	1.512-1.515	1.707-1.712 (1.709)	1.672-1.680	同上
Ko-f	opx, cpx	pm	1.516-1.520	1.709-1.712		鹿部町大岩
Ko-g	opx, cpx	pm	1.513-1.516	1.707-1.710		森町島崎
Ng	ho, opx	pm	1.503-1.508	1.708-1.713 (1.711)	1.670-1.675	森町石倉, pfa と pfi についての岩石記載: Ng-c から Ng-a へ重鉱物組成と屈折率の変化 ²⁰⁾ , 左の数値は最も大規模な Ng-a のもの。
Ko-h	opx, cpx	pm(やや変質)	1.515-1.520	1.709-1.711		鹿部町大岩
Ko-i	opx, cpx	pm	1.509-1.511 (1.510)	1.708-1.711		鹿部町尻無川河口
Z-M	上部 ho, cum, (opx); qt				1.662-1.675 (cum 1.662- 1.665; 1.670- 1.675)	戸井町小安, 上下のユニットで鉱物組成異なる。
	下部 ho, opx; (qt)			1.712-1.725	1.670-1.680	同上
Aso-4	(ho)	bw	1.507-1.510		(1.687)	恵山町女郎川
Mt	ho, opx, cpx				1.685-1.689 (1.686-1.688)	松前町札前
Toya		pm	1.491-1.495	1.758-1.760	1.674-1.684	恵山町女郎川, 長万部町中ノ沢, 主成分 ²¹⁾

(1992), 8) 山縣ほか (1989), 9) 長谷川・鈴木 (1964), 10) 瀧川 (1980), 11) 中川 (1961), 12) 春日井ほか (1980), 13) 平川・小野 (1974), 14) (1989), 21) 古川ほか (1997), 22) 吉本・宇井 (1998), 23) 奥野ほか (1990), 24) 田中ほか (2002), 25) 滝谷・萩原 (1997), 26) 高澤ほか

[2] 洞爺・クッタラ

表 3.5-2

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]
有珠 b ^{1,2)}	Us-b	AD 1663		pfa, afa, ps afa (vitric)	E(S) >200 km 図 3.5-1	3-4	5	[Us-c] ¹⁰⁾
白頭山苫小牧 支筋第 1	B-Tm Spfl	10 世紀 40~45		pfl				本文・表 3.4-4, 3.6-2 参照。 [札内] ⁷⁾ , 本文・表 3.5-3 参照
クッタラ第 1 ⁶⁾	Kt-1	≥ 43	C* ²⁰⁾	pfa, pfl, ps	E(N) >300 km 図 3.5-4	4	6	[Kpfl-II と Kbs-III] ⁹⁾ , [Kt-b と a] ^{7, 6)} , [Npfl-II と I, Nb] ⁹⁾ , [Spfa2] ¹⁰⁾ , 現カルデラ形成
銭亀女郎川 中島長流川 ³⁾	Z-M Nj-Os	≥ 45	ST, C*	pfa				表 3.5-1 参照。 [G-P] ¹²⁾
クッタラ第 2 ⁵⁾	Kt-2 (N, Us-c)			pfa	NW >100 km 図 3.5-4	4	5	[Kt-c] ⁶⁾ , [N, Us-c] ¹²⁾ , 給源 は四方嶺 ⁶⁾ ,
クッタラ竹浦 ^{4, 20)} (群)	Kt-Tk	クッタラ火山外輪山 ¹⁾ 形成期の sfa 群 ¹⁸⁾ , [Kbs-II] ⁶⁾ , [Rpfa-1] ⁹⁾ , [Kt-d] ⁶⁾ , [Spfa-3] ¹¹⁾ ,						
クッタラ第 3 ⁵⁾	Kt-3	≥ 47~51	C* ²⁰⁾	pfa, afa, ps, pfl	E(N) >150 km 図 3.5-4	4	6	[Kpfa-III, Kbs-I と Kpfl-I] ⁹⁾ , [Kt-f と e] ^{7, 6)} , [Rpfa-II a と Rpfl-1] ⁹⁾ , [Spfa-3 と 4] ¹⁰⁾ , これ以前のクッタラテフラの 大半は現カルデラ湖より北 から噴出 ²⁰⁾ ,
クッタラ早来 ⁵⁾	Kt-Hy			pfa, ps, afa, pfl	E >60 km	3-4	4-5	
クッタラ第 4 ⁵⁾	Kt-4			pfa, ps, pfl	E?	3-4	5-6	[Kpfa-II] ⁹⁾ , [Kt-h] ⁷⁾ , [Rpfa-II b と Rpfl-II] ⁹⁾ [RP-II] ¹⁰⁾ , [OP-2] ²⁰⁾ , [Mpfa-2a] ¹¹⁾
クッタラ第 5 ⁵⁾	Kt-5			pfa	E?	3-4	4-5	[Kpfa-I] ⁹⁾ , [Mpfa-2b] ¹¹⁾
クッタラ第 6 ⁵⁾	Kt-6	75~85	ST MIS 5a	pfa, ps, pfl	ENE >200 km 図 3.5-4	4	6	[Kt-i] ⁷⁾ , [Rpfl-III] ⁹⁾ , [Kt-i U と i L] ⁶⁾ , [Mpfa-3] ¹¹⁾ , [Op-3] ²⁰⁾ , [RP-IV] ¹⁰⁾
クッタラ第 7 ⁵⁾	Kt-7			pfa, pfl	E?	3-4	6	[Kt-j] ⁷⁾ , [Kt-j ₂] ⁹⁾ , [Rpfl-III] ⁹⁾
阿蘇 4	Aso-4	85~90		afa (vitric)				本文・表 3.1-5 参照
クッタラ第 8 ⁵⁾	Kt-8			pfa, afa, ps, pfl	E?	4	6	[Rpfl-IV] ⁹⁾ , 石狩平野南部と 道東で [N, Us-c] と解釈して いたものにあたる ¹⁶⁾ ,
洞爺 ¹⁷⁾	Toya	112~115	OI, FT, ST, TL	afa (pp), pfl, afa	conc. >600 km pfl は NW, W 80 km 図 2.4-4	5	7	本文参照。 [Aafa2] ¹²⁾ , [Kpfa] ¹⁸⁾ , [HPIV] ¹⁵⁾ , [Hn2WA] ¹⁹⁾ , [ビク] ²⁰⁾ , [WT] ²¹⁾ , [YP] ²²⁾
長流川 ¹⁷⁾	Osr	120~125	ST	pfa, afa, pfl				上長和層 (砂礫層, MIS 5e?) 上にある。

1) 山田 (1958), 2) 大場 (1965), 3) 北海道火山灰命名委員会 (1979), 4) 河内ほか (1980), 5) 山崎 (1994), 6) Katsui (1981), 7) 相模原 (1985), 15) 小野・平川 (1974), 16) Arai et al. (1986), 17) 町田ほか (1987a), 18) 春日井ほか (1978), 19) 大上ほか (1978), 20) 北里 (1975), (1985),

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	n	opx γ	ho n ₂	模式地・その他
Us-b	(opx, cpx, ho; qt)	pm	1.497-1.499 (1.498)	1.735-1.741	1.683-1.686	白老町ボロト湖
B-Tm	af	pm	1.508-1.522			af 1.522-1.524, 伊達市館山
Spfl	opx, cpx, ho	pm, bw	1.500-1.503	1.731-1.733	1.688-1.691	同上
Kt-1	opx, cpx; qt	pm	1.498-1.504 (1.502-1.504)	1.719-1.726 (1.720-1.723)		白老町萩野, 火山ガラス n は 5) による.
Z-M	ho, opx, cum	pm	1.505-1.513	1.717-1.724		早来町東早来
Nj-Os	ho, opx	pm	1.501-1.510 (1.502-1.506)	1.707-1.711	1.665-1.670	仕警村幸内, 火山ガラス n は 5) による.
Kt-2 (N, Us-c)	opx, cpx, (ho)	pm	1.505-1.515 (1.507-1.510)	1.712-1.718 (1.713-1.716)	1.678-1.684	伊達市館山
Kt-Tk	cpx, opx, ol					白老町竹浦
Kt-3	opx, cpx	pm	1.510-1.514	1.713-1.725		登別町ランボーゲ岬, 火山ガラス n は 5) による.
Kt-Hy	opx, cpx, (ho)			1.711-1.726 (1.715-1.724)		同上, opx γ は 5) による.
Kt-4	opx, cpx, (ol)	pm	1.508-1.510	1.716-1.723 (1.720-1.722)		同上
Kt-5	opx, cpx	pm	1.511-1.514 (1.512-1.513)	1.720-1.726 (1.722-1.724)		同上
Kt-6	opx, cpx	pm	1.507-1.509	1.723-1.729		白老町萩野
Kt-7	opx, cpx,	pm	1.509-1.512	1.721-1.730		白老町社台川
Aso-4	(ho)	bw	1.507-1.510		1.686-1.688	伊達市館山, 主成分 ²⁶⁾
Kt-8	opx, cpx, (ho)	pm	1.507-1.510 (1.508-1.509)	1.713-1.718 (1.715)	1.678-1.684	同上
Toya	(opx, cpx, ho, qt)	pm, bw	1.494-1.498 (1.496)	1.711-1.761 bimodal (1.758-1.761, 1.712-1.729)	1.674-1.684	伊達市上長和, eulite にとむ.
Osr	opx, cpx, (ho)	pm	1.503-1.508	1.717-1.723		同上長流川沿い

(1987), 8) 藤原研 (1990), 9) 山崎 (1985), 10) 佐藤 (1988b), 11) 春日井ほか (1980), 12) 春日井ほか (1989), 13) 山崎 (1991), 14) 藤井ほか
21) 大池ほか (1970), 22) 東北地方第四紀研究グループ (1969), 23) 十勝研 (1972), 24) 森泉 (1998), 25) 加藤ほか (1995), 26) 町田ほか

[3] 支笏・羊蹄・石狩・十勝

表 3.5-3

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]
樽前 a ^{1,4)}	Ta-a	AD 1739	H	pfa, pfi, pfa	EEN > 270 km 図 3.5-1	4	5	道東まで見られ、[Ma-a あるいは Me-a] ^{1,2)} の 一部をなす ²⁾ 。アイヌ文化 期。
樽前 b ^{1,2)}	Ta-b	AD 1667	H, A	pfa, pfi	E(N) > 170 km 図 3.5-1	4	5	アイヌ文化期。
有珠 b	Us-b	AD 1663	H	pfa, afa				表 3.5-2 参照。
白頭山苔小牧 ⁶⁾	B-Tm	10 世紀		afa				本文・表 3.4-4, 3.6-2 参 照。
樽前 c ^{3,4)}	Ta-c	2.5~3	C*, A	sfa, pfa	E(N) > 80 km 図 3.5-2	4	5	
樽前 d ^{3,4)}	Ta-d	8~9	C*	pfa, sfa	E > 200 km 図 3.5-2	3-4	5	
恵庭 a ⁷⁾	En-a	19~21 C ^{24,25,44,45)} (MIS 2)		pfa	E > 200 km 図 3.5-3	4	5	[帯広火山砂] ⁸⁾ 、日高山 地トックベツ亜水期 ¹⁾ 。
羊蹄 (群) ²⁷⁾		およそ 70ka 以降完新世まで数十層の sfa, pfa が噴出・堆積。一部に小 pfi あり。ここでは遠隔地まで達 した 3 層 (Yo-1, 2, 3) を示す。						
羊蹄第 1 ^{10,11)}	Yo-1	>18	C, O	sfa, pfa, sfa	E(N) > 85 km 図 3.5-3	3	4-5	本層とその下位にある Yo-2(略)との間から後 期旧石器。[Yo. PS-1] ¹¹⁾
始良 Tn ¹⁴⁾	AT	28~30		afa (風化)				本文・表 3.1-3 参照。
羊蹄第 2 ^{10,11)}	Yo-2	25~27	C*	pfa・sfa 互層		3	4	AT 直下
羊蹄第 3 ^{10,11)}	Yo-3	40	ST	pfa, sfa, pfa, sfa	E > 80 km 図 3.5-3	3	4	[Yo. Ps-3] ¹¹⁾ 。インボリ ューション発達。
恵庭 b ¹⁰⁾	n, En-b	>22	C	pfa	N > 45 km 図 3.5-3	3-4	4	フッピシ火山起源 ²⁰⁾ 。
支笏第 1 ^{3,5,7)}	Spfi	40~45	C ^{29,32)}	pfi	conc. 50 km 図 2.4-3	3	7	本文参照。
	Spfa-1			pfa	ESE > 700 km 図 2.4-3	5	7	
クッタラ第 1	Kt-1	≥43	C	pfa				[Spfa-2] ²²⁾ 。従来支笏起 源と考えられていた。表 3.5-2 参照。インボリ ューション発達。
銭亀女那川	Z-M	≥45		pfa				[楽古 I RP-1] ⁹⁾ 。[日高 Hpfa] ¹⁰⁾ 。表 3.5-1 参照。 インボリューション発達。
クッタラ第 3	Kt-3			pfa (2 ユニット)				[Spfa-4] ¹⁰⁾ 。[Op-1] ²³⁾ 。 表 3.5-2 参照。インボリ ューション発達。
支笏第 5 ^{5,12)}	Spfa-5			pfa	E > 200 km	3-4	5	インボリューション発 達。
支笏第 6 ^{5,12)}	Spfa-6			pfa	E > 200 km	3-4	5	Spfa-5 との間に Kt-Hy あり。インボリューシ ョン発達。

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	n	opx γ	ho, cum n ²	模式地・その他
Ta-a	opx, cpx	pm	1.497-1.508 (1.498-1.501)	1.713-1.717 (1.715-1.716)		千歳市美々
Ta-b	opx, cpx	pm	1.500-1.509	1.712-1.716 (1.715)		同上
Us-b	opx, cpx, ho; qt	pm	1.498±			門別町
B-Tm	af	pm	1.511-1.522			af 1.522-1.524, 苫小牧市, 港
Ta-c	opx, cpx, (ol)	pm	1.502-1.511	1.708-1.716 (1.710-1.712)		千歳市美々, 縄文晩期文化層 には含まれる。
Ta-d	opx, cpx, (ol)	pm	1.533-1.537	1.701-1.706		同上, 上下に縄文早期文化層。
En-a	opx, cpx	pm	1.507-1.509	1.710-1.715 (1.713-1.715)		同上, ho を含まない。
Yo-1	opx, cpx			1.714-1.719		京極町大富, 山縣試料, 微晶 の多い火山ガラス。
AT	(opx)	bw	1.499-1.501			同上, 山縣試料
Yo-2	ho, opx	pm	1.556-1.560	1.703-1.708	1.690-1.695	同上, 山縣試料
Yo-3	opx, cpx	pm	1.525-1.532	1.702-1.707		同上, 山縣試料
n, En-b	opx, cpx	pm	1.510-1.514	1.711-1.715		恵庭市磐尻
Spfl	opx, ho, (cpx); qt	pm, bw	1.500-1.503	1.730-1.733	1.688-1.691	千歳市美々
Spfa-1	opx, cpx, ho; qt	pm	1.501-1.505 (1.502-1.503)	1.729-1.735	1.688-1.691	同上
Kt-1	opx, cpx; qt	pm	1.502-1.504	1.723-1.726		早来町新栄
Z-M	ho, opx, cum, bi; qt			1.713-1.724	1.670-1.675 cum 1.661-1.664	静内町新冠, 広尾町豊似
Kt-3	opx, cpx, ho	pm	1.509-1.513	1.709-1.725		早来町新栄
Spfa-5				1.715-1.719 (1.716-1.717)		同上
Spfa-6				1.710-1.717 (1.711-1.715)		同上

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]	
支笏第7~10 ^{1,12)}	Ssfl	}	同一噴火輪廻 >60 C ²⁰⁾ (MIS 4 か)	sfl, pfl (多数ユニット)	ENE? >150 km 図 3.5-4	2-3	4	}	
Spfa-7 ~10	pfa (多数ユニット)								
尻別	Srb	70	ST (Kt-4 の上位)	pfa, pfl	尻別岳から、			E >100 km	[Ssfa] ⁷⁾ , 一連のテフラ, [TBS] ⁹⁾ , 安平層 II (砂礫 層) 上にある ¹²⁾ , インボ リューション発達
クツラ第6	Kt-6	75~85		pfa					[Mpfa-1] ¹⁰⁾ , [Yo-Mk] ¹⁰⁾ , 新記載, 尻別起源らしい, インボリューション発達
阿蘇 4 ¹⁴⁾	Aso-4	85~90		afa					[Mpfa-3] ¹⁰⁾ , [K-M] ¹⁰⁾ , [RP-IV] ⁹⁾ , [Op-3] ^{12, 10, 21)} , 表 3.5-2 参照
厚真 1 ¹⁶⁾	Aafal			afa					本文・表 3.1-5 参照
洞爺 ¹⁰⁾	Toya	112~115		afa					[HP II] ¹⁰⁾ , 給源クツラ,
クッチャロ羽根 ¹⁰⁾	Kc-Hb	115~120		afa					[Aafa2] ¹⁰⁾ , [上札内 Kp fa] ¹⁰⁾ , 本文・表 3.5-2 参 照
厚真 4 ¹⁶⁾	Aafa4			afa					[Aafa3] ¹⁰⁾ , 本文・表 3.5- 5 参照
									海成早米層 ²⁰⁾ 直上, 給源 不明

1) 山田 (1958), 2) 曾屋 (1972), 3) 北海道火山灰命名委員会 (1979), 4) 石川ほか (1969), 5) 曾屋・佐藤 (1980), 6) 町田ほか (1981a), 7) 14) Yamagata (1996 MS), 15) 馬道団研 (1987), 16) 春日井ほか (1980), 17) Arai et al. (1985), 18) 町田ほか (1985), 19) 町田ほか (1987a), 星住 (1996), 28) 山縣 (1994), 29) 柳田 (1994).

[4] 道央・道北

表 3.5-4

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]
利尻豊徳(群?) ^{1,10)}	Rs-Ht	>10?	ST	sfa		3?	5	利尻火山最新期(第5期)の活動で利尻南麓または沖合から噴出した ¹⁰⁾ sfa, インボリューション発達
利尻ワンコノ沢 ^{1,4,9,10)}	Rs-Wn	(MIS 2 か)		pfa, sfa (5 ユニット)	E >80 km 図 3.5-5	3-4	5	利尻島南東の海底から噴出 ¹⁰⁾ , インボリューション発達, 凍結割れ目形成 ¹³⁾
然別(群)	Spfa-1	Spfa-1 の上下に然別 1, 2 (Sipfa-1, 2) という 2 枚の pfa が十勝平野北部に分布 ¹⁰⁾ . 分布軸は E 方向.						
大雪御鉢平 ^{4,9,12,13)}	Ds-Oh	>30	C ¹⁰⁾	pfa, pfl	N 20 km, E(N) 140 km?			[層雲峡] ^{6,15)} の一部, [北海平] ^{6,15)} .
支笏第1	Spfa-1	40~45		pfa				本文・表 3.5-3 参照
阿蘇 4 ¹⁴⁾	Aso-4	85~90		afa (vitric)				本文・表 3.1-5 参照
利尻兜沼(群) ^{6,10)}	Rs-Kb	Aso-4 の下位に 2 層, 上位に 1 層		pfa, sfa	ENE			Spfa-1 の下位.
利尻アチャル ^{6,14)}	Rs-Ac		Kc-Hb の上位	pfa		3?	5	サロベツ低位海成段丘上
クッチャロ羽根	Kc-Hb			afa				同上

1) 更別グループほか (1966), 2) 佐々木ほか (1971), 3) 小林哲 (1987), 4) 三浦 (1991), 5) 十勝団研 (1972), 6) 土居ほか (1961), 7) 町田 (1966), 14) 三浦 (1996), 15) 伊藤ほか (2000).

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	n	opx γ	ho n ₂	模式地・その他
Ssf	opx, cpx			1.711-1.715		白老町社台川
Spfa-7 ~10	opx, cpx			1.713-1.718 (1.715-1.717)		早来町新栄
Srb	ho, opx; qt	pm	1.500-1.504	1.716-1.720	1.680-1.685	京極町更邊, Mpfa-1は鶴川 町沙見三区
Kt-6	opx, cpx	pm	1.508-1.515 (1.510-1.514)	1.723-1.729		厚真町軽米
Aso-4	(ho)	bw	1.505-1.509		1.686-1.688	同上, 主成分 ¹⁸⁾
Aafa1	opx, cpx	pm	1.509-1.511	1.714-1.721 (1.715-1.720)		同上
Toya	(opx)	pm, bw	1.495-1.498 (1.496-1.497)	1.758-1.761		同上
Kc-Hb	(opx)	bw	1.507-1.508	1.706-1.711		同上
Aafa4		pm	1.497-1.498			同上

8) 長塚 (1956), 9) 小野・平川 (1974), 10) 春日井ほか (1974), 11) 船橋ほか (1975), 12) 佐藤 (1969b), 13) 春日井ほか (1978), 20) 山田ほか (1981), 21) 十勝国研 (1972), 22) 藤井 (1961), 23) 徳井 (1989), 24) 梅津 (1987), 25) 加藤 (1994), 26) 中川 (1993), 27)

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	n	opx γ	ho n ₂	模式地・その他
Rs-Ht	ol					豊富町アチャル, 岩片にとむ
Rs-Wn	ho, (opx, cpx)	pm	1.517-1.522* (縞状霏石あり)		1.681-1.686 (上部ユニット ほど高い値 1.684-1.689)	同上, 猿払村浅茅野, *15) の 火山ガラスはRs-Wn本体と 異なるもの
Ds-Oh	opx, cpx, (ho)	pm	1.505-1.516 (1.507-1.509)	1.706-1.710	1.672-1.677	上川町稻雲峽・天城岩, 大面
Spfa-1	(ho)	pm, bw	1.501-1.503		1.684-1.688	猿払村浅茅野
Aso-4		bw	1.508-1.512			稚内市恵北
Rs-Kb						豊富町兜沼, 岩片にとむ
Rs-Ac	(opx)			1.700-1.703		豊富町アチャル
Kc-Hb	opx, (cpx, ho)	bw	1.501-1.504			同上

井ほか (1978), 8) 目次 (1983), 9) Arai et al. (1986), 10) Miura (1986), 11) 三浦・平川 (1995), 12) 中村・平川 (2000), 13) 国府谷ほか

[5] 道 東

表 3.5-5

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]
樽前 a ^{1,2)}	Ta-a	AD 1739		afa				[摩周 a M(a)-a] ³⁾ , [軽阿寒 a ₁ Me-a ₁] ^{4,5)} , [トコロIV] ^{2,20)} , 表 3.5-3 参照.
駒ヶ岳 c ₂ ^{1,2)}	Ko-c ₂			afa				[M(a)-a] ³⁾ , [Me-a ₁] ^{4,5)} , [トコロIII] ^{2,20)} , 表 3.5-1 参照.
摩周上部・新期(群) ⁶⁾	Mu							Ma-i に始まり Ma-b にいたる爆発的活動期のテフラ群, 最大のものが Ma-j に始まり Ma-f で終わる一連の爆発的活動のテフラ. Ma-f 以上にも摩周(カムイヌプリ)系と思われる 4 層 (b, c, d, e) と遠来と思われる 3 層 (上記 2 層を含む) がある. テフラの区分・名称は多岐にわたる(省略) ⁶⁾ .
摩周 b ³⁾	Ma-b	<10 世紀	ST	pfa, afa, pfa (5 ユニット)	N > 80 km 図 3.5-6, 下部は N へ, 上部のユニットは E に分布.	3-4	5	給源カムイヌプリ火口.
白頭山苫小牧	B-Tm	10 世紀						本文・表 3.4-4, 3.6-2 参照. この下位に Ta-c に対比される [トコロ] ²⁰⁾ .
羅臼 2 ²⁷⁾	Ra-2	1.4	C	pfa, pfi	E > 60 km, 函根島にも分布, 図 3.5-6		4	Ma-b の下位.
摩周 f ^{3,4,5)}	Ma-f	同一噴火 輪廻 7.3~8	C ^{7,8)}	pfi, pfa	conc. 100 km 図 3.5-6, 再堆積 性のテフラ広く分 布 ^{9,10)} .	4	6	[摩周軽石流 Mpf] ^{2,8)} , 摩周カルデラ形成. この上位に Ko-g ¹⁰⁾ .
摩周 g~j ^{3,4,5)}	Ma-g~j			afa, pfa・afa, pfa (多数ユニット)	ESE > 100 km 図 3.5-6			
摩周 k ^{3,4,5)}	Ma-k	>11		afa	摩周起源ではなく 遠来か?			本テフラ以後アースハン モック形成 ²⁰⁾ .
摩周 l ^{3,4,5)}	Ma-l	≥14	C ¹¹⁾	afa, pfa	NE-SE > 80 km 図 3.5-6	4	5	
摩周下部(群) ⁶⁾	Ml							[摩周ローム] ¹²⁾ , [チャンベツローム] ^{13,14)} と同じ. 摩周成層火山期の [Ma-a~Ma-h] ¹⁰⁾ の一部. 5 層の sfa, pfa からなる. 中・上部にはインボリューションが顕著.
アトサヌプリ ¹⁶⁾	Anp	>12	C*	pfi	クッチャロカル デラ内			Ml や Ch との層位関係 不明.
茶内(群) ⁶⁾	Ch							[茶内火山灰層] ¹⁷⁾ を再定義し, その上部をなす 4 層の pfa・afa (Ch-a~d) を含む. いずれも摩周・クッチャロ起源と思われる. インボリューションや軽石の凍結破砕が著しい.
クッチャロ中島島住 ¹⁸⁾	Kcn-T			pfa	NE > 50 km	3	4	
西別東カヤノ ¹⁸⁾	Ns-Hk	MIS 2		pfa	図 3.5-7	3	4	下位に Ds-Oh ²⁰⁾ , イン ボリューション発達.
中春別上部(群) ^{6,12)}	Nu							Kc-1 以上, Ch 群に切られるテフラ群で, 摩周東麓では Ns-T ₁₋₃ のほか 15 層あまりの pfa, sfa, afa を含む. 大部分は摩周(西別を含む)火山またはクッチャロ火山を給源とするが, Ns-T ₁ と Ns-T ₂ の間に遠来と思われる afa [Nu-m] がある. [別海] ¹⁸⁾ .
西別床丹 ¹⁹⁾	Ns-T ₁			pfa, afa・pfa	ES? > 60 km 図 3.5-7	3	4-5	[Nu-1 (1-5)] ⁶⁾ , [床丹 浮石(層)] ^{12,18)} の一部.

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	T_m	opx γ	ho n_2	模式地・その他
Ta-a	(opx, cpx)	pm	1.500-1.505	1.713-1.715		弟子屈町美留和, 弟子屈町, 対比は主成分 ^{1,20)} .
Ko-c1	(opx, cpx)	pm	1.501-1.505	1.709-1.713		同上, 対比は主成分 ^{1,20)} .
Mu						中標津町養老牛
Ma-b	(opx, cpx)	pm	1.501-1.504			清里町清泉
B-Tm	af ($n_1=1.523\pm$)	pm, bw	1.508-1.519			弟子屈町美留和
Ra-2						羅臼町神町, 全岩主成分 ²⁷⁾
Ma-f	opx, cpx	pm	1.516-1.520	1.707-1.711 (1.708-1.709)		中標津町武佐
Ma-g~j	opx, cpx			1.705-1.710 (1.708)		同上
Ma-k	(opx, cpx)	pm	1.505-1.510			弟子屈町美留和
Ma-l	opx, cpx			1.705-1.710 (1.706-1.709)		中標津町武佐
Ml						別海町泉川
Anp	opx, cpx	pm	1.505-1.508	1.704-1.708		弟子屈町美留和
Ch						別海町泉川, 中春別
Ken-T	opx, cpx, ol			1.705-1.710		小清水町東萱野
Ns-Hk	opx, cpx			1.708-1.712		同上
Nu						別海町中春別菊水ほか
Ns-T1	opx, cpx	pm	1.520-1.522	1.715-1.720		別海町床丹

火山・テフラ名	記号	年代	測定方法	堆積様式と層相	分布・体積	A	V	注・[対比・他の名称]
西別床丹 ²¹⁹⁾	Ns-T ₁			pfa, afa	E > 60 km 図 3.5-7	3	4-5	[Nu-n (1.2)] ⁶⁾ , [床丹 浮石(層)] ^{12, 16)} の一部
西別床丹 ³¹⁹⁾	Ns-T ₁	>30	C	afa, pfa, sfa	E(S) > 60 km 図 3.5-7	3	4-5	[Nu-p (1-5)] ⁶⁾ , [床丹 浮石(層)] ^{12, 16)} の一部
小清水 ¹²⁰⁾	Ks1			pfa	小清水・斜里地域			Ns-T ₁₋₃ との層位関係 不明。[K. pfa1] ²⁶⁾ 。
西別止別 ¹²⁾	Ns-Ym	Kc-1 直上		afa, pfa	EN? 図 3.5-7	3-4	5?	摩周火山爆發的活動開始 インボリューション未発 達。
中春別下部(群) ⁶⁾	NI	Kc-4 の上位, Kc-1 までを含む。広く認められる指標テフラ層は下記のように, Spfa-1, Aso-4, Toya を除くと, クッチャロ火山群を給源とするらしい。						
クッチャロ蒸路 ¹⁴⁾	Kc-Sr	同一噴火輪廻 35~40	C	afa	ES? > 1000 km 図 2.4-6	5	7	本文参照, [NI-a] ⁶⁾ , [K. P. flow-I] ²⁰⁾
クッチャロ ¹²³⁾	Kc-1			afa, pfi	conc. 70 km 図 2.4-6	4		
支笏第 ¹²⁰⁾	Spfa-1	40~45		pfa				インボリューション発達 本文・表 3.5-3 参照。
小清水 ²²⁰⁾	Ks2	MIS 4 か		pfa	小清水・斜里地域	3	4	[K. pfa II] ²⁶⁾ , インボリ ューション発達。
小清水 ³²⁰⁾	Ks3	MIS 5a~MIS 4		afa, pfa	同上	3	4	[K. pfa III] ²⁶⁾ , 弱いイン ボリューション, 河成段 丘上。
クッチャロ 2・3 ²⁰⁾	Kc-2・3	85~90		pfi, (afa), pfi	N-NNE 35 km	3	6	[K. P. flow-II & III] ²⁰⁾ , 土壌をはさまず一連の噴 出物。[NI-d?] ⁶⁾
阿蘇 ⁴²¹⁾	Aso-4	85~90		afa(vitric)				Kc-2・3 の直下にある。 本文・表 3.1-5 参照。
斜里 ²⁰⁾	Shr	MIS 5c らしい		pfa	小清水・斜里地域	3	4?	インボリューション未発 達。
洞爺 ²²⁾	Toya	112~115		afa(vitric)				本文・表 3.5-2 参照。
小清水 ⁴²⁰⁾	Ks4	MIS 5d らしい		pfa, afa	小清水・斜里地域	3	4?	[K. pfa IV] ²⁶⁾ , インボリ ューション発達。
小清水 ⁵²⁰⁾	Ks5	MIS 5d らしい		pfa	同上	3	4?	[K. pfa V] ²⁶⁾ , インボリ ューション発達。
クッチャロ羽幌 ¹⁸⁾	Kc-Hb	同一噴火輪廻 115~120 ST, FT		afa	ES? > 1000 km, W 500 km 図 2.4-10	5	7	本文参照, [K. P. flow- IV] ²⁰⁾ & [K. S.] ²⁰⁾ , [中標 津] ^{28, 29)} , [武佐] ^{12, 20)} , ク ッチャロカルデラ最大 のテフラ ²⁰⁾ , 釧路段丘 (MIS 5e の海成段丘) を おおう。
クッチャロ ⁴²⁰⁾	Kc-4			afa・pfa, pfi	conc. 70 km 図 2.4-10	4		
北見ピンク ²⁸⁾	Ktmp	Kc-4 直下		afa(vitric)				M1 海成段丘をおおう ²⁰⁾ 。 給源不明。

1) 徳井 (1989), 2) 道藤ほか (1988), 3) 山田 (1951), 4) 山田 (1968), 5) 藤井 (1982), 6) 宮田ほか (1988), 7) 藤井 (1988b), 8) Katru (1965), 15) 藤井 (1961), 16) 藤井 (1962), 17) 嵯峨山ほか (1985), 18) 佐藤 (1958), 19) Arat et al. (1986), 20) 藤井・佐藤 (1963), 21) 藤井 (2000), 28) 徳井 (1988), 29) 道藤ほか (1996), 30) 岩田 (1996), 31) 岡田ほか (1989), 32) 宮田 (1986), 33) 中村・平川 (2002)。

記号	主な鉱物	火山ガラス タイプ	ガラス n	opx γ	ho n ₂	模式地・その他
Ns-T ₂	opx, cpx	pm	1.519-1.522	1.705-1.710		別海町床丹
Ns-T ₃	cpx, opx	pm	1.517-1.520	1.706-1.710		同上
Ks1	opx, cpx	pm	1.512-1.515	1.706-1.710		小清水町東萱野
Ns-Ym	cpx, opx	pm	1.502-1.504	1.702-1.710		同上
Nl						別海町各地
Kc-Sr	opx, cpx	pm>bw	1.502-1.505 (1.503-1.504)	1.707-1.710 (1.708-1.709)		白糠町広路
Kc-1	opx, cpx, (oi)	pm	1.502-1.504	1.707-1.710 (1.707-1.709)		網走市オンネナイ川上流
Spfa-1	opx, cpx	pm	1.502-1.505 (1.503-1.504)	1.729-1.731		斜里町川上
Ks2	opx, cpx, ho	pm	1.505-1.515	1.707-1.710 (1.708-1.709)		網走市オンネナイ川上流
Ks3	opx, cpx, oi	pm	1.515-1.518 (1.516-1.518)	1.707-1.711 (1.708-1.710)		同上, 小清水町止別
Kc-2-3	opx, cpx	pm	1.503-1.508 (1.505-1.508)	1.707-1.710		網走市蕨琴
Aso-4	opx, (ho)	bw	1.509-1.512	1.700-1.702	(1.687)	同上, 斜里町中斜里
Shr	opx, cpx	pm	1.511-1.514	1.704-1.708		斜里町川上
Toya		pm, bw	1.496-1.498			同上, 主成分 ²²⁾
Ks4	opx, cpx			1.701-1.710		小清水町東萱野
Ks5	opx, cpx			1.707-1.710		同上
Kc-Hb	opx, cpx	bw	1.502-1.504	1.705-1.709		羽幌町幸町, 厚真町軽来
Kc-4	opx, cpx	bw, pm	1.502-1.506 (1.503-1.505)	1.707-1.710 (1.708-1.709)		網走, 中標津一帯, 釧路市大葉毛
Ktmp	(opx, cpx, ho)	pm	1.502-1.505			網走市オンネナイ川上流, 北見市開成

(1963), 9) 石塚ほか (1963), 10) 佐藤ほか (1964), 11) Katsui et al. (1975), 12) 松井ほか (1965), 13) 齋藤・北川 (1963), 14) 松井・国府谷田ほか (1986), 22) 町田ほか (1987a), 23) 松下ほか (1967), 24) 松井ほか (1967), 25) 渡・北川 (1964), 26) 奥村 (1991), 27) 宮地ほか

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

278 *Yogyo-Kyokai-Shi* 84 [6] 1976

S. TSUNEMATSU et al. 32

- 8) K. Shirasuka and G. Yamaguchi, *Yogyo-Kyokai-Shi* 83, 603-05 (1975).
 9) A.M. Alper, R.N. McNally, P.G. Ribble and R.C. Doman, *J. Am. Ceram. Soc.* 45, 263-68 (1962).
 10) A.M. Alper, R.N. McNally, R.C. Doman and F.G. Keihn, *J. Am. Ceram. Soc.* 47, 30-3 (1964).
 11) B. Phillips, S. Somiya and A. Muan, *J. Am. Ceram. Soc.* 44, 167-69 (1961).
 12) 山口悟郎, 白須賀公平, セラミックス 6, 955-57 (1971).
 13) 大庭宏, 杉田清, 島田康平, 耐火物 18, 10-22 (1966).
 14) 宗宮重行, 耐火物 24, 39 (1972).
 15) S.M. Zubakov and A.L. Dyukov, *Ogneupory* No. 9, 54-60 (1972).
 16) M.E. Fine, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 51, 510-15 (1972).

(9/25/1975 受付)

論文・Paper

シラスを主原料とする結晶化ガラス

恒松修二・井上耕三・松田応作

(九州工業技術試験所)

Crystallized Glasses Produced by the Use of a Volcanic Ash "Shirasu"

By

Shuji TSUNEMATSU, Kozo INOUE and Osaku MATSUDA
(National Industrial Research Institute of Kyushu)

"Shirasu" is a sort of volcanic ash broadly deposited in southern Kyushu and consists mostly of glassy aluminosilicate.

In this paper, the authors describe the crystallizing behavior of some glasses produced by using "Shirasu" as a raw material without addition of any crystal nucleus and discuss the correlations between the structures of crystallized glasses and their strengths.

The results obtained are summarized as follows:

1. Heat treatments of the glasses in the systems "Shirasu-CaO-MgO", Shirasu-CaO-ZnO" and "Shirasu-CaO-MgO-ZnO" caused the formation of the crystals of diopside, hardystonite- β -wollastonite and diopside-hardystonite- β -wollastonite respectively. An unknown crystal was detected in each of almost all of the specimens. All the crystals grew from the surface to the inside of the glass specimens.
2. By the crystallization, the softening temperature of all of the glasses examined rose from about 870°C to about 1200°C and their hardness in Mohrs increased from 5 to 8.
3. The glasses in the systems "Shirasu-CaO-MgO" and "Shirasu-CaO-MgO-ZnO", in which diopside precipitated on heating, did not show an increase in strength by any crystallization procedure, whereas the strength of the glasses in the system "Shirasu-CaO-ZnO" heat-treated for 2 hours were 2 to 3 times as high as those of the original glasses respectively. As the heating time was further increased, however, their once increased strengths dropped rapidly, regaining their original values.
4. The high strengths achieved by crystallization were discussed in terms of the shape of the formed crystals, the processes of the crystal growth, the appearance of crystal grain boundary, etc.

[Received September 29, 1975]

1. 緒 言

"シラスとは、南九州に広く分布する厚い軽石流(軽石凝灰角礫岩)、降下軽石層およびこれらの二次堆積層で、

第三紀から第四紀にかけて始良、阿多火山などから噴出したものである", と定義されている¹⁾。

従来、結晶化ガラスの製造法としては、結晶核形成剤

として Au, Ag, Cu などに加え紫外線, ガンマー線を照射する方法, Pt, Ru あるいは ZrO_2 , TiO_2 を用いる方法などがある²⁾.

シラスを主原料とし, これに CaO, MgO, ZnO など添加して得られるガラスは, 結晶核形成剤を添加することなく適当な熱処理によって結晶化する.

本報は, これらのガラス組成, 熱処理によって生成する結晶の種類, 結晶生成過程などと, 得られた結晶化ガラスの物性との関係について検討したものである.

2. 実験方法

2.1 ガラス試料の調製

ガラスの主原料として使用したシラスは, 鹿児島県重水市新城のシラス原鉱をボールミルで約 20 時間粉砕し -149μ としたものである. 表 1 にその化学成分および鉱物組成を示す. ガラス質と結晶質との分離は臭化亜鉛水溶液を用いる浮沈分離方法によった³⁾. 他の原料としては CaO, ZnO および MgO を用いた. CaO は市販の試薬特級沈降性炭酸カルシウムをシリコニット電気炉で 1100°C , 2 時間焼成し調製した. ZnO および MgO は, 市販の試薬一級酸化亜鉛, 試薬重質酸化マグネシウムをそれぞれ用いた.

表 2 に示す組成に調合したバッチ 2 kg をボールミルで 30 分間混合したものを高アルミナ増場に入れ, カンタルスーパー電気炉で 1400°C , 2 時間加熱熔融し, 水中に投入急冷してガラスをつくった. そのガラスを, 再度カンタルスーパー電気炉で 1500°C , 1 時間加熱熔融したのち, カーボンケースに流し込み電気炉で除歪みした. 冷却後ガラスをダイヤモンドカッターで切断し, カーボランダム 800 番で研磨して $3\times 5\times 50\text{mm}$ の大きさの棒状試験体を作成した.

2.2 示差熱分析

ガラス試料の熱変化を調べるため理学電機製自記記録示差熱分析装置により示差熱分析を行った. 基準物質として α -アルミナを用いた. 昇温速度は $10^\circ\text{C}/\text{min}$ とした.

2.3 結晶化のための熱処理

2.1 項に述べた方法によって作成した棒状ガラス試験体を, 予め 700°C および 900°C (これらの設定温度は 3.1 項参照) に設定した電気炉の均熱部に置き, それぞれの温度に一定時間保持した後, さらに $5^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温し, 1000°C および 1100°C で一定時間熱処理を行った. その熱処理条件を表 3 に示す. 熱処理の後, 電気

Table 2. Chemical compositions of Shirasu glasses (wt%).

No.	Shirasu	CaO	MgO	ZnO
1 ⁰	70	20	10	0
2	70	20	0	10
3	70	25	0	5
4	70	20	5	5

Table 3. Heat treatment conditions for glass samples.

No.	Holding	Heating rate	Holding
1	700°C 0.5h	$5^\circ\text{C}/\text{min}$	1000°C 2, 6, 24, 48h
2	" 2 "	"	" "
3	" 0.5 "	"	1100°C "
4	" 2 "	"	" "
5	900°C 0.5 "	"	1000°C "
6	" 2 "	"	" "
7	" 0.5 "	"	1100°C "
8	" 2 "	"	" "

炉より取り出し空冷したものを結晶化ガラスの曲げ強度用試験体とした.

2.4 曲げ強度

曲げ強度試験は, 中央上部から荷重を加える三点荷重法で行った. 支点間距離を 3 cm とし, 次式により曲げ強度 (σ) を求めた.

$$\sigma = 3IP/2bh^2$$

σ : 曲げ強度 (kg/cm^2), I : スパン (cm), P : 破壊荷重 (kg), b : 幅 (cm), h : 厚さ (cm)

曲げ強度 (σ) は試験体 5 箇の平均値である.

2.5 X線回折

熱処理により析出する結晶の種類, 結晶生成過程を知るため結晶化ガラスの X 線回折を行った. これには理学電機製自記 X 線回折装置 (CuK α 線, 35 kV, 15 mA) を用いた. 試料は珪乳鉢で指頭に感じない程度まで微粉砕したものをを用いた.

2.6 顕微鏡観察

結晶化ガラスを 3% 硝酸水溶液で約 1 分間エッチングし, 反射型光学顕微鏡で観察した.

2.7 結晶化ガラスの特性

結晶化によるガラス特性の変化を知るため結晶化前後の比重, 硬度および軟化温度を調べた.

結晶化ガラスは, ガラス試料を表 3 の No. 8 の条件で 48 時間熱処理したものをを用いた. 比重は粒度 $250\sim 425\mu$ としたものをを用い, ビクノメータによって測定した. 硬度測定にはモース硬度計を用いた. 軟化温度はリトルトン軟化点測定器によって測定した⁴⁾.

Table 1. Chemical composition and mineral component of the Shirasu.

Chemical composition (wt%)											Mineral component (wt%)		
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	P_2O_5	MnO	ig. loss	Total	Volcanic glass	Crystals
72.73	13.69	1.44	0.23	1.82	0.18	3.46	3.42	0.01	0.06	3.15	100.2	78.55	21.45

3. 実験結果

3.1 示差熱分析

一例として試料 No. 3 の示差熱分析結果を 図 1 に示す。703°C の吸熱はガラスの転移によると考えられる。906°C の発熱は結晶析出による発熱である。これは、910°C で熱処理したガラスの X 線回折によって β -wollastonite が析出していることで裏付けられる。他のガラス試料の転移温度および結晶析出温度も近似していた。

3.2 肉眼観察および顕微鏡観察

各ガラス試料の結晶化過程を肉眼および顕微鏡によって観察した。そのいくつかの結果を 図 2~5 に示す。

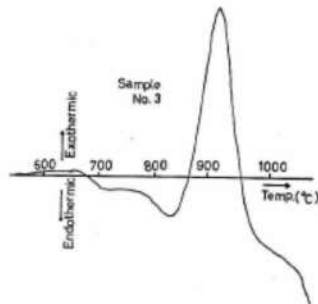


Fig. 1. Differential thermal analysis of the "Shirasu" glass.

図 2 は試料 No. 4 (試料の大きさ、約 $15 \times 10 \times 15$ mm) を熱処理した後ダイヤモンドカッターで切断した断面であり、結晶層が試料表面から内部に向かって厚くなっている状態を示す。なお、試料 No. 3 の熱処理条件 3, 4, 7 および 8 以外は、すべて 図 2 と類似の結晶層生成過程をとった。

図 3~5 はガラス試料を熱処理することにより生成した結晶断面についての顕微鏡観察結果の中から特徴的なものを示したものである。図 3~5 の中で、たとえば試料 No. 1 を 表 3 に示した熱処理条件 4 で処理したものは、以下 [1-4] のように記す。

たとえば 図 3 に示す [1-4] では、すでに 2 時間で樹枝状結晶層は試料内部まで生成しており、その後の時間

の経過に伴って結晶粒界が明瞭になる。[4-7] についてもほぼ同様の経過を示すが、針状結晶がやや大きく、樹枝状を呈する。一方、図 4 [2-5] および [3-5] の結晶は、図 2 に示したと同様にガラス表面より成長し、熱処理 2 時間では結晶層によってコーティングされた状態となることが肉眼により観察された。[2-5] および [3-5] はガラス表面から内部に向かって樹枝状に成長した結晶層を示す。図 5 [2-7] では 6 時間以上経過するとそれまでの針状結晶が微細な粒子状結晶に変化し、[3-7] ではすでに 2 時間で針状結晶と粒子状結晶が混在した状態となる。

なお、顕微鏡観察によると再加熱前のガラス表面には研磨による直線状の鋭いキズが多数認められたが、再加熱した試料にはなめらかになったきわめて少数のキズが残存していた。

3.3 X 線回折

各ガラス試料を 900°C から 5°C/min で 1100°C まで昇温し、1100°C で 48 時間保持し、得られた結晶化ガラスの X 線回折図を 図 6 に示す。試料 No. 1 は diopside ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$) と 2θ が 27.8° の未知結晶 (この結晶は現在不明)、試料 No. 2 は hardystonite ($2\text{CaO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2\text{SiO}_3$)、試料 No. 3 は β -wollastonite ($\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、hardystonite および未知結晶、試料 No. 4 は diopside, hardystonite および未知結晶がそれぞれ認められた。

つぎに、結晶化により高強度を示すことのある試料 No. 2 および No. 3 の結晶化ガラスについて X 線回折を行い、熱処理条件と析出結晶の種類との関係について調べた。その結果を 図 7 および 8 に示す。図 7 [2-2] によれば、24 時間の熱処理によって hardystonite の結晶成長はほぼ終わったものと見られる。また、6 時間以上では時間の経過に伴い前記未知結晶が成長した。[2-8] の結晶化ガラスは、2 時間でもシャープな hardystonite のピークが見られ、2 時間から 48 時間までの回折ピーク高さの差はほとんどない。この結晶化ガラスには未知結晶は認められなかった。図 8 [3-5] では、熱処理 2 時間から 6 時間の間に β -wollastonite, hardystonite および未知結晶が成長している。[3-7] では 2 時間でシャープな β -wollastonite が見られるが、時間の経過と共に結晶ピークは小さくなり、逆に hardystonite が成長している。また、24 時間まででたなかった未知結晶が 48 時間ではかなり成長している。

3.4 結晶化による諸特性の変化
各結晶化ガラスの諸特性を 表 4 に示す。試料 No. 1 の結晶化前後の比重差は試料中最も大きく、その

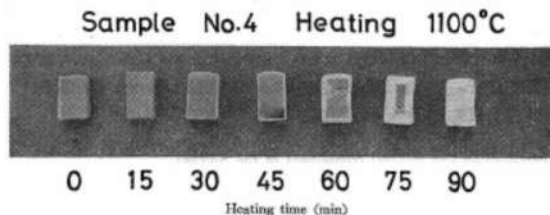


Fig. 2. Crystallization process from outside to inside of "Shirasu" glass.

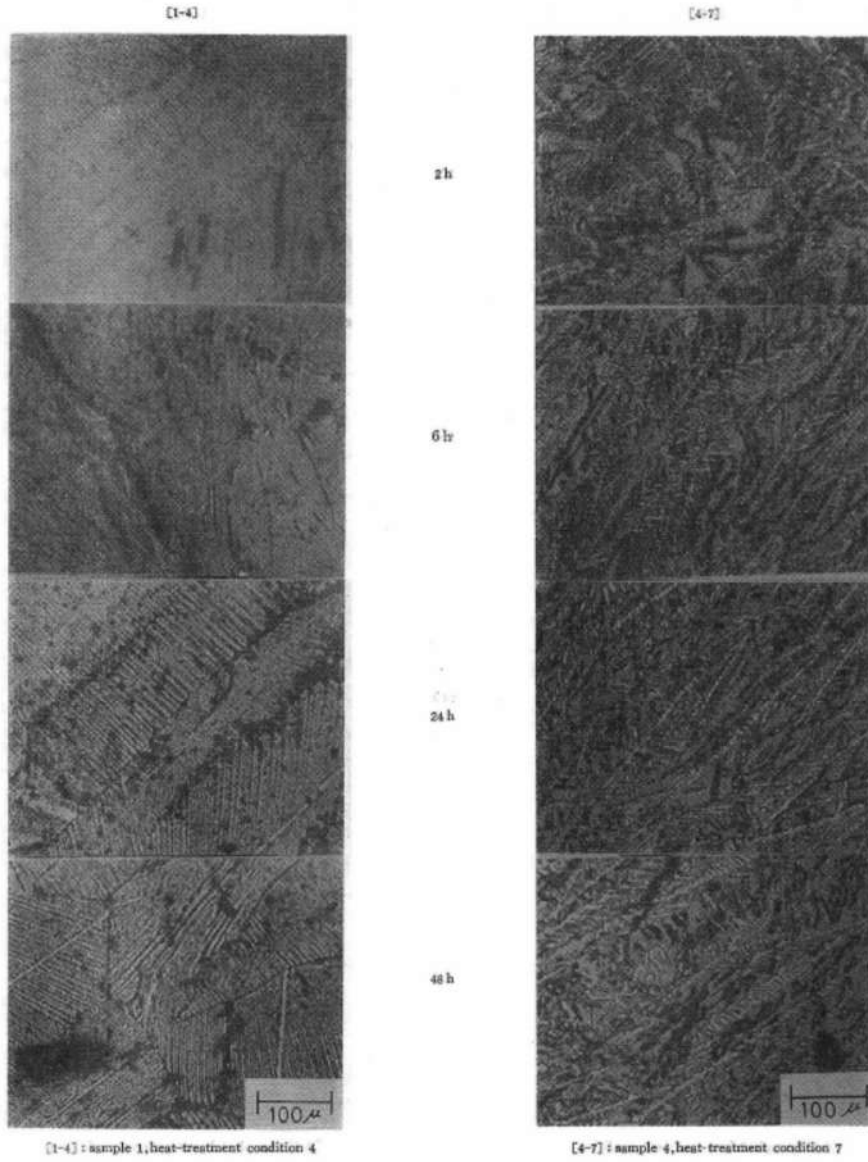


Fig. 3. Photo-micrographs of crystallized glasses.

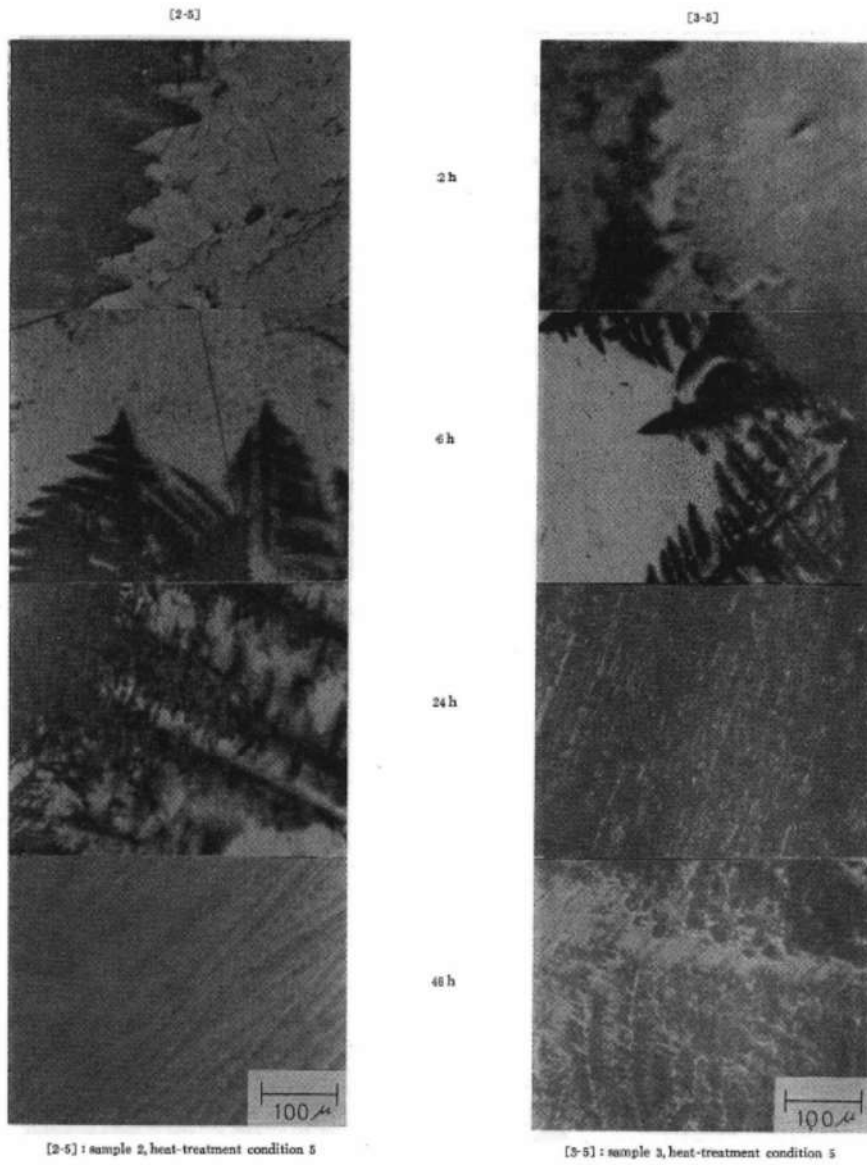


Fig. 4. Photo-micrographs of crystallized glasses

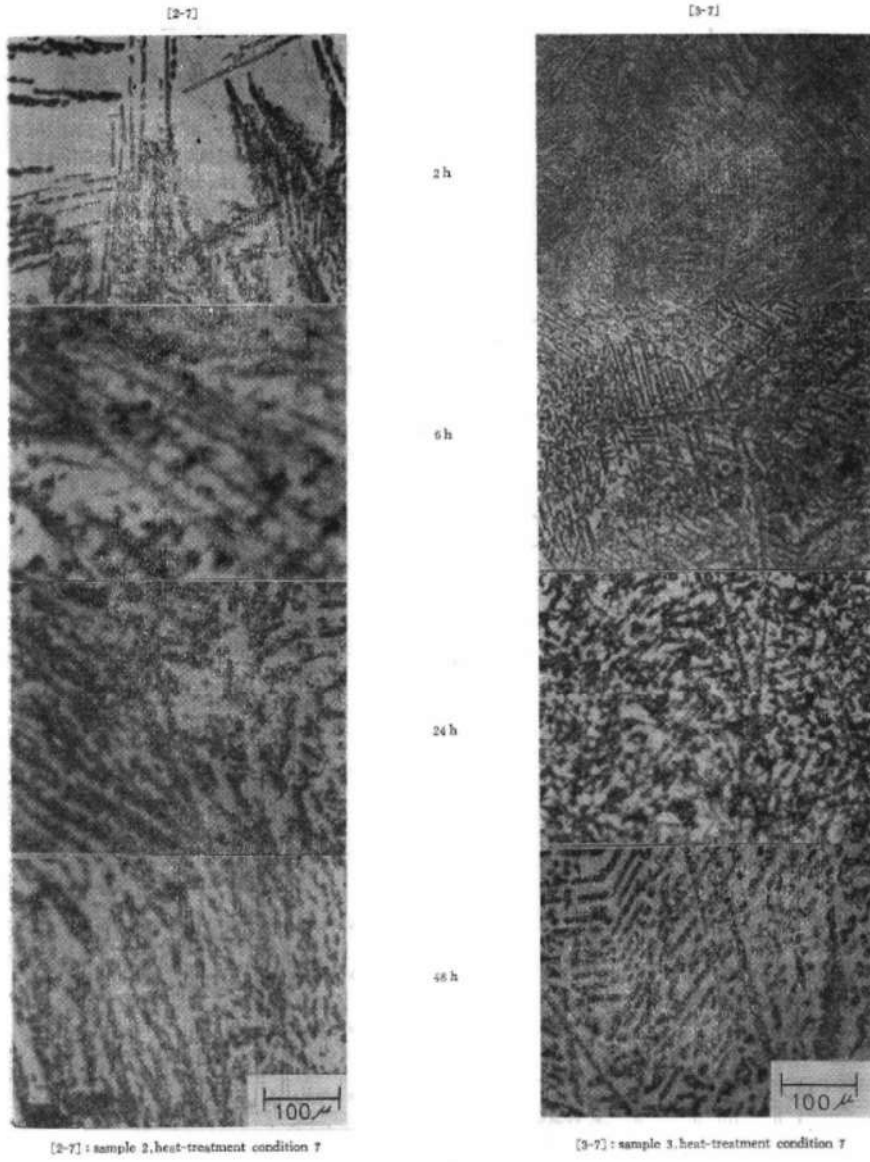


Fig. 5. Photo-micrographs of crystallized glasses.

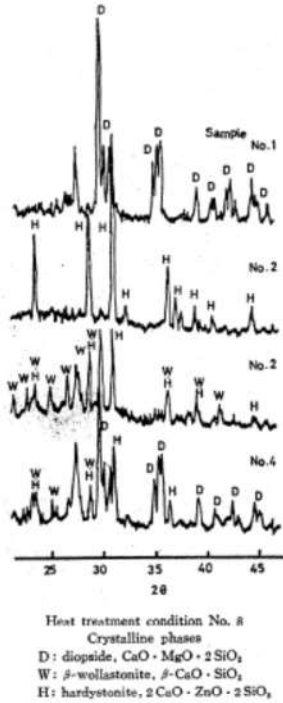


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the heat-treated glasses.

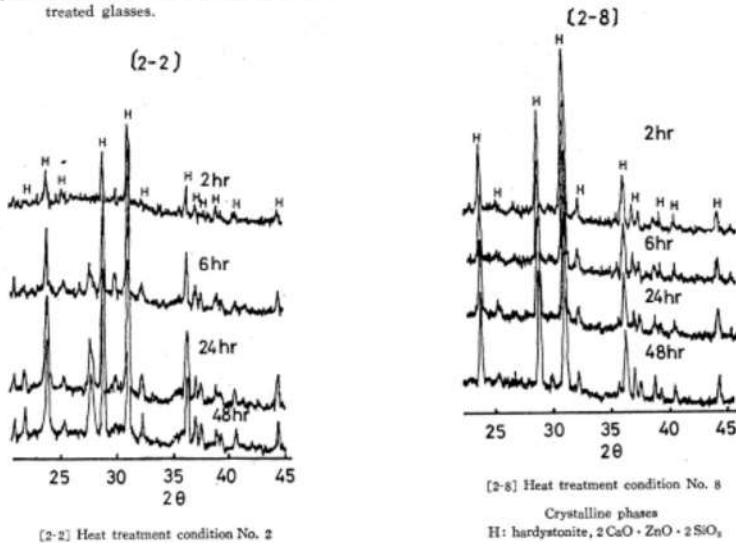


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of the heat-treated glass sample No. 2.

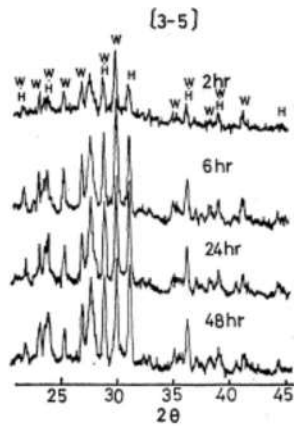
軟化温度は結晶化前後において 873°C から 1200°C 以上 (測定器限界 1200°C) となった。他の試料の軟化温度の変化も、ほぼ近似したものであった。モース硬度はいずれの試料も、結晶化によって 5 から 8 に向上した。

3.5 曲げ強度

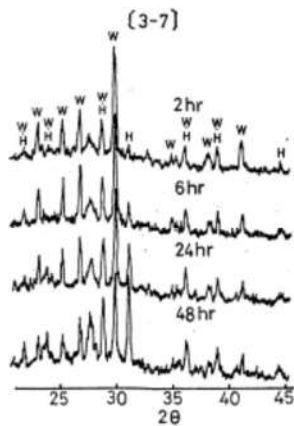
結晶化ガラスの曲げ強度を 図 9 に示す。試料 No. 1 および No. 4 は全般的に低強度で、熱処理条件による強度変化は小さい。試料 No. 2 および No. 3 について結晶化のための再加熱を行わない場合 (図 9 の Time 0 に相当) の曲げ強度は 700~800 kg/cm² であったが、何れの熱処理条件においても、熱処理 2 時間で曲げ強度は 1800~2700 kg/cm² に達するピークを示した。これは、結晶化のための再加熱を行わないガラスの 2~3 倍の値である。その後の熱処理時間の経過に伴い、曲げ強度は全般的に低下の傾向を示すが、試料 No. 2 に限り熱処理条件 3, 4, 7 および 8 による結晶化ガラスは、一旦 1000 kg/cm² 程度に強度が低下した後再び 2000 kg/cm² 程度まで増大した。

4. 考 察

以下、結晶化ガラスの曲げ強度について考察する。試料 No. 1 の結晶化ガラスでは、図 3 [1-4] に見られるように樹枝状の diopside の結晶粒界が発生したこと、それに 表 4 に示したように、結晶化前後の比重差が大きいために剝離、空洞化および変形などの現象がお



[3-5] Heat treatment condition No. 5



[3-7] Heat treatment condition No. 7

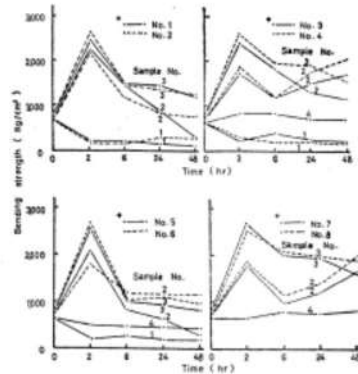
Crystalline phases
 W: β -wollastonite, β -CaO · SiO₂
 H: hardystonite, 2CaO · ZnO · 2SiO₂

Fig. 8. X-ray diffraction patterns of the heat-treated glass sample No. 3.

Table 4. Properties of crystallized glass and Shirasu glass.

	Shirasu glass				Crystallized glass*			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Specific gravity	2.70	2.77	2.75	2.76	2.95	2.78	2.79	2.78
Hardness (Mohr's)	5	5	5	5	8	8	8	8
Softening point(°C)	873	868	875	870	over	1170	1190	over

*Heat treatment condition No. 8



*Heat treatment condition for glass samples (Table 3)

Fig. 9. Bending strength of the heat-treated glasses.

きたため低強度になったものと考えられる。

試料 No. 2 は熱処理条件 1, 2, 5 および 6 のいずれにおいても、熱処理 2 時間で最高強度を示した。これらの結晶はガラス表面より成長したが、2 時間では内部まで成長しておらず、試験体は微細な結晶によってコーティングされた状態であり、しかも結晶化のための再加熱を行わないガラス表面に無数にあった傷は、結晶化したガラス表面にはほとんどなくなっている。このことは再加熱によって、ガラスが軟化流動化過程を経て結晶化したためと思われる。また、結晶の方がガラスより一般に熱膨脹率が小さい。このため電気炉より取り出し、空冷された状態では表面の結晶部分に圧縮応力が生ずることが考えられる¹⁷⁾。以上のようなことが高強度を示した原因と考えられる。前記熱処理条件におけるこのような強度変化は、試料 No. 3 についても、同様の説明がなされよう。試料 No. 2 の熱処理 6 時間以上では強度が低下したが、これは内部に向かって成長した結晶が針状に成長しているのと関係があるろう。また、図 7 [2-2] に見られる 2θ 27.8° の未知結晶の成長と共に強度も低下しているのも見逃せない。熱処理条件 3, 4, 7 および 8 においても、2 時間から 6 時間にかけて強度は低下しているが、以後増大している。これについて考察すると、従来、高強度を示す結晶化ガラスは、その結晶形態が微細な粒子状とされている¹⁸⁾。このことから試料 No. 2 について 6 時間以上の強度増大は、図 5 [2-7] に示したように、6 時間で内部まで成長した針状結晶が、以後微細な粒子状結晶に変化していることによると考えられる。また、6 時間以上で強度が回復する段階では、図 7 [2-8] に示されるように、未知結晶は認められず、結晶化前後の比重差が小さいために判別、空洞化および変形な

どの現象も認められなかった。

試料 No. 3 を熱処理条件 7 で熱処理した場合には、熱処理条件 1, 2, 5 および 6 の場合ほど 2 時間から 6 時間にかけての極端な強度低下はなかった。このことは図 5 [3-7] に示すように、すでに 2 時間で微細な粒子状結晶が生成していることと関係あろう。この場合、図 8 [3-7] の X 線回折図を見ると、 β -wollastonite のピークは時間の経過と共にやや小さくなり、逆に hardystonite、未知結晶のピークは伸びている。これが、その後の強度低下の原因と考えられる。試料 No. 3 について、熱処理条件 5 と 7 の 24 時間における曲げ強度を比較してみると、それぞれ約 1000 kg/cm² および約 2000 kg/cm² で後者の強度は前者のその約 2 倍であった。この時、 2θ 27.8° の未知結晶のピーク高さは図 8 に示されるように前者が後者の約 2 倍であり、未知結晶の強度におよぼす影響は大きいと考えられる。

試料 No. 4 では、熱処理時間による強度変化はきわめて小さかった。このことは、図 3 [4-7] の顕微鏡写真に示すように、時間経過による結晶形態の変化が少ないことと関連づけられる。

5. ま と め

1) 本研究に使用したガラス試料は、熱処理によって結晶化し、試料 No. 1 では diopside、試料 No. 2 では hardystonite、試料 No. 3 では β -wollastonite と hardystonite、試料 No. 4 では diopside、hardystonite および β -wollastonite が析出し、さらに試料 No. 2 の熱処理条件 3, 4, 7 および 8 以外の試料では、 2θ 27.8° に未知結晶が生成した。これらの結晶は試料 No. 3 の熱処理条件 3, 4, 7 および 8 以外の試料ではいずれもガラス表面から内部に向かって成長した。

2) 生成結晶に樹枝状の diopside を含む試料 No. 1 および No. 4 は、結晶化速度は早い結晶化による強

度増大は認められなかった。試料 No. 2 と No. 3 はいずれも熱処理 2 時間で最高強度を示し、熱処理前のガラス強度の 2~3 倍となった。

3) 試料 No. 2 および No. 3 の結晶化ガラスについて最高強度を示したときの試験体の状態は、その表面を結晶層がおおっており、高強度を示した理由として表面圧縮応力の発生、表面の傷の消失などの効果が考察された。試料 No. 1 は結晶化前後の比重差がとくに大きく変形、空洞の発生および結晶層の剥離などの現象と共に結晶粒界の成長などが低強度の原因と考えられる。

4) 試料 No. 2 の後熱処理温度が 1100°C の時に限り、熱処理時間の経過に伴って一旦低下した強度が再び増大した。これは、針状の hardystonite が粒状化して行く事実と関係するものと考えられる。

5) 試料 No. 1, No. 3 および No. 4 には 2θ 27.8° に未知結晶が生成し、この結晶の成長が著しい場合強度低下の現象が認められた。

6) いずれのガラス試料も結晶化によってモース硬度は 5 から 8 に増大し、軟化温度も約 870°C から約 1200°C に向上した。

文 献

- 1) 鹿児島県未開発資源企業化対策協議会、九州工業技術協会「シラス」(1970) p. 1~11.
- 2) 「ガラス工学ハンドブック」,(1973) p. 775-880.
- 3) 鎌山幸男, 陣内和彦, 古賀義明, 九州工業技術試験所報告 No. 2, 84-86 (1969).
- 4) 藪田徳幸, 中 重明, 野元一郎, 鹿児島県工業試験場業務報告 p. 11-14 (1967).
- 5) JIS R 3104, ガラスの軟化点試験法 (1970).
- 6) 山本 明, 山手 有, 功刀雅長, 材料 13 [134] 880-84 (1964).
- 7) 「無機材料科学」, p. 170-75 (1973).
- 8) 作花 濟夫, 和田正造, 田代 仁, 窯協 69 [2] 55-68 (1961).

(9/29/1975 受付)

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

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

小 田 匡 寛*
 塚 本 文 勇**
 鈴 木 正***

1. ま え が き

基本的には、土の力学的性質は土粒子の基本的要素（土粒子の材質、土粒子の粒度組成、土粒子の形状、土粒子表面のあらさ、吸着イオンの質と量）と土粒子の集合状態（密度、含水量、骨組構造）とによって決定される¹⁾。土粒子の粒度組成、密度、含水量などの影響因子に関する実験的研究はしばしば報告されてきたが、測定技術の普及が遅れている土粒子の材質、土粒子の形状、土粒子表面の粗さ、骨組構造などが、土の土質工学的性質に及ぼす影響についての理解はきわめて定性的である。この研究は砂粒子の基本的要素、とくに砂粒子の材質、砂粒子の形状、表面のあらさなどが、砂の土質工学的性質、とくにせん断抵抗、最大・最小間ゲキ比などに及ぼす影響について検討したものである。この種の研究は、砂質土の合理的な分類を実施するためにも不可欠なものであろう。すなわち、砂質土の土質工学的性質を決定する最も基本的な支配因子は何であるかについての知識が、砂質土の分類の前提条件であらう。

先にも述べたように、砂の力学的性質は砂粒子の基本的要素のみならず、砂粒子の集合状態の関数でもある。それゆえに、砂粒子の基本的要素だけでは砂の強度・変形常数は定まらない。しかし、砂粒子の集合状態は、他とまったく独立して決定されるものではなく、粒子形状、粒度組成、粒子表面のあらさなどによっても支配されている。たとえば、砂の間ゲキ比の取り得る範囲は砂の表面のあらさ、粒度組成などによって支配されており、また、砂粒子の長軸の方向性および粒子間接点での接平面の方向性は粒子形状、とくに細長比に支配されることが示されている^{2),3)}。

粒子の基本的要素が砂の強度、変形常数に直接影響を与え、かつ砂粒子の集合状態（構造）をある程度決定するという考えを合わせれば、砂の基本的要素の測定方法の開発およびその測定量と強度・変形常数との相関

関係について、現時点で究明しておくことは意味のあることと思っている。

この研究報告の前半は砂の基本的要素、とくに鉱物組成、砂粒子の形状、砂粒子表面のあらさの測定方法と測定結果を示し、後半は直接せん断試験、最大・最小間ゲキ比試験について述べ、さらに基本的要素の測定結果とせん断抵抗・最大・最小間ゲキ比などの土質工学常数との相関関係を示している。

表—1 試料の採取地、粒径・粒度、比重

試料名	採取地	粒径・粒度	比重	備考	
A 砂	山口県・徳山	A ₁ ^{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.63	海砂
		A ₂ ^{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.64	
		A ₃ ^{0.42} _{0.25}	0.42~0.25	2.64	
B 砂	栃木県・鹿野	B ₁ ^{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.67	庄原ホルンフェルトの砂
		B ₂ ^{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.67	
		B ₃ ^{0.42} _{0.25}	0.42~0.25	2.68	
C 砂	福岡県・相馬	C ₁ ^{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.65	砂岩の砂
		C ₂ ^{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.65	
D 砂	不明	D ₁ ^{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.67	—
		D ₂ ^{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.67	
E 砂	埼玉県・小栗野	E ₁ ^{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.70	河川砂 (荒川上流)
		E ₂ ^{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.71	
		E ₃ ^{0.42} _{0.25}	0.42~0.25	2.71	
F ₁ ^{1.19} _{0.84} 砂	埼玉県・小栗野	1.2~0.84	2.71	河川砂 (荒川上流)	
G ₁ ^{0.84} _{0.42} 砂	山口県・鹿野	0.42~0.25	2.64	標準標準砂	
H ₁ ^{1.19} _{0.84} 砂	栃木県・関谷	1.2~0.84	2.67	河川砂	
I ₁ ^{1.19} _{0.84} 砂	愛知県(穴作川)	1.2~0.84	2.66	河川砂	
J ₁ ^{0.84} _{0.42} 砂	新潟県	0.42~0.25	2.66	—	

2. 試 料

本実験に使用した砂の試料は 10 種類 (A 砂……J 砂) で、その採取地、比重および粒径・粒度を表—1 に示し

* 埼玉大学理工学部建設基礎工学科
 ** 建設技術研究所
 *** 農材部

No. 607

た。なお採取した砂は、水洗い後乾燥して、1.19, 0.84, 0.42, 0.25 mm の各フルイでフルイ分けた。実験に使用した砂は、便宜上、たとえば、 M_{10}^{10} で表わし、これは 1.19 mm フルイを通過し、0.84 mm フルイに留まる A 砂を示すことにする。

3. 構成粒子の基本的要素の測定方法と測定結果

三笠正人¹⁾ は砂の種類を規定する因子として必要かつ十分なものとして次の5つの性質をあげている。それは、土粒子の材質、土粒子の粒度組成、土粒子の形状、土粒子表面のあらさ、吸着イオンの質と量である。これらの規定因子としての性質を具体的、定量的に把握するために測定すべき量は、鉱物組成、有機物含有量、比重、最大粒径、有効径、均等係数、粘土分含有量、球形率、丸味率、pH 値、各種イオン含有量である。本研究に使用した砂は水洗い後乾燥しているため、有機物含有量、粘土分含有量、pH 値、各種イオン含有量の測定は問題にならない。また使用した砂の粒径・粒度は 1.19~0.84mm, 0.84~0.42 mm および 0.42~0.25 mm の3種で狭い粒度範囲なので、ほぼ均一径と見なせるものとして今後の議論を進める。比重は砂の鉱物組成に完全に依存するので、独立変数とは見なさない。洗いかつフルイ分けた砂の試料では、結局、鉱物組成、球形率、丸味率および粒径が砂の構成粒子の特性を把握するために測定すべき量である。

3.1 砂粒子の細長比と円摩度

粒子の形状測定はタイ積学²⁾ や管材研究³⁾ などによって古くから研究されている。それらの研究によると、粒子形状と粒子表面のあらさを明確に区別すべき概念として扱っている。粒子形状を表現する量として Krumbain のスフェリシティー⁴⁾ があり、粒子表面のあらさ測定には Waddell の円摩度⁵⁾ がある。スフェリシティー、円摩度とともに極めて良好な測定量を与えるが、測定が極めてはんだであり、粒径の小さい砂に直接応用するのは不可能に近い。この研究ではこれらに代るものとして、細長比と修正円摩度とを用いた。

細長比……細長比測定の概略は次のとおりである⁶⁾。直径 5 cm, 高さ 10 cm の円筒容器に適当量の砂を詰め、低粘性接着剤を粒子間に浸透させた後、固結させる。固結した砂試料の鉛直断面と水平断面とにおける顕微鏡観察を実施するために、それぞれの断面における厚さ約 0.03 mm の偏光顕微鏡用薄片を作る。鉛直断面から無作為に M 個の粒子を抽出し、選定した粒子の断面内において見掛けの長軸と短軸との長さ a_i, b_i を測定し 1つの粒子の細長比 $(\frac{b_i}{a_i})$ を求める。 $\bar{n} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (b_i/a_i)$

を砂の細長比とし、粒子形状のパラメーターとした。先の報告において⁷⁾、砂の細長比は砂の構造、すなわち粒子の長軸の方向性、粒子間接点における接平面の方向性などを支配していることを実験的に実証した。この意味においても、平均的細長比 \bar{n} を粒子形状のインデックスとして利用できると判断している。

修正円摩度……Waddell⁵⁾ は粒子内に、直交する三軸を考え、その長軸と中間軸とを含む平面に粒子を投影し、次式によって円摩度 R_i' を求めた。

$$R_i' = \frac{\sum_{j=1}^n r_j'}{n} \quad \left(\begin{array}{l} r_j' : \text{粒子の先端部分の曲率半径} \\ r_n' : \text{粒子に内接する最大円の半径} \\ n : \text{曲率半径の測定数} \end{array} \right)$$

この方法は測定の選定に個人差が生じやすく、測定時間が長くなるなどの欠点を持っている。Waddell の円摩度を若干修正し、1つの粒子の修正円摩度 R_i を

$$R_i = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{2r_1^i}{l_1^i} + \frac{2r_2^i}{l_2^i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{2r_3^i}{l_3^i} + \frac{2r_4^i}{l_4^i} \right) \right\} \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{r_1^i + r_2^i}{l_1^i} + \frac{r_3^i + r_4^i}{l_3^i} \right)$$

で定義する。

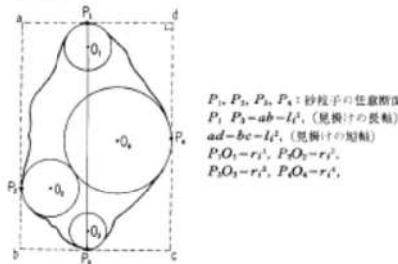


図-1 修正円摩度測定

図-1 に示したように、 $r_1^i, r_2^i, r_3^i, r_4^i$ はそれぞれ粒子の任意断面の点 P_1, P_2, P_3, P_4 における曲率半径とし、 l_1^i, l_2^i をそれぞれ ab, bc の長さとする。 $\frac{2r_1^i}{l_1^i}, \frac{2r_2^i}{l_2^i}, \frac{2r_3^i}{l_3^i}, \frac{2r_4^i}{l_4^i}$ が小さい程、点 P_1, P_2, P_3, P_4 の先端は丸みのないものとなる。粒子の断面が円となるならば、 $\frac{2r_1^i}{l_1^i} = \frac{2r_2^i}{l_2^i} = \frac{2r_3^i}{l_3^i} = \frac{2r_4^i}{l_4^i} = 1$ となり、 $R_i = 1$ である。 $\frac{2r_1^i}{l_1^i} > 1$ の場合は、 P_1 の先端部分を凸部として認めず、 R_i を

$$R_i = \frac{1}{2} \left(\frac{2r_2^i}{l_2^i} + \frac{r_1^i + r_4^i}{l_1^i} \right) \text{ で求める。}$$

前述の細長比測定に使用した鉛直断面と水平断面の薄片から 70~100 個の粒子断面を無作為に抽出し、 R_i の平均値

$$\bar{R} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{r_1^i + r_2^i}{l_1^i} + \frac{r_3^i + r_4^i}{l_3^i} \right) \\ \text{(ただし、Mは測定個数)}$$

表-2 砂粒子の基本的性質

試料名	細長比 #	修正円摩度		鉱物組成 (百分率)							構成粒子の風化と破砕性		
		\bar{R}	Q	Q_{ag}	Q_c	F_e	R.F.	M	P.A.	O.			
A	$\frac{1.19}{0.84}$	0.675	0.14	29.0	29.5		36.0		4.5		2.0	砂粒子(とくに、雲母、長石)の風化が進み、粒子の破砕性はいろいろしい。	
	$\frac{0.84}{0.42}$	0.618	0.15	36.7	21.4		33.8		4.3		3.8		
	$\frac{0.42}{0.25}$	—	0.24	49.3	8.4		27.1		6.0		9.1		
B	$\frac{1.19}{0.84}$	0.698	0.13	28.5	58.5	1.0			2.5		9.5	大きな粒子は小さな石英の単結晶の集合体であり、たがえて破砕性のいろいろしい粒子である。	
	$\frac{0.84}{0.42}$	0.700	0.24	70.5	26.0	0.5			0.5		2.5		
	$\frac{0.42}{0.25}$	0.706	0.28	84.5	12.5				1.0		2.0		
C	$\frac{1.19}{0.84}$	0.696	0.37	74.5	17.0		8.5					大部分が石英、長石の単結晶からなり、破砕性は小さい。	
	$\frac{0.84}{0.42}$	0.671	0.30	78.0	10.5	1.0	10.5						
D	$\frac{1.19}{0.84}$	0.607	0.20	6.4	8.1	59.2	3.9	19.3			3.0	破砕強度の大きいチャートの岩片が多く、砂の破砕性は小さい。	
	$\frac{0.84}{0.42}$	0.668	0.21	11.9	7.2	53.2	3.4	23.0			1.3		
E	$\frac{1.19}{0.84}$	0.573	0.27	0.5	7.9	21.8		69.3			0.5	破砕強度の小さいケツ岩の岩片が多数に含まれており、A砂、B砂ほどではないが、粒子の破砕性はかなり大きい。	
	$\frac{0.84}{0.42}$	0.539	0.20	2.3	6.4	30.6		59.8			0.9		
	$\frac{0.42}{0.25}$	0.626	0.25	7.5	5.3	25.4	0.4	58.3			3.1		
F	$\frac{1.19}{0.84}$	0.662	0.22	3.1	10.7	48.0	1.8	29.8				6.7	破砕性は小さい。
G	$\frac{0.42}{0.25}$	0.606	0.25	72.5	1.5	1.0	21.5			0.5		3.0	風化程度の低い石英・長石の単結晶からなり、破砕性はきわめて小さい。
H	$\frac{1.19}{0.84}$	0.641	0.20	11.0	2.5	2.5	2.5	81.0				0.6	多乳質粒子からなり、破砕性はかなり大きい。
I	$\frac{1.19}{0.84}$	0.657	0.19	22.5	22.5	1.4	41.3			3.2		9.2	破砕性は小さい。
J	$\frac{0.42}{0.25}$	0.679	0.22		49.3		8.4	12.4	0.4	14.7	14.7		粒子の風化が進み、破砕性は大きい。

で砂の修正円摩度とした。

この方法により求めた修正円摩度は Krumbein による visible chart とよく対応しており、また円摩度測定にともなう個人差も少なくすることができ、短時間で測定可能という優れた点を持った方法である。各種の砂について測定した \bar{R} 、 R を表-2 に示したが、0.42~0.25 mm およびそれ以下の粒径では、測定技術上若干の疑問があり、今後 0.25 mm 以下の粒子の精度のよい測定ができるように改良したい。

3.2 鉱物組成の測定

砂粒子としてごく一般的にみられる鉱物は、石英、長石類(加里長石、斜長石)、雲母類、角セン石類、輝石類、磁鉄鉱、かん鉄鉱などである。その他に、チャート、ケツ岩、火成岩、変成岩を起源とする岩片がある。チャートの岩片は石英の微晶ないし非結晶質の SiO₂ からなり、ケツ岩の岩片は粘土鉱物、雲母、炭質物質、石英などの微晶鉱物からなり、火成岩および変成岩の岩片は石英、長石、雲母、角セン石、輝石などの鉱物の集合体である。Horn³⁾、Rowe⁴⁾ などが実験的に求めた鉱物の粒子間摩擦角(ϕ_p)などを考慮して、砂粒子を次の8種に識別し記載した。

February, 1971

石英(記号:Q): 1つの砂粒子が1~2個の石英単結晶粒子からなるもの。

石英の集合体(記号:Q_{ag}): 1つの砂粒子が3~20個の石英粒子の集合体をなすもの、他の鉱物も若干含む。

チャートの岩片(記号:Q_c): 石英の微晶粒子が非結晶の SiO₂ からなるもの、不純物も含む。

長石類(記号:Fe): 加里長石と斜長石を含む。他の鉱物と集合体をなす場合には、長石類の占める体積が大きい時このグループに入れる。

チャート以外で、微結晶からなる岩片(記号:R.F.): ケツ岩と火山岩の岩片が大部分を占める。

雲母類(記号:M): 白雲母と黒雲母とを含む。

輝石、角セン石(記号:P.A.)

その他(記号:O): 上述以外の副成分鉱物と変成岩および一部の火成岩の岩片を含む。

砂試料から無作為に抽出した 200 個の砂粒子を偏光顕微鏡を用い、上述の分類にしたがって識別し、その結果を表-2 に示した。

3.3 粒子の破砕性

砂の側方拘束圧縮試験⁵⁾ および高側圧三軸圧縮試験⁶⁾

No. 807

結果によると、砂粒子の破砕性が試験結果を大きく左右する。この事実から構成粒子の強度を考慮した分類が望ましい。しかし、上述の分類では岩片の強度を決定する粒子の風化程度や粒子間結合力などは無視せざるを得なかった。そこで、構成粒子の風化程度や破砕性について定性的な記述を表-2 に示した。

4. 最大・最小間ゲキ比試験と直接せん断試験

4.1 最大・最小間ゲキ比試験

最大・最小間ゲキ比は砂粒子の形状、表面のあらさ、粒径・粒度などの砂の基本的性質に依存すると同時に、測定方法によっても相当大きく異なった値を示す。測定容器の大きさ、詰め込み速度、詰め込み方法、詰め込み時間、含水状態などの影響を受ける。砂の e_{max} 、 e_{min} の重要性はすでに認識されているが、かならずしも統一した試験方法は確立されておらず、各研究者によって報告されている豊浦標準砂の測定結果も相当にばらついている現状である。

最大間ゲキ比 (e_{max})……Kolbuszewski⁽¹⁾ は粒子の落下速度、詰め込み時間、容器の大きさ、水の影響などについて詳しく実験し、 e_{max} の測定法について次のよ

うな提案をした。2000 cc の円柱状容器に 1000 g の砂を入れ、よく振り、容器を逆さにする。その後で、すばやく容器をもとの状態に戻し、その時の砂の状態における砂の間ゲキ比を測定する。

本研究では直径 5 cm、長さ 20 cm の円筒容器を用い、ほぼ Kolbuszewski の方法に従って求めた。

最小間ゲキ比 (e_{min})……最大間ゲキ比の場合と同様 Kolbuszewski の実験がある。しかし、氏の提案している方法は砂粒子の破砕(特に A, B 砂の場合はいちじるしい)が認められ、今回の実験には不相当であると判断した。そこで、便宜的に砂粒子の破砕が少ない、次のような測定法を採用した。

直径 5 cm 高さ 10 cm の円筒容器に砂を 3 層に分け注ぎ込む。各層ごとに上方に 0.85 kg のオモリを置き、容器の側壁を 50 回連打する。以上のようにして求めた e_{max} 、 e_{min} を表-3 に示した。

4.2 直接せん断試験

試験方法……本研究に使用した試験機は下部可動直接せん断試験機である。この型の試験機はせん断時の試料の膨張に際し、試料とせん断箱内壁との間に大きな側面摩擦が働くため、三軸圧縮試験や上部可動直接せん断

表-3

試料名	最大間ゲキ比 e_{max}	最小間ゲキ比 e_{min}	$e_{max}-e_{min}$	ϕ_1 (度)	ϕ_1' (度)	ϕ_2 (度)	ϕ_2' (度)	C_1 (kg/cm ²)	C_1' (kg/cm ²)	相対密度 (%)	
A 砂	A ^{1.19} _{0.84}	1.126	0.578	0.448	56.5	56.5	44.0	44.0	0.10	0.05	90
	A ^{0.84} _{0.42}	1.235	0.785	0.450	55.6	54.0	46.0	47.0	0.20	0.14	95
	A ^{0.42} _{0.25}	1.314	0.816	0.498	47.5	47.5	—	—	0.25	0.21	88
B 砂	B ^{1.19} _{0.84}	1.126	0.705	0.421	62.0	62.0	46.5	46.5	-0.20	-0.4	98
	B ^{0.84} _{0.42}	1.124	0.695	0.429	53.0	51.0	38.6	39.0	0.16	0.12	96
	B ^{0.42} _{0.25}	1.132	0.714	0.418	—	—	—	—	—	—	—
C 砂	C ^{1.19} _{0.84}	0.859	0.539	0.320	45.5	43.5	—	—	0.13	0.10	86
	C ^{0.84} _{0.42}	0.951	0.610	0.341	50.6	49.0	—	—	0.16	0.12	100
D 砂	D ^{1.19} _{0.84}	1.057	0.691	0.366	54.0	52.5	—	—	0.05	0.04	100
	D ^{0.84} _{0.42}	1.132	0.740	0.392	52.5	51.5	—	—	0.12	0.08	100
E 砂	E ^{1.19} _{0.84}	1.111	0.766	0.345	48.5	48.5	—	—	0.17	0.15	95
	E ^{0.84} _{0.42}	1.147	0.787	0.360	52.2	51.5	—	—	0.14	0.05	95
	E ^{0.42} _{0.25}	1.204	0.891	0.313	47.5	47.5	30.6	39.6	0.13	0.10	95
F ^{1.19} _{0.84} 砂	1.085	0.725	0.360	52.2	51.5	—	—	0.10	0.08	100	
G ^{0.84} _{0.25} 砂	0.986	0.666	0.320	47.3	47.0	—	—	0.17	0.13	100	
H ^{1.19} _{0.84} 砂	1.359	0.938	0.421	53.0	53.0	—	—	0.30	0.20	100	
I ^{1.19} _{0.84} 砂	1.113	0.786	0.327	49.7	49.0	—	—	0.10	0.10	95	
J ^{0.42} _{0.25} 砂	1.109	0.721	0.388	49.0	49.0	40.5	40.5	0.13	0.10	91	

験によるものと比べ大きなせん断抵抗を生じる¹³⁾。しかし、下部可動直接せん断試験機の普及性、操作の簡便性などの利点とともに、得られる強度の絶対値ではなく、相対的な相互の強度関係を求める目的には十分活用できるものと考え本試験機を採用した。今回の実験は砂粒子の基本的要素のせん断抵抗への影響についてだけ問題にしたので、含水比、相対密度および詰め方などの砂の状態を、次に述べるように、各試験で同一になるよう工夫した。

使用した試料は表-1に示した10種の合計17試料である。洗い乾燥の後、自然乾燥状態で放置した試料(含水比0.1~0.5%)をせん断箱内に注ぎ込み、上方を手で静かにおさえ、せん断箱の側面を連打し、なるべく密な状態に詰めた。詰め込み終了時の試料厚さとせん断箱直径との比が2.3~3.5となるように調整する。せん断前の試料の相対密度はほぼ90~100%であり、同一相対密度と見なした。垂直応力は0.1, 0.3, 0.6, 1.1, 1.4, 1.6, 2.1, 2.6 kg/cm²に変化させることができ、毎分1~5%のせん断速度でせん断する。

直接せん断試験結果……上述のように、密に詰めた砂試料のせん断試験において、その試料の破壊時における垂直応力とせん断応力とをそれぞれ σ, τ_f とする。 $A_{0.44}^{1.19}$ -砂、 $B_{0.44}^{0.25}$ -砂、 $C_{0.44}^{0.25}$ -砂、 $G_{0.44}^{0.25}$ -砂、 $H_{0.44}^{1.19}$ -砂の各砂試料について、 σ と τ_f の関係を図-2~図-6に示した。図-2~図-6によると、測点がほぼ直線上にあると見なせるもの($C_{0.44}^{0.25}$ -砂、 $G_{0.44}^{0.25}$ -砂、 $H_{0.44}^{1.19}$ -砂)と、けって一直線では回帰できないもの($A_{0.44}^{1.19}$ -砂、 $B_{0.44}^{0.25}$ -砂)とがある。ここでは、便宜上、2本の直線、 $\tau_f = C_1 + \sigma \tan \phi_1$ を、 $\tau_f = C_1' + \sigma \tan \phi_1'$ とによって表わせるものとした。一直線で表わせる場合は、 $C_1 = C_1'$ 、 $\phi_1 = \phi_1'$ である。このような σ - τ_f 関係の非直線性は粒子の破壊と密接に関係すると考えられている¹⁴⁾、この報告ではこの問題には触れない。せん断抵抗 τ_f を体積膨張に費されるエネルギーを考慮した補正式、 $\tau_f' = \tau_f - \sigma \times \left(\frac{dH}{d\sigma}\right)$ (ただし、 $d\sigma$:せん断ヒズミの増分 dH :試料高さの増分)から求めた τ_f' と垂直応力 σ との関係を図-2~図-6に示した。 τ_f' と σ との関係同様、 $\tau_f' = C_1' + \sigma \tan \phi_1'$ と $\tau_f' = C_1'' + \sigma \tan \phi_1''$ とで回帰される。各試料で求めた $\phi_1, \phi_2, \phi_1', \phi_1'', C_1, C_1'$ を表-3に示した。 C_1, C_1' は、機械的誤差が大きく影響し、構成粒子の基本的要素との相関ははつきりせず、今後の議論では触れないことにする。

5. 最大・最小間ガキ比およびせん断抵抗角に与える砂粒子の基本的要素の影響

5.1 鉱物組成の影響

砂のせん断抵抗は、砂の粒子間摩擦、ダイレイタンス

February, 1971

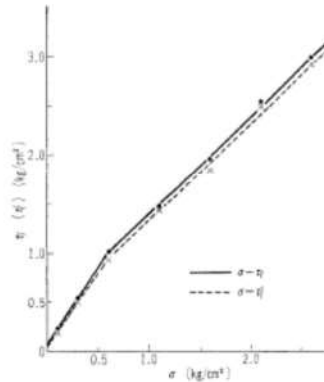


図-2 $A_{0.44}^{1.19}$ 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

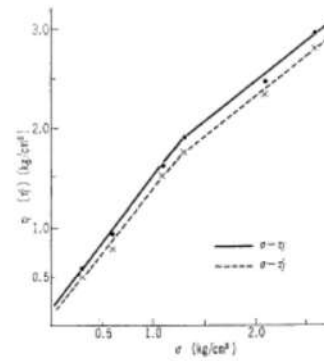


図-3 $B_{0.44}^{0.25}$ 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

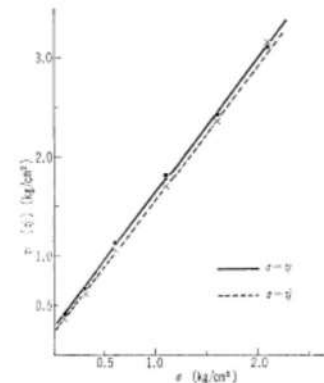


図-4 $C_{0.44}^{0.25}$ 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

No. 607

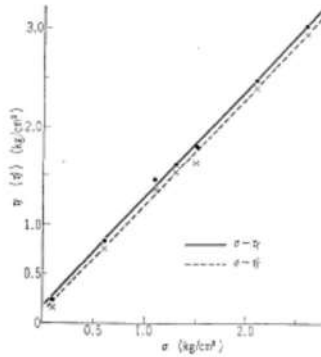


図-5 G_{0.25} 砂の $\sigma-\tau$ と $\sigma-\tau'$ 関係図

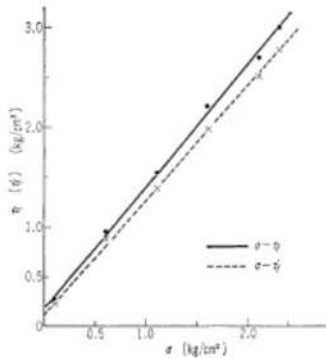


図-6 H_{0.84} 砂の $\sigma-\tau$ と $\sigma-\tau'$ 関係図

一、粒子の再配列、粒子の破砕などの諸要因で決定される。砂の粒子間摩擦角 (ϕ_s) はせん断抵抗に重要な役割を占めるが、 ϕ_s の測定法および測定結果の報告は比較的まれである。自然乾燥状態における粒子表面のなめらかな石英、長石、雲母の粒子間摩擦係数はそれぞれ、0.11~0.16、0.12~0.13、0.26~0.30 である⁷⁾。しかし、粒子表面のあらい鉱物試料の ϕ_s は、表面の滑らかな試料の ϕ_s と異なり⁷⁾、またチャート、ケツ岩などの岩片の ϕ_s は実験的に求められていない。それゆえ、砂の組成から砂の ϕ_s を定量的に推定することはできないが、各鉱物でその化学組成、結晶構造、表面あらがが異なり、鉱物によって ϕ_s は相当変化すると考えられる。それゆえに、砂のせん断抵抗には鉱物組成の影響が期待されるが、表-2 の鉱物組成と表-3 の ϕ_s, ϕ_s' との視察、および、図-7 と図-8 の (イ) によっても明らかのように、鉱物組成の顕著な影響は認めがたい。今回使用した試料に関する限り、下部可動直接せん断によるせん断抵抗

10

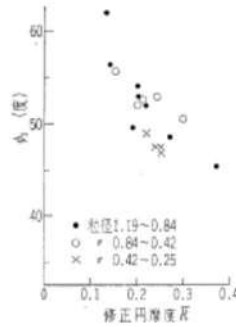


図-7 ϕ_s と修正円摩度 \bar{R} との関係

(垂直応力範囲は、0.1~2.6 kg/cm²) に鉱物組成の影響は小さいと判断できる。

5.2 修正円摩度 (\bar{R})、細長比 (\bar{n}) の影響 $\bar{R}-\phi_s, \bar{R}-\phi_s', \bar{n}-\phi_s$ などの相関関係を 図-7、図-8 の (イ)、図-9 の (イ)、に

示す。垂直応力範囲が約 1 kg/cm² 以下でせん断抵抗角 ϕ_s, ϕ_s' はともに修正円摩度、すなわち粒子表面のあらかさかなりの相関関係を示すが、 $\bar{n}-\phi_s$ はほとんど無相関である。

図-7、図-8 (イ) によると、粒径 1.2~0.84 mm および 0.84~0.42 mm の砂の測点はほぼ同じ回帰曲線上にあるが、0.42~0.25 mm の砂はその回帰曲線よりわずかに下方にはずれている。このことは修正円摩度の項でもふれたように、0.42~0.25 mm 砂の修正円摩度の測定にともなうあいまいさが原因なのか、粒径の違いが主因なのかは今後の問題である。水で飽和した石英の粒子間摩擦角 ϕ_s の測定によると、シルト→細砂→砂→粗砂→レキの順序で、すなわち粒径が大きくなるにしたがって、 ϕ_s は 31° から 22° へと小さくなっている。この実験事実を考慮すれば、粒径 0.42~0.25 mm の砂の測点は 1.19~0.84 mm, 0.84~0.42 mm の測点からもめた回帰線より上方にあることが予想されるが、今回得た結果はこの予想と矛盾している。

下部可動直接せん断試験から得た $\sigma-\tau$ および $\sigma-\tau'$ の関係は、かならずしも直線的でないことはすでに指摘した。 $\sigma-\tau'$ の非直線関係を 2 直線、すなわち $\tau'_j = C_1' + \sigma \tan \phi_s'$ と $\tau'_j = C_2' + \sigma \tan \phi_s$ とで表わすと、この 2 直線の交点は垂直応力が 0.6~1.7 kg/cm² の所にある。 \bar{R} と ϕ_s' との関係を 図-8 (ロ) に示す。図-8 の (ロ) によると、 $\bar{R}-\phi_s'$ はほぼ無相関な関係でばらついていて、このことは、粒子強度の低い A 砂、B 砂のような砂をほぼ 1.7 kg/cm² 以上の垂直応力でせん断する時、そのせん断破壊にともなう粒子の破砕現象が強くあらわれ、せん断抵抗にあたる形状の影響が比較的低下することによるものと考えられる。図-8 の (ロ) の K グループは $\sigma-\tau'$ 関係において直線を示すもの、つまり $\phi_s' = \phi_s'$ であり、L グループは $\sigma-\tau'$ 関係が非直線である。L グループに属する砂は、K グループに属する砂に比べて、粒子強度が低いように思われるが、まだ

土と基礎、19-2 (158)

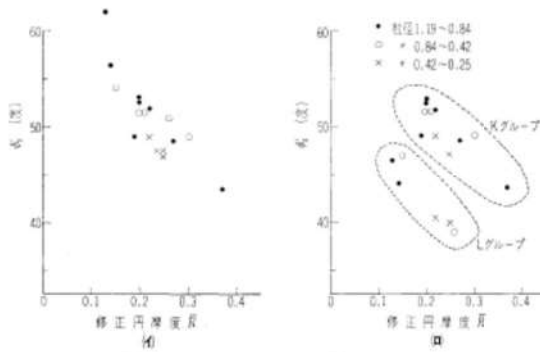


図-8 ϕ , ϕ' と修正円摩度 \bar{R} との関係図

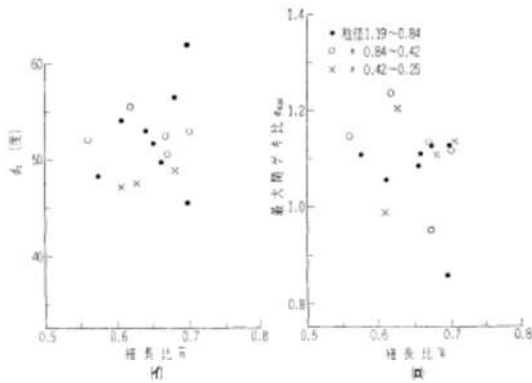


図-9 ϕ , 最大間ゲキ比と細長比との関係図

定性的な観察からの判断であり、結論は今後の研究に待ちたい。なお、K, L の各グループに限定すれば $\bar{R}-\phi'$ にかんがりの相関関係を認めることができ、興味ある事実である。 $\bar{R}-\phi_2$ にも $\bar{R}-\phi_1'$ と同様な関係を認めることができることを付記しておく。

せん断破壊時のダイレイタンスーインデックス, D.I. は修正円摩度, 粒径などの関数であると予想されるが試験機械による誤差が大きく、これを明らかにすることはできなかった。図-10 の D.I.- σ 関係に示されるように、D.I. は垂直応力の増加で減少傾向を示し、粒径の影響ははつきりしない。

$\bar{R}-e_{max}$, $R-e_{min}$, $\bar{R}-e_{max}$ などの関係を図-11, 図-9, (ロ) に示す。ただし、 H_{10} 砂は砂粒子自体に空ゲキの多い粒子からなり、他の砂と一緒に含めて議論するのは不適当と判断し省略した。粒径別に見れば、1.2~0.84 mm および 0.84~0.42 mm の砂は、 $\bar{R}-e_{max}$ に

February, 1971

はかなりの相関関係を認めることができるが、0.42~0.25 mm の砂はほぼ同一の \bar{R} に対し、 e_{max} の値は大きく変動している。1.19~0.84 mm の砂の回帰線は 0.84~0.42 mm の砂の回帰線の下方に位置するが、最上武雄¹³⁾ も同様な傾向を報告している。 $\bar{R}-e_{min}$ に弱い相関関係を認めることができるが、0.42~0.25 mm の砂はほぼ同じ \bar{R} の値に対し e_{min} は大きく変動し、 $\bar{R}-e_{max}$ と似た傾向を示す。 $\bar{R}-e_{max}$ はほぼ無相関である。

5.3 まとめ

10 種, 17 試料の下部可動直接せん断試験結果から判断すると、砂粒子のもつ基本的性質の中で修正円摩度がせん断抵抗にもつ意味は大きく、鉱物組成, 細長比の役割は当初予想したよりは小さい。Kirkpatrick¹⁴⁾ は、ほぼ等しい形状と表面のあらさをもつガラス玉の三軸圧縮試験から、せん断抵抗は粒径のみならず粒度によっても大きな影響を受けることを実証した。せん断抵抗という観点から洗った砂を基本的要素で分類する場合に、粒子の表面のあらさ, 粒径, 粒度は無視し得ないファクターであろう。

今回の実験では鉱物組成のせん断抵抗への関与は明らかでないが、Rowe⁹⁾, Lee¹⁵⁾ による飽和砂の排水三軸圧縮試験によると、粒子を構成している物質の ϕ_0 がせん断抵抗に極めて大きな影響を持つことを実証しているので、三軸圧縮試験などにより鉱物組成の影響についてさらに詳しい実験的研究が必要である。

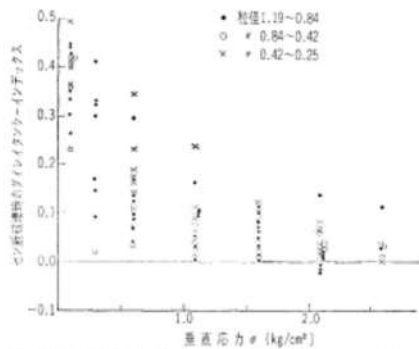


図-10 垂直応力とダイレイタンスーインデックスとの関係図

No. 607

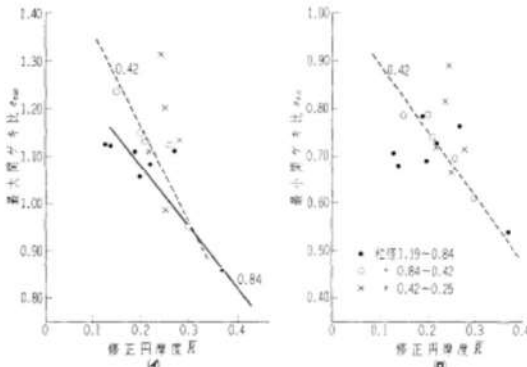


図-11 最大開ゲキ比、最小開ゲキ比と修正円摩度との関係図

6. 結 論

1) Waddell の円摩度を修正定義した 修正円摩度, $\bar{R} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{r_i^2 + r_i'^2}{l_i^2} + \frac{r_i^1 + r_i'^1}{l_i^1} \right)$ は粒子の表面の あらさの定量的表現として活用できる。

2) 低い ($\sigma < 0.6 \text{ kg/cm}^2$) 垂直応力範囲において, 下部可動直接せん断試験より求めた せん断摩擦角 (ϕ_s, ϕ_s') におよぼす修正円摩度 \bar{R} の影響はいちじるしく, 鉱物組成, 細長比の役割は比較的小さい。高い垂直応力 ($1.7 \sim 2.6 \text{ kg/cm}^2$) 範囲のせん断摩擦角 (ϕ_s, ϕ_s') の修正円摩度への依存性は小さく, 砂粒子の破砕性が強い支配因子であることが予測できた。

3) 粒径をパラメーターに取れば, 修正円摩度と最大・最小開ゲキ比はある程度の相関関係を持つが, 細長比とは無関係である。

なお, この研究を実施するにあたり, 常に温い御指導御鞭撻を賜った 埼玉大学小野寺透教授, 関陽太郎教授, 吉中竜之進助教授, 風間秀彦氏および根岸勤氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 三宅正人: 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, 第 12 巻, 第 4 号, 1964, pp.17-24
- 2) 小田匡寛, 風間秀彦: 砂の異方性に関する基礎的研究, 土と基礎, 第 18 巻, 19 号, 1970 pp. 15-21
- 3) 小田匡寛: 砂のような粒状体の構造に関する基礎的研究, 第 5 回土質工学研究発表会講演集 1970, pp.65-68
- 4) H. Waddell: Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles, Jour. Geol., Vol. 43, 1935
- 5) W.C. Krumbain: Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles, Jour. Sedi. Petrol., II, No. 2
- 6) 菅沢 新: 骨材の粒度と形状のパラメーター, とくに空けき率との関係(1), セメントコンクリート, No. 179, 1月号, pp. 3-11
- 7) H.M. Horn and D.V. Deere: Frictional Characteristics of Minerals, Geotechnique, Vol. 12, 1962, pp. 319-355
- 8) P. W. Rowe: The Stress-Dilatancy Relations for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc. London, Series A, Vol. 269, 1962, pp. 500-527.
- 9) K.L. Lee and I Farhoomand: Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression, Canadian Geotechnical Jour., Vol. 4, 1967, No. 1
- 10) K.L. Lee and H.B. Seed: Drained Strength Characteristics of Sands, Jour Soil Mech. Found Div. No. SM 6, 1967, pp. 117-141
- 11) J. J. Kolbuszewski: An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sands, Proc. 2th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1948, pp. 158-165
- 12) 土のせん断試験法に関する基礎的研究, 土質工学会, 1968
- 13) 最上武雄: 粒状体の力学, 土質力学 (技報堂), 第 8 巻, 1969, pp. 893-1032
- 14) W.M. Kirkpatrick: Effects of Grain Size and Grading on the Shearing Behaviour of Granular Materials, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1965, pp. 273-278
- 15) I.K. Lee: Stress-Dilatancy Performance of Feldspar, Jour. Soil Mech. Found. Div., No. SM 2, 1966 (原稿受付, 1970.5.14)

※ ※ ※

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

参考文献

谷口宏充, マグマ科学への招待, 裳華房, 2001, P24-31

3-2 いろいろな火成岩

マグマは冷え固まれば火成岩と呼ばれる一連の岩石のみな集まりです。地球上の岩石の多くは玄武岩や花こう岩のように二酸化硅素を主成分とする物質—塩基岩—です。マグマ誕生の場

である上部マントル下部地殻もやはり溶融岩の岩石からできていて、マグマはその一部分が溶融して生まれる、と考えられています。したがって、私たちが選んだマグマのほとんどは溶融した岩盤です。

しかし世の中には変わりものがあるもので、1936年5月には北海道の知床岬で最大数千トン/日の溶融岩が流出し、合計30万トンに達しました。アフリカ東部の大地溝帯と呼ばれる地域には硫酸塩〔Na, Ca, Mg, F(SO₄)〕からなる火山岩が知られており、1960年10月にはタンザニアのオルドニオンゴイ火山でナトリウムを含む硫酸塩からなる溶岩が流出しました。また南米チリのフコ火山には、ほとんど硫酸塩だけからなる溶岩も知られています。したがって地域の内訳には、硫黄や硫酸塩などが溶融して存在しているケースもあるわけです。このような事例を踏くと、やはりマグマの大部分は塩基岩です。マグマが冷え固まってきたものが火成岩ですから、マグマの化学組成はほぼ火成岩の化学組成に一致するはずですが、「ほぼ」と言ったのは、マグマが冷却する過程で水蒸気や炭酸ガスなどの揮発性成分（ガス成分）は逃げ出ていってしまうから、厳密には一致しないためです。ともあれ揮発性成分がでてしまった塩基岩ではありますが、火成岩の組成はマグマの組成をほとんど代表します。そこでマグマの化学組成的特徴を理解してゆく場合、まず火成岩の区分を知っておく必要があります。

火成岩はマグマが冷却凝固してできた岩石の総称ですが、その組織と鉱物組成（実際には組織と化学組成とによって区分される

表 3-2 火成岩の分類例
[組織・火成性] に基づく分類(参考)

岩石の体積比	岩	岩	岩	岩	岩
火山岩	噴出岩	溶岩	溶岩	溶岩	溶岩
火成岩	侵入岩	侵入岩	侵入岩	侵入岩	侵入岩
火成岩	火成岩	火成岩	火成岩	火成岩	火成岩
火成岩	火成岩	火成岩	火成岩	火成岩	火成岩
火成岩	火成岩	火成岩	火成岩	火成岩	火成岩

場合のほうが多い)によって表3-2のように区分されています。表にある用語のうち、火成岩の組織を表す「粒状」と「等粒状」の違いを説明します。斑状組織とは、細かい粒の鉱物あるいはガラスからなる生地(石基)の中に、孤立した大ききの鉱物(斑晶)が共存するような組織を指します。それに対し等粒状組織は、鉱物のサイズに変化がなく、すべて似たようなサイズの鉱物からなる組織を指します。鉱物の数値にも明確な定義はありませんが、粗粒とはガラス質か、あるいは肉目で鉱物粒が見分けられないくらい小さい場合(だいたい直径が1mm以下)、中粒とは肉眼で粒が見分けられるくらい(だいたい1~3mmくらい)、そして細粒とは肉眼で十分粒が見分けられ、観察できるくらい大きくなっている(だいたい5mm以上)場合を指すことが多いようです。

火山岩とは地表あるいは地下流路でマグマが急激に冷却凝固することによって形成された岩石で、一般に粗粒状組織をし、石基に

火山ガスを有します。半深成岩は一般には地下浅部で固結した岩石で、火山ガラスを含まず。それに對し、深成岩は地下深部でマグマがゆっくり冷却固結してできた岩石で、鉱物粒が大きく成長し、雪霜状組織を示すのが一般的です。

マグマがゆっくり冷えれば冷えるほど鉱物は大きく成長しますが、地下深い場所では周囲に固いがあるためゆっくり冷えますが、地表では周囲の大気中に熱が逃げていってしまうため急速に冷却します。これが、火山岩と深成岩との間に鉱物の粒度差を生じている理由です。また、噴出直前の場合、石基はマグマが最終的な冷却固結前に到達したとき液体状態であった部分で、それに対し、結晶はすでに大きな結晶として成長していたことを示しています。つまり、結晶は地下深い位置ですでにできあがっていた鉱物で、それが液体とともに上昇してきたものなのです。

このような組織（主たる冷却場所に関係）をもとにした分類に、組成に基づく4分類を組み合わせると表2-2のように玄武岩から花こう岩までの合計12種類の岩石が生じます。表の左端に書かれている酸塩基性岩質の火山岩は、カナダやオーストラリアなどに産する約18億年以上前のコマチアイトという岩石で知られています。しかし現在ではそのような組成のマグマは形成されていないと考えられているため当節の分類からは省略します。ただし、マグマ発生に密接に関係してくる上部マントルを構成している岩石も超塩基性岩の一種であるため、非常に大切ではあります。ダイサイトと命名されている火山岩は、以前、石英安山岩と呼ばれていました。しかしこの名前にはちょっと誤解を招きや

表 2-2 火成岩を構成する主要な鉱物の代表例

鉱物群名	鉱物名	化学組成
シリカ酸	石英	SiO_2
	クリストパイト	Si_2O_6
長石族	斜長石	$Ca_{1-x}Na_xAl_{1-x}Si_3-xO_8$
	カリ長石	$(K, Na)AlSi_3O_8$
輝石族	キフェラン	$NaAlSi_3O_8$
雲母族	黒雲母	$K(Mg, Fe)_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
	白雲母	$KAl_2(AlSi_2O_{10})(OH)_2$
角閃石族	寄透角閃石	$NaCa_2Mg_2Fe^{2+}Al_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
輝石族	斜方輝石	$(Mg, Fe^{2+})SiO_3$
	単斜輝石	$(Ca, Mg, Fe^{2+})SiO_3$
ざくろ石族	アルマンデイン	$Fe^{2+}_2Al_2Si_2O_{10}$
かんらん石族	かんらん石	$(Mg, Fe^{2+})SiO_3$

すい問題点があるため、現在ではダイサイトと呼ぶようになりつつあります。また、火成岩の中に出てくる主要な鉱物の化学組成を表2-3に示します。実際に火成岩中に出てくる鉱物はこれよりかなり種類も多く、組成も複雑になっています。

マグマがどこで冷え固まるかによって、火山岩、半深成岩そして深成岩の3分類が生まれたわけですから、もとのマグマは同じものです。このため、今後の話では断りのないかぎりマグマの組成的分類は火山岩名を用いて行うことにします。すなわち玄武岩質、安山岩質、ダイサイト質そして流紋岩質マグマです。表に示された分類は鉱物組成に基づくものですが、火山岩の場合、冷却のスピードが早すぎるため液体が完全には結晶（結晶）になりきれず、一部分をいし大部分が火山ガラスとして残ってしまいます。

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備
の防護方針について

1. 概要

津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の外部事象に対する防護方針を以下に示す。

2. 防護に関する考え方

以下の考え方に基づき，泊発電所において設計上考慮すべき外部事象に対する津波防護施設等の機能維持のための対応の要否について整理した。

外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フローを図1に示す。

- (1) 設計上考慮すべき事象が，津波若しくは津波の随伴，重畳が否定できない事象に該当するかを確認する。定量的な重畳確率が求められない事象については，保守的にその影響を考慮する。
- (2) 津波の随伴，重畳が否定できない場合は，当該事象による津波防護施設の機能喪失モードの有無を確認する。機能喪失モードが認められる場合は，設計により健全性を確保する。
- (3) 津波の随伴，重畳が有意でないと評価される事象についても，泊発電所の津波防護施設については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う。

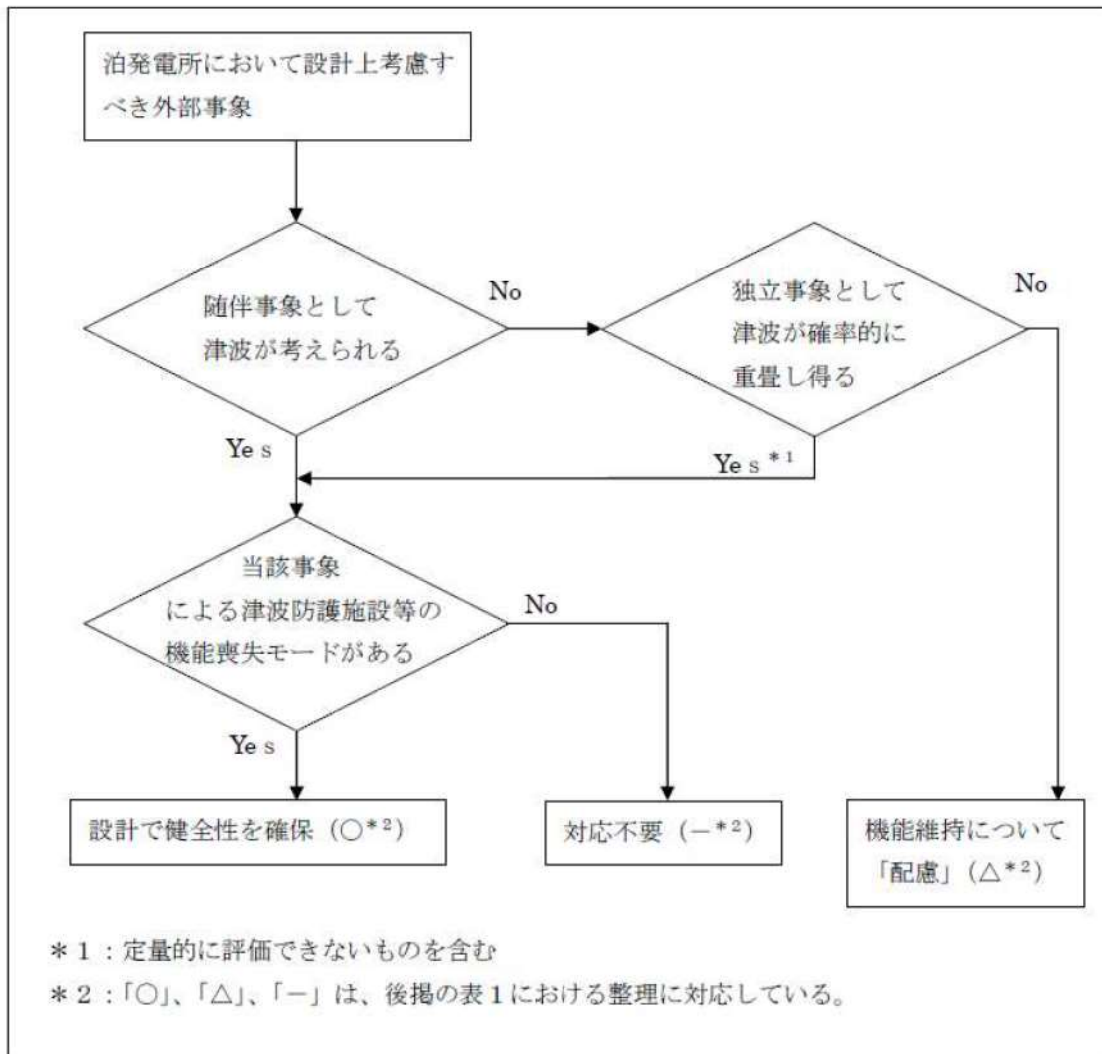


図 1 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

3. 検討結果

上記フローに基づく各事象に対する防護方針の検討結果を以下に示す。
 (詳細は表 1 のとおり)

(1) 津波の随伴、重畳が否定できない事象^{*1}に対する防護方針

これらの外部事象に対しては、津波との随伴若しくは重畳の可能性を否定できないため、荷重の重ね合わせのタイミングも考慮した上で設計への反映の要否を検討し、津波防護施設等への影響が考えられる事象に対しては、津波防護施設等の機能を維持する設計とする。

※1 : 地震、風 (台風) , 凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、森林火災

(2) 津波の随伴、重畳が有意ではない事象（竜巻、火山の影響）に対する防護方針

「竜巻」、「火山の影響」の2つの外部事象に津波は随伴せず、また、基準津波との重畳の確率も有意ではないため、津波防護施設等を防護対象施設とはしないものの、津波防護施設等の機能が要求される時にはその機能を期待できるように以下の対応を自主的に実施する。

a. 「竜巻」

設計竜巻と基準津波が重畳する年超過確率は約●（/年）であり、竜巻と津波の重畳は有意ではないと評価されるが、竜巻が襲来した場合には必ず作用する風荷重に対しては、津波防護施設等の健全性を維持する設計とする。また、竜巻が襲来した場合でも、必ずしも津波防護施設に作用するとは限らない竜巻飛来物の衝撃荷重に対しては、大規模な損傷に至り難い構造とする。

b. 「火山の影響」

設計で想定する降下火砕物の噴火と基準津波が重畳する年超過確率は、約●（/年）^{※2}であり、火山の影響と基準津波の重畳は有意ではないと評価されるが、降下火砕物の堆積荷重について長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに、降灰後に適宜除去が可能な設計とする。

※2：敷地で確認された降下火砕物の層厚は20cmと評価しており、この降下火砕物噴出年代は約●万年前であることを考慮

追而【地震津波側審査の反映】
(上記●については、地震津波側審査結果を受けて反映のため)

○	：津波の随伴、重量が否定できないため、設計で健全性を確保する事象 (○)
○	：津波の随伴、重量は有意ではないが、機能維持については設計上配慮する事象 (△)
○	：対応が不要な事象 (-)

表1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重量し得る	津波との重量を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
地震	○	-	○	<u>あり</u> 地震荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	耐震Sクラスとして基準地震動Ssに対し健全性を維持し、津波に対する防護機能を維持する。 また、津波と余震の組み合わせも考慮する。
風(台風)	-	○	○	<u>あり</u> 風荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	・風荷重、津波荷重を考慮した設計とする。 ・津波監視カメラは、風荷重を考慮した設計とする。
竜巻	-	-	-	<u>なし</u> 以下のとおり、重量の程度は無視し得る。 ・設計竜巻の確率：約 2.5×10^{-7} /年 ・基準津波の年超過率：約●●/年 ^{※3} ⇒重量確率：約●●/年 年超過率が 1×10^{-7} /年未満であり、有意ではない。	△	防潮堤・3号伊取水ピットスクリーン室防水壁の設計においては、自主的に以下の配慮を行い、信頼性を高める。 ・風圧力に対しては、健全性を維持する設計とする。 ・飛来物については、大規模な損傷に至り難い構造とする。 ・津波監視カメラは、風荷重を考慮した設計とする。
凍結	-	○	○	<u>あり</u> 凍害により止水目地が損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	止水目地は最低気温を考慮した設計とする。
降水	-	○	○	<u>なし</u> 降雨による海水面上昇は無視し得る。	-	-

※3：設置変更許可申請書添付書類六「●、●超過確率の参照」を考慮

追而【地震津波調査の反映】
(上記●については、地震津波調査結果を受けて反映のため)

□	: 津波の随伴、重量が否定できないため、設計で健全性を確保する事象 (○)
□	: 津波の随伴、重量は有意ではないが、機能維持については設計上配慮する事象 (△)
□	: 対応が不要な事象 (-)

表1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (2/2)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重畳し得る	津波との重量を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設等の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
積雪	-	○	○	あり 積雪荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	積雪荷重と津波荷重を考慮した設計とする。
落雷	-	○	○	あり 落雷による津波監視設備の機能喪失が想定される	○	津波監視設備については、既設避雷設備の遮へい範囲内への設置を行う。
火山の影響	-	-	-	なし 以下のおおりの重畳の頻度は無視し得る。 ・想定する火山の確率: ●/年*2 ・基準津波の年超過率: ●/年*3 ⇒重畳確率: ●/年* 年超過率が1×10 ⁻⁷ 年未満であり有意ではない。	△	設計にて長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに、降灰後に降下火砕物を適時除去可能な設計とする。
地滑り	-	○	○	なし 地滑りにより津波防護施設が機能喪失に至ることはない。	-	-
生物的事象	-	○	○	なし 生物による影響(閉塞、侵入)による機能喪失モードを有しない。	-	-
森林火災	-	○	○	なし 防火帯により森林との間隔距離が確保されるため、熱影響を受けることはない。	-	-

* 2 : 敷地で確認された降下火砕物の層厚は20cmと評価しており、この降下火砕物噴出年代は約●万年前であることを考慮

* 3 : 設置変更許可申請書添付書類六「●●● 超過確率の参照」を考慮

追而【地震津波調査の反映】

(上記●については、地震津波調査結果を受けて反映のため)

火山影響評価における監視カメラ及びモニタリングポストの扱い
について

監視カメラは設置許可基準規則第 26 条（原子炉制御室），モニタリングポストは同規則第 31 条（監視設備）の要求を満足する必要があることから，本設備については，降下火砕物の影響に対して機能維持，又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，必要に応じてプラントを停止し，安全上支障のない期間での除灰，修復等の対応，又はそれらを適切に組み合わせることで安全機能を損なわない設計としている。

なお，監視カメラ及びモニタリングポストは，外部事象防護対象施設ではないが，損傷した場合でも外部事象防護対象施設に対して波及的影響を及ぼすことはないことから，火山影響評価における評価対象施設等として抽出していない。

表 1 に監視カメラ及びモニタリングポストの概要を示す。

表1 監視カメラ及びモニタリングポストの概要

		監視カメラ	モニタリングポスト
イメージ			
数量		津波監視カメラ：計4台 構内監視カメラ：計7台	計7箇所
火山影響への考慮	構造物への静的負荷	<ul style="list-style-type: none"> ・降下火砕物の影響を受けにくい設置場所の考慮 ・降下火砕物が堆積しにくい形状 	<ul style="list-style-type: none"> ・降下火砕物が堆積しにくい形状
	構造物への化学的影響（腐食）	<ul style="list-style-type: none"> ・外装は鋼製（塗装あり）であり、短期での腐食は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・外装はアルミニウム合金（塗装あり）であり、短期での腐食は生じない。
	絶縁低下	<ul style="list-style-type: none"> ・外気を取込む機構がなく、防塵構造である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・外気を取込む機構がなく、防塵構造である。
その他		<ul style="list-style-type: none"> ・自然現象の検知は水位計，気象観測設備，目視確認で可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・可搬型モニタリングポスト及び放射能測定装置でも同様な測定が可能 <p>※重大事故等対処施設として配備</p>

以上

原子炉の高温停止及び低温停止に必要な設備に関する降下火砕物の影響評価
について

降下火砕物に起因する外部電源喪失事象により，原子炉の停止が想定されることから，原子炉の高温停止及び低温停止に必要な機能を以下のとおり抽出した。

- (1) 原子炉停止：原子炉停止系
- (2) ほう酸添加：原子炉停止系（化学体積制御設備のほう酸注入機能）
- (3) 崩壊熱除去：補助給水系，主蒸気系，余熱除去系
- (4) 上記系統の関連系（安全保護系，中央制御室空調装置，制御用空気圧縮設備，非常用所内電源設備，原子炉補機冷却水設備，直流電源設備，原子炉補機冷却海水設備 等）

以上の機能を達成するために必要な設備は，次頁以降の防護対象に含まれていることを確認した。

表1 原子炉の高温停止及び低温停止に必要な設備に関する防護対象(1/2)

分類	定義	安全機能の重要度分類		設備設置場所	高温停止及び低温停止に必要な機能
		機能	構築物、系統又は機器		
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によって、 (a)炉心の著しい損傷、又は (b)燃料の大量の破損 を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器	1)原子炉冷却材圧力バウダリ機能	原子炉冷却材圧力バウダリを構成する機器・配管（1次冷却材系）	○	—
		2)過剰反応度の印加防止機能	制御棒駆動装置圧力バウダリ	○	—
		3)炉心形状の維持機能	炉心支持構造物 燃料集合体	○	—
MS-1	1)異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	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（制御棒クラスタ、制御棒駆動装置（トリップ機能））	○	原子炉停止
		2)未臨界維持機能	原子炉停止系 制御棒 化学体積制御設備（ほう酸水注入機能） 非常用炉心冷却設備（ほう酸水注入機能）	○	原子炉停止 ほう酸添加
		3)原子炉冷却材圧力バウダリの過圧防止機能	加圧器安全弁（閉機能）	○	—
		4)原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統 余熱除去設備 補助給水設備 蒸気発生器 蒸気発生器から主蒸気逃し弁までの主蒸気設備 蒸気発生器から主給水隔離弁までの給水設備 残留熱を除去する系統 主蒸気逃し弁（手動逃し機能） 主蒸気安全弁	○	前燃熱除去
		5)炉心冷却機能	非常用炉心冷却設備 低圧注入系 高圧注入系 蓄圧注入系	○	—
		6)放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮蔽及び放出低減機能	原子炉格納容器 アニュラス 原子炉格納容器隔離弁（バウダリ配管） 原子炉格納容器スプレイ設備 アニュラス空気浄化設備 外部運へい 排気筒	○	○

表 1 原子炉の高温停止及び低温停止に必要な設備に関する防護対象(2/2)

分類	定義	安全機能の重要度分類		構築物、系統又は機器	設備設置場所		高温停止及び低温停止に必要な機能
		機能	機能		建屋設備	屋外設備	
MS-1	2)安全上必須なその他の構築物、系統及び機器	1)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	○	○	関連系	関連系
MS-1	2)安全上特に重要な関連機能 (いずれも、MS-1 関連のもの)		ディーゼル発電機	○	○	関連系	関連系
MS-1	2)安全上特に重要な関連機能 (いずれも、MS-1 関連のもの)		中央制御室空調装置	○	○	関連系	関連系
MS-1	2)安全上特に重要な関連機能 (いずれも、MS-1 関連のもの)		原子炉補機冷却海水設備	○	○	関連系	関連系
MS-1	2)安全上特に重要な関連機能 (いずれも、MS-1 関連のもの)		計測制御用電源設備	○	○	関連系	関連系
PS-2	1)その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破壊を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器	1)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許容等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されているものは除く。) 2)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 3)燃料を安全に取り扱う機能	放射性廃棄物処理施設 使用済燃料ピット(使用済燃料ラックを含む。) 新燃料貯蔵庫(臨界を防止する機能)	○	○	-	-
MS-2	2)通常運転時及び運転時の異常な温度変化に作動を要求されるものであって、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構築物、系統及び機器	1)安全弁及び過がし弁の吹き止まり機能 2)燃料プール水の補給機能	加圧器安全弁(吹き止まり機能) 加圧器過がし弁(吹き止まり機能)	○	○	-	-
MS-2	1)PS-2の構築物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器	2)事故時のプラント状態の把握機能	気体廃棄物処理設備の隔離弁 原子炉計装の一部 プロセス計装の一部	○	○	-	-
MS-2	2)異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器	1)PS-2の構築物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器	加圧器過がし弁(手動閉鎖機能) 加圧器後備ヒータ 加圧器過がし弁元弁(閉鎖機能) 中央制御室外原子炉停止装置(安全停止に関連するもの)	○	○	-	-

ディーゼル発電機機関の故障要因について

ディーゼル発電機機関の故障要因，降下火砕物の機関内への侵入による影響について以下に示す。

予防保全の観点から，ディーゼル発電機機関に限らず機械全般において，故障・不具合の防止を目的として一般的に用いられる要因の考え方にに基づき，潜在的な故障・不具合要因としてメーカーが推奨しているディーゼル発電機機関の故障要因は以下の3種類が該当するとされている。なお，設計に起因するもの，管理ミス等の要因によって発生するものは除いている。

以下の故障要因に対して，降下火砕物の機関内への侵入による影響の観点から検討した。

1. 機器の経年劣化によって発生する故障

使用頻度とは直接関係なく，その材質変化（化学変化等）によって生ずる「経年劣化」に該当する代表的な故障としては「腐食」「錆び」「材質の変化によるひび割れ」等が考えられるが，いずれも降下火砕物によって，ディーゼル発電機機関に有意に発生する故障ではない。

2. 機器の疲労によって発生する故障

材料が摩耗等の変化を引き起す「機器疲労」に該当する代表的な故障としては「摩耗」「減肉」等があり，このうち「摩耗」については降下火砕物によってディーゼル発電機機関に発生する故障要因に該当する。

3. 偶発的に発生する故障

万全な環境に置かれ，かつ使用頻度が制限されていても機器が個別に有する故障発生確率で発生する故障が「偶発故障」に該当する。該当する代表的な故障としては「ミクロ的に発生するクラック」等が考えられるが，降下火砕物によってディーゼル発電機機関に有意に発生する故障ではない。

以上のことから，ディーゼル発電機機関への降下火砕物の侵入により発生する故障要因として，機関内摺動面への降下火砕物の侵入による「摩耗」が考えられ，これ以外の故障要因は有意に発生しないと考えられる。

以上

降下火砕物が降灰した際の対応手順について

降下火砕物が降灰した際の対応については、「災害対策」「運転操作」等に係る社内ルールを見直し、発電所を降灰予想範囲に含む「降灰予報」が発令された場合に、「降灰対応体制」を発令し、予防対策として、原子炉補機冷却海水ポンプ、ディーゼル発電機等の安全施設に対する特別点検の実施、その他屋外設備、重大事故対処設備並びにアクセスルート等に対する状況確認、加えて中央制御室空調装置の閉回路循環運転等の対応を行い、必要に応じて除灰を実施することとしている。

降下火砕物の降灰が想定される場合の対応について、上述した対応手順の基本的な流れを以下に示す。

降灰予報 発表
(降灰確認時)

- 発電所対策本部を設置
- 降灰時の対応手順に従い予防対策として特別点検実施
評価対象施設に対する降灰時の機能維持確認を実施
 - ・原子炉補機冷却海水ポンプ
 - ・主蒸気逃し弁消音器、主蒸気安全弁排気管
 - ・ディーゼル発電機、制御用空気圧縮機
 - ・排気筒
 - ・換気空調設備のフィルタ など
 - ・その他屋外設備の降灰時の状況確認、目視点検
必要に応じて除灰を実施
 - ・アクセスルートの除灰
 - ・重大事故等対処設備の除灰

火山影響評価
に伴い新たに
手順として整備

- 機能異常が確認された場合には、原子炉施設保安規定の定めにしたがい、必要な処置・対応を実施
- 発電室による日常巡視点検(既存ルール)
 - ・降灰後の腐食等の中長期影響については、直ちに出現しないため、日々行われる日常巡視点検(外観点検・パラメータ確認)において異常が確認されれば、関係各課(室)にて適宜処置がなされる。

中長期的対応

図 降下火砕物が降灰した際の基本的な手順の流れ

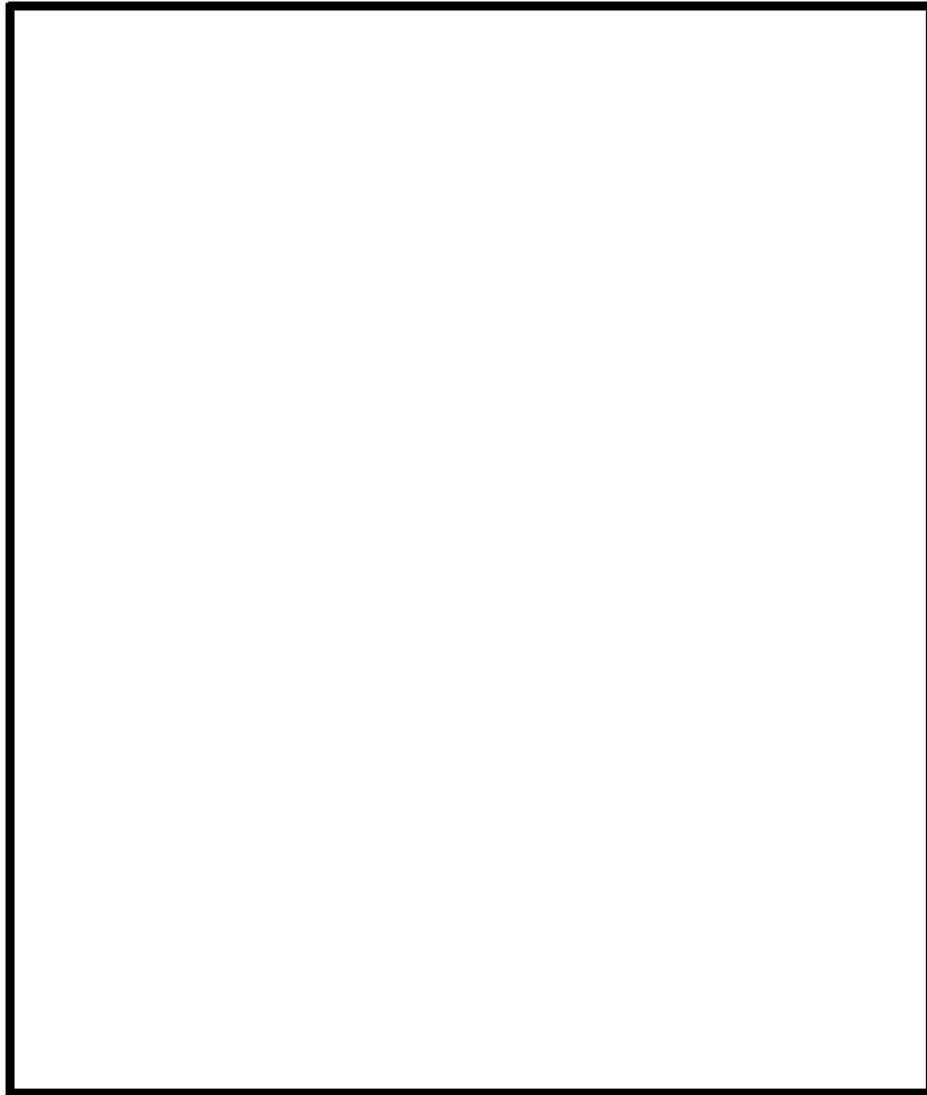
以上

負圧管理箇所への降下火砕物の侵入影響について

発電所における負圧管理箇所への降下火砕物の侵入の可能性について、以下のとおり検討した。

負圧管理を行っている施設は放射線管理区域であり、放射線管理区域へは出入管理建屋を経由して入域することになる。

下図のとおり、出入管理建屋から放射線管理区域内への入域には、多重の扉を経由する構成となっており、負圧の影響により、降下火砕物が外気から直接侵入するおそれはない。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません

以上

腐食による機能影響について

「降下火砕物が影響を与える防護対象施設と影響因子の組合せ」において「腐食があっても、機能に有意な影響を受けにくい」とした設備については評価対象としていないが、その除外理由を以下に示す。

1. 主蒸気逃がし弁消音器

主蒸気逃がし弁消音器は主蒸気逃がし弁動作時の排出蒸気を建屋外に排出する際に消音するために設置されており、屋外に露出した外装板等に堆積した降下火砕物により腐食した場合でも、消音機能は低下するものの主蒸気逃がし弁の噴出し機能としては影響がないため、評価対象より除外した。

2. 主蒸気安全弁排気管

主蒸気安全弁排気管は主蒸気安全弁動作時の排出蒸気を建屋外に排出するための排気管であり、屋外に露出した部分が腐食した場合でも主蒸気安全弁の噴出し機能としては影響がないため、評価対象より除外した。

なお、排気管内に侵入した降下火砕物については排気管下部のドレン受け部での堆積が考えられるが、ドレン受け部は二重管構造となっており、排気管自体への影響は考えにくい。

3. タービン動補助給水ポンプ排気管

タービン動補助給水ポンプ排気管には、タービン動補助給水ポンプ起動時の排気蒸気を屋外に排出するための排気管であり、屋外に露出した部分が腐食した場合でもタービン動補助給水ポンプの運転状態には影響はないため、評価対象より除外した。

4. ディーゼル発電機の消音器

ディーゼル発電機の排気消音器がディーゼル発電機建屋屋外に設置されており、ディーゼル発電機機関起動時の排気音を消音しているが、屋外に露出した部分が腐食した場合でも、消音機能は低下するもののディーゼル発電機機関自体の機能には影響がないため、評価対象より除外した。

また、ディーゼル発電機の吸気消音器は屋内に設置されており、腐食によるディーゼル発電機の機能に影響を及ぼすことはない。

5. 換気空調設備外気取入口

換気空調設備の外気取入口は、開口部の近い位置に金網を設置しており、その背後に平型フィルタを配置している。外気取入口は降下火砕物が侵入しにくい構造であること、また降下火砕物による腐食の影響を受けたとしても金網部の構造物であり、その腐食により脱落が発生したとしても平型フィルタの機能へ影響を与えるものではないことから、評価対象より除外した。

なお、平型フィルタのフレームや支持枠等の構造物はSUS材等の耐食性のある材料を使用しており、腐食の影響を受けることは考えにくい。

以 上

腐食の長期的影響に対する保守管理について

屋外設備については、巡視点検による外観の点検を実施しており、腐食の長期的影響について適切に対応している。なお、以下に、巡視点検の周期を示す。

表 巡視点検

項目	実施内容	頻度
巡視点検	外観点検	1回／1日

降下火砕物による腐食が現れるまでの時間は、周囲の環境の影響等により一概には言えないが、「補足資料-8 降下火砕物の金属腐食研究について」に示すように、降下火砕物による腐食は自然環境に存在する降下火砕物よりも厳しい腐食条件においても表面厚さにして十数 μm のオーダーの腐食であり、さらに実機においては塗装等により腐食を防止していることから、現状の巡視点検の頻度で発見し、必要に応じて塗替塗装等の対応が可能である。

以上

灰置場について

灰置場として、積み上げた降下火災物が崩れる等、発電所の重要安全施設やSA時に必要となるアクセスルートに影響を及ぼすことがないように、それらから離れ、かつ、低い場所にある放水口近傍のエリアを選定しており、除去した降下火災物が灰置場に現実的に集積可能かどうか概略試算を行った。

図1に示す範囲に高さ0.7mで集積した場合、その容量は51,800m³となる。ここで、層厚20cmの降下火砕物を想定した場合、表1のとおり降下火砕物の除去が必要となる施設の屋根部等に堆積する降下火砕物の量は2,332m³であることから、灰置場として十分な容量があると考えられる。

表1 降下火砕物の除去が必要な施設の屋根部等に堆積する降下火砕物の量

項目	建屋
対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・原子炉補助建屋 ・ディーゼル発電機建屋 ・循環水ポンプ建屋 ・A1, A2, B1, B2-燃料油貯油槽 ・A1, A2, B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ
面積	約 11,660m ²
降灰量 (層厚 20cm)	2,332m ³



図1 泊発電所の平面図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません

アイスランド火山を用いる基本的考え方とセントヘレンズ火山による
影響評価について

泊発電所3号炉において、フィルタ閉塞の評価対象となる施設は、ディーゼル発電機吸気消音器のフィルタ、換気空調設備のフィルタ（外気取入口）が該当するが、ディーゼル発電機吸気消音器のフィルタについては、図1に示すとおり下からガラリ内に吸い上げ、さらにそのガラリ内に設置された吸入口から吸い込むため、降下火砕物が内部に侵入しにくい構造となっている。また、換気空調設備については降灰が確認された場合には外気取入口のダンパを閉止する運用としており、フィルタへの降下火砕物の付着を抑制できる設計となっている。

この前提のもと、降下火砕物によるフィルタ閉塞に対する評価に当たっては、参考としてアイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生（H22年4月）した火山噴火地点から約40km離れたヘイマランド地区において観測された大気中の降下火砕物濃度のピーク値、 $3,241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を用いている。

これは、

- ①比較的規模が大きい噴火であること（VEI4以上）
- ②原子力施設が設置されている地表レベルで観測された降下火砕物の大気中濃度がデータとして存在すること

という条件に照らして、学会誌等の関係図書を確認したところ、上記のアイスランド南部のエイヤヒャトラ氷河で発生した大規模噴火における噴火口より約40km程度離れた地域での地表における大気中濃度を参照したものである。

なお、噴火口からの観測地点の距離が135kmであるセントヘレンズ火山噴火の観測データ（観測濃度 $33,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）について、当該濃度による影響評価を以下のとおり行った。各施設のフィルタが閉塞するまでの時間は、ディーゼル発電機吸気消音器のフィルタで約1.8時間、換気空調設備のフィルタで約3.4時間となる。フィルタ交換に要する時間については、ディーゼル発電機の吸気フィルタは6つに分割されており、フィルタ交換には複雑な作業が必要ないことから、要員3名で40分程度を見込んでいる。

なお、ディーゼル発電機吸気消音器は、下からガラリ内に吸い上げ、さらにそのガラリ内に設置された吸入口から吸い込むため、降下火砕物を吸い込みに

くい構造としているが、上記試算では、こうした点を考慮せず、しかも大気中を降下・浮遊する火砕物の粒子が、粒径にかかわらず、大気中濃度のまますべ

て吸い込まれてフィルタに捕集されることを前提とした計算となっているため、実際には吸気フィルタが閉塞するまでの時間にはさらに余裕があると考えられること、さらに、換気空調設備のフィルタに関しては、フィルタを通過する降下火砕物は細かな微細粒子ではあるが、降下火砕物が建屋内へ侵入することを抑制するため、降灰が確認された時点で空調停止やダンパ閉止の運用により影響防止を図ることとしており、機能に影響を及ぼすことはないとする。

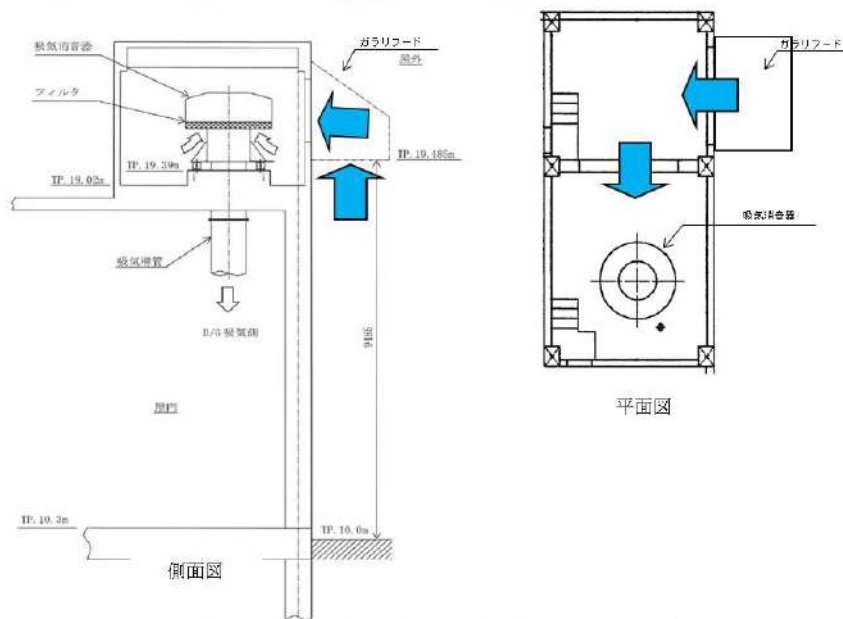


図1 泊発電所のディーゼル発電機吸気ガラリ

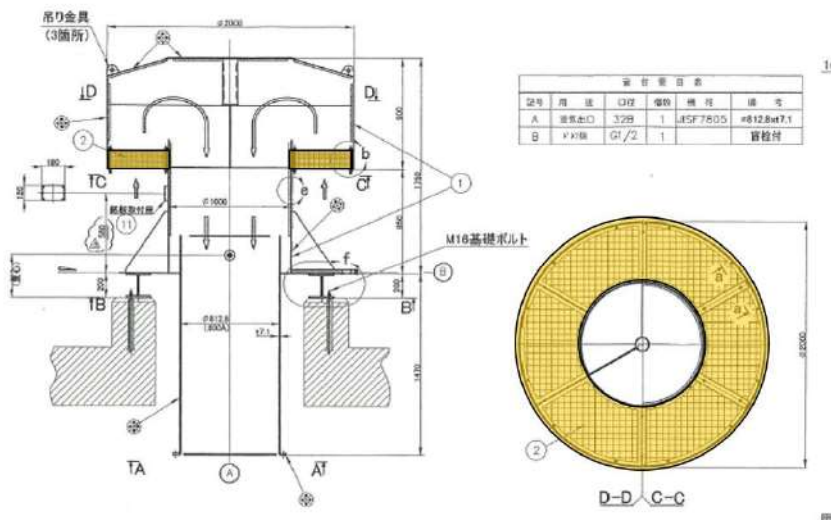


図2 泊発電所のディーゼル発電機の吸気消音器と吸気フィルタ

以上

泊発電所 3 号炉

運用，手順説明資料

外部からの衝撃による損傷の防止
(火山)

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）

安全施設（兼用キヤスクを除く。）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ければならない。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがある想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならぬ。

安全施設（兼用キヤスクを除く。）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ければならない。

重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならぬ。

・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れないものでなければならぬ。

添六、八への反映事項
(設計に関する事項)
工・保

影響を及ぼす可能性がない火山事象

- ・火砕物密度流
- ・溶岩流
- ・岩屑なだれ他、地滑り及び斜面崩壊
- ・火山性土石流、火山泥流及び洪水
- ・火山から発生する飛来物（噴石）
- ・火山ガス
- ・新しい火口の開口
- ・津波及び嘔振
- ・大気現象
- ・地震変動
- ・火山性地震とこれに関する事象
- ・熱水系及び地下水の異常

代替設備により必要な機能が確保されること、又は安全上支障がない期間に除灰あるいは修復等の対応を可能とし、安全機能を損なわれない。

【後段規制との対応】
工：工認（基本設計方針，添付書類）
保：保安規定（運用手順に係る事項，下位文書含む）
【添付六、八への反映事項】
■：添付六、八に反映
□：該当条文中に該当しない
(他条文中での反映事項)

泊発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出

泊発電所の運用期間中における火山活動に関する個別評価

影響を及ぼし得る火山事象

安全施設（クラス1, 2, 3）

その他の安全施設

評価対象施設等

- ・建屋
- ・屋外に設置されている施設
- ・降下火砕物を含む海水の流路となる施設
- ・降下火砕物を含む空気の流路となる施設
- ・外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取込む機構を有する設備

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

追而【地震津波側審査の反映】
(上記の●については、
地震津波側審査結果を受けて反映のため)

完新世に活動を行った●火山
完新世に活動を行っていない○火山

降下火砕物
層厚：20 cm
密度：1.5 g/cm³
粒径：4 mm以下

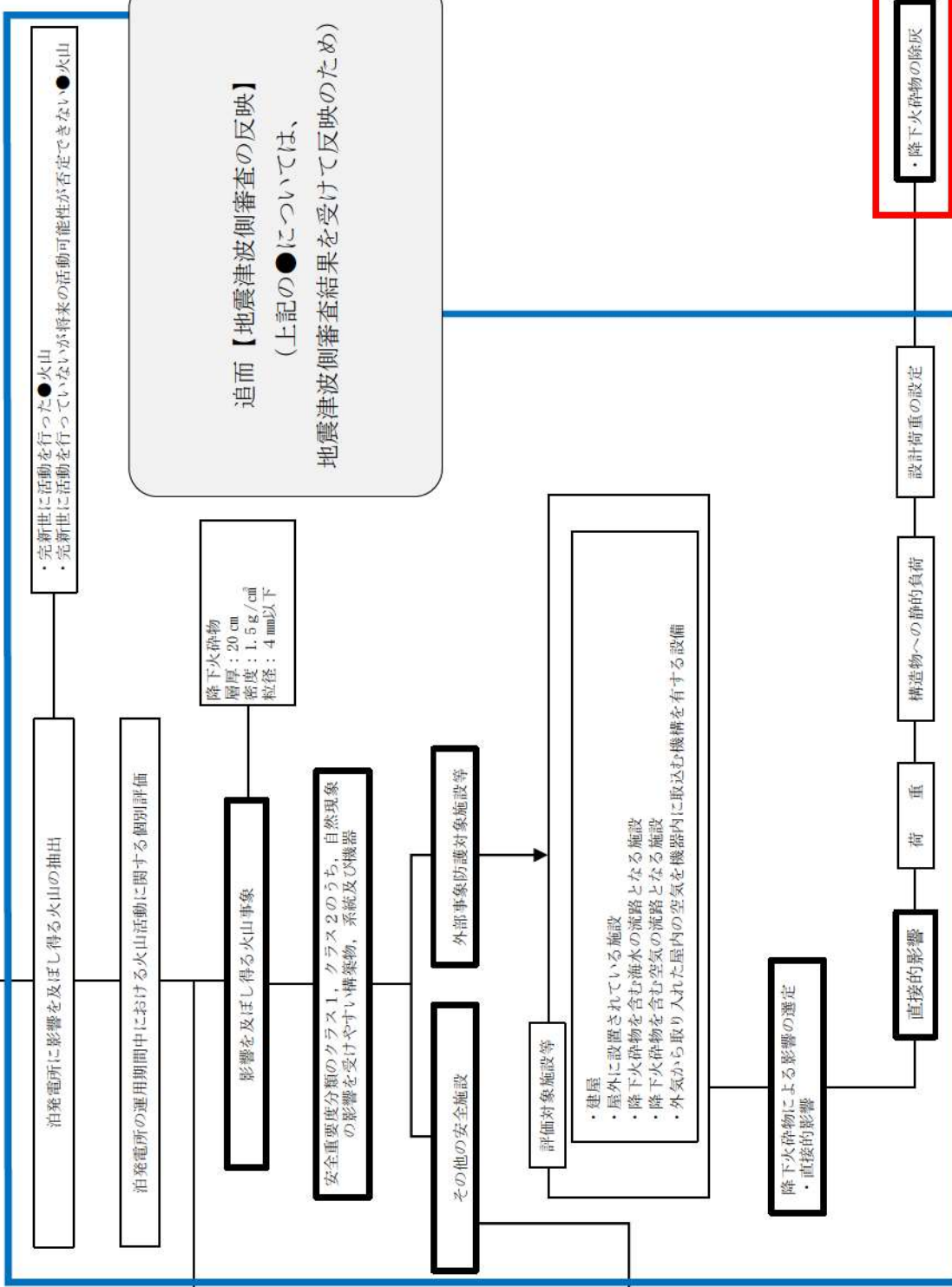
- 保 降下火砕物の除灰（建屋等）
- 保 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ清掃
- 保 フイルタの清掃、取替
- 保 外気取入れダンプの閉止
- 保 換気空調設備の停止
- 保 閉回路循環運転
- 保 点検、補修
- 保 降下火砕物の除灰（建屋等）
- 保 点検、補修
- 保 点検、補修（塗替塗装等）
- 保 中央制御室換気空調装置の閉回路循環運転
- 保 開閉所碍子清掃

添六、八への反映事項
(手順等に関する事項)

重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼす恐れがあると想定されると想定されざるを得ないので無視しない。
 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼす恐れがあると想定されると想定されざるを得ないので無視しない。

添六、八への反映事項
 (設計に関する事項)
 工・保

追而【地震津波側審査の反映】
 (上記の●については、
 地震津波側審査結果を受けて反映のため)



・完新世に活動を行った●火山
 ・完新世に活動を行っていない○火山

降下火砕物
 層厚：20 cm
 密度：1.5 g/cm³
 粒径：4 mm以下

安全重要度分類のクラス1, クラス2のうち、自然現象の影響を受けやすい構築物、系統及び機器

外部事象防護対象施設等

その他の安全施設

評価対象施設等
 ・建屋
 ・屋外に設置されている施設
 ・降下火砕物を含む海水の流路となる施設
 ・降下火砕物を含む空気の流路となる施設
 ・外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取込む機構を有する設備

降下火砕物による影響の選定
 ・直接的影響

直接的影響

荷重

構造物への静的負荷

設計荷重の設定

降下火砕物の除去

添六、八への反映事項
 (設計に関する事項)

影響を及ぼす可能性がない火山事象

・火砕物密度流
 ・溶岩流
 ・岩屑なだれ他、地滑り及び斜面崩壊
 ・火山性土石流、火山泥流及び洪水
 ・火山から発生する飛来物(噴石)
 ・火山ガス
 ・新しい火口の開口
 ・津波及び滑振
 ・大気現象
 ・地震変動
 ・火山性地震とこれに関する事象
 ・熱水系及び地下水の異常

代替設備により必要な機能が確保されること、又は安全上支障がない期間に除灰あるいは修復等の対応を可能とし、安全機能を損なわない。

【後規制との対応】
 工：工認(基本設計方針、添付書類)
 保：保安規定(運用手順に係る事項、添付書類含む)
 【添付六、八への反映事項】
 ○：添付六、八に反映
 □：該当条文中に該当しない
 (他条文での反映事項)

技術的能力に係る運用対策（設計基準）

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの衝撃による 損傷の防止	降下火砕物の除去作業及び 除灰後における降下火 砕物による静的荷重や腐 食等の影響に対する保守 管理	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 降灰が確認された場合には、建屋や屋外の設備等に長期間降下火砕物の荷重を掛け続けないこと、また降下火砕物の付着による腐食等が生じる状況を緩和するため堆積した降下火砕物の除灰を実施する。 降下火砕物による影響が見られた場合、必要に応じ補修を行う。
		体制	(担当箇所による保守・点検の体制) (降灰時の体制)
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> 日常点検 定期点検 降灰時及び降灰後の巡視点検
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順、保守・点検に関する教育
	外気取入ダンプの閉止， 換気空調系の停止，閉回 路循環運転	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 降灰が確認された場合には、外気取入口に設置している平型フィルタ，状況に応じて外気取入ダンプの閉止，換気空調系の停止又は閉回路循環運転を行い，建屋内への降下火砕物の侵入を防止する。
		体制	(降灰時の体制)
		保守・点検	-
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順に関する教育

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
第6条 外部からの衝撃による損傷の防止	フィルタ取替・清掃作業 等	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 降灰が確認された場合には、換気空調設備の外気取入口の平型フィルタについて、フィルタ差圧を確認するとともに、状況に応じて清掃や取替を実施する。 ディーゼル発電機運転時は、ディーゼル発電機吸気消音器吸気フィルタの巡視点検を行い、必要に応じて取替・清掃を行う。
		体制	(降灰時の体制)
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> 降灰時の巡視点検
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順に関する教育
		運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 降灰時に、海水を通水する原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ差圧の巡視点検の強化を行い、状況に応じて洗浄を行う。
	原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ清掃	体制	(降灰時の体制)
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> ストレーナの日常点検 降灰時の巡視点検
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順、保守・点検に関する教育

設置許可基準規則 対象条文	対象項目	区分	運用対策等
	碍子清掃	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 碍子表面に降下火砕物の付着が見られた場合、碍子の清掃を行う。
		体制	(降灰時の体制)
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> 日常保守点検 定期点検 降灰時の巡視点検
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順、保守・点検に関する教育
第6条 外部からの衝撃による損傷の防止	降灰時の特別点検	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 降灰が確認された場合に、設計基準対象施設に対して降下火砕物の堆積や侵入等により影響を受けた可能性がある設備について、特別点検を実施する。
		体制	(降灰時の体制)
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> 降灰時の巡視点検、状況確認
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順、保守・点検に関する教育
	降灰後の点検	運用・手順	<ul style="list-style-type: none"> 降灰後、降下火砕物の堆積や侵入等により影響を受けた可能性がある設備について巡視点検を実施し、降下火砕物による影響を確認した場合は、必要に応じて点検等を行う。 腐食等の中長期的な影響については、日常点検・定期点検により確認する。
		体制	(降灰後の体制)
		保守・点検	<ul style="list-style-type: none"> 巡視点検 定期点検
		教育・訓練	<ul style="list-style-type: none"> 運用・手順、保守・点検に関する教育