

女川原子力発電所 2号炉

設計基準対象施設について

(6条 外部からの衝撃による損傷の防止 (火山))

平成31年 3月

東北電力株式会社

目次

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

下線は、今回の提出資料を示す。

女川原子力発電所 2号炉
外部からの衝撃による損傷の防止
(火山)

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

第6条：外部からの衝撃による損傷の防止
(火山)

<目次>

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

1.2 追加要求事項に対する適合性

(1) 位置，構造及び設備

(2) 安全設計方針

(3) 適合性の説明

2. 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）

別添資料1 火山影響評価について

3. 運用，手順説明資料

別添資料2 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）

< 概 要 >

1. において、設計基準対処設備の設置許可基準規則、技術基準規則の追加要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する女川原子力発電所2号炉における適合性を示す。

2. において、設計基準対処設備について、追加要求事項に適合するために必要となる機能を達成するための設備又は運用等について説明する。

3. において、追加要求事項に適合するための運用、手順等を抽出し、必要となる運用対策等を整理する。

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

外部からの衝撃による損傷の防止について，設置許可基準規則第6条及び技術基準規則第7条において，追加要求事項を明確化する(表 1.1-1)。

表 1.1-1 設置許可基準規則第 6 条及び技術基準規則第 7 条要求事項

設置許可基準規則	技術基準規則	備考
<p>第 6 条(外部からの衝撃による損傷の防止) 安全施設は、想定される自然現象(地震及び津波を除く。次項において同じ。)が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならぬ。</p>	<p>第 7 条(外部からの衝撃による損傷の防止) 設計基準対象施設が想定される自然現象(地震及び津波を除く。)によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。</p>	<p>【追加要求事項】</p>
<p>2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあるとき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。</p>		<p>【追加要求事項】</p>
<p>3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせないもの(故意によるものを除く。)に対して安全機能を損なわせないものでなければならぬ。</p>	<p>2 周辺監視区域に隣接する地域に事業所、鉄道、道路その他の外部からの衝撃が発生するおそれがある要因がある場合には、事業所における火災又は爆発事故、危険物を搭載した車両、船舶又は航空機の事故その他の敷地及び敷地周辺の状況から想定される事象であって人為によるもの(故意によるものを除く。)により発電用原子炉施設の安全性が損なわれないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p> <p>3 航空機の墜落により発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p>	<p>【追加要求事項】</p>

1.2 追加要求事項に対する適合方針

(1) 位置、構造及び設備

五 発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

本発電用原子炉施設は、(1)耐震構造、(2)耐津波構造に加え、以下の基本的方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(a) 外部からの衝撃による損傷の防止

安全施設は、発電所敷地で想定される洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地すべり、火山の影響、生物学的事象、森林火災及び高潮の自然現象（地震及び津波を除く。）又はその組合せに遭遇した場合において、自然現象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件においても安全機能を損なわない設計とする。

なお、発電所敷地で想定される自然現象のうち、洪水及び地すべりについては、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

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

また、安全施設は、発電所敷地又はその周辺において想定される飛来物（航空機落下）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害の発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわない設計とする。

なお、発電所敷地又はその周辺において想定される人為事象のうち、飛来物（航空機落下）については、確率的要因により設計上考慮する必要はない。また、ダムの崩壊については立地的要因により考慮する必要はない。

自然現象及び発電所敷地又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）の組み合わせについては、地震、津波、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、火山の影響、生物学的事象、森林火災等を考慮する。事象が単独で発

生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組み合わせを特定し、その組み合わせの影響に対しても安全機能を損なわない設計とする。

ここで、想定される自然現象及び発電所敷地又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含める。

(a-7) 火山

安全施設は、発電所の運用期間中において発電所の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象として設定した層厚 15cm, 粒径 2.0mm 以下、密度 $0.7\text{g}/\text{cm}^3$ （乾燥状態）～ $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ （湿潤状態）の降下火砕物に対し、以下のような設計とすることにより降下火砕物による直接的影響に対して機能維持すること、若しくは、降下火砕物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応を行うこと、又は、それらを適切に組み合わせること、その安全機能を損なわない設計とする。

- ・ 構造物への静的負荷に対して安全裕度を有する設計とすること
- ・ 水循環系の閉塞に対して狭隘部等が閉塞しない設計とすること
- ・ 換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）に対して降下火砕物が侵入しにくい設計とすること
- ・ 水循環系の内部における摩耗並びに換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（摩耗）に対して摩耗しにくい設計とすること
- ・ 構造物の化学的影響（腐食）、水循環系の化学的影響（腐食）並びに換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）に対して短期での腐食が発生しない設計とすること
- ・ 発電所周辺の大気汚染に対して中央制御室換気空調系は降下火砕物が侵入しにくく、さらに外気を遮断できる設計とすること
- ・ 電気系及び計測制御系の盤の絶縁低下に対して空気を取り込む機構を有する計測制御設備（安全保護系）及び非常用電源設備（所内低圧系）の設置場所の非常用換気空調系は降下火砕物が侵入しにくい設計とすること
- ・ 降下火砕物による静的負荷や腐食等の影響に対して、降下火砕物の除去や非常用換気空調系外気取入口のバグフィルタの取替

え若しくは清掃，又は，換気空調系の停止若しくは閉回路循環運転の実施により安全機能を損なわない設計とすること

さらに，降下火砕物による間接的影響である7日間の外部電源喪失及び発電所外での交通の途絶によるアクセス制限事象に対し，発電所の安全性を維持するために必要となる電源の供給が継続でき，安全機能を損なわない設計とする。

(2) 安全設計方針

1.8.7 火山防護に関する基本方針

1.8.7.1 設計方針

(1) 火山事象に対する設計の基本方針

安全施設は、火山事象に対して、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能を損なわない設計とする。このため、「添付書類六の7.7 火山」で評価し抽出された発電所に影響を及ぼし得る火山事象である降下火砕物に対して、対策を行い、建屋による防護、構造健全性の維持、代替設備の確保等によって、安全機能を損なわない設計とする。

降下火砕物によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を、安全重要度分類のクラス1, クラス2 及びクラス3 に属する構築物、系統及び機器とする。

降下火砕物によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち、外部事象防護対象施設は、建屋による防護又は構造健全性の維持等により安全機能を損なわない設計とする。

(2) 降下火砕物の設計条件

a. 設計条件の検討・設定

発電所の敷地において考慮する火山事象は、「添付書類六 7.7 火山」に示すとおり降下火砕物のみである。

降下火砕物の層厚は、降下火砕物の分布状況、シミュレーション及び分布事例による検討結果から総合的に判断し、保守的に15cmと設定する。なお、鉛直荷重については、湿潤状態の降下火砕物に、過去の観測記録に基づく石巻地域における平均的な積雪量を踏まえて設定する。

粒径及び密度については、文献調査、地質調査及び降下火砕物シミュレーションの結果を踏まえ、粒径2mm以下、密度 $0.7\text{g}/\text{cm}^3$ （乾燥状態） $\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ （湿潤状態）と設定する。

(3) 評価対象施設等の抽出

外部事象防護対象施設等のうち、屋内設備は外殻となる建屋により防護する設計とし、評価対象施設を、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り込む機構を有する施設に分類し抽出する。また、評価対象施設及び外部

事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設を評価対象施設等という。

上記に含まれない構築物，系統及び機器は，降下火砕物により損傷した場合であっても，代替手段があること等により安全機能は損なわれない。

- a. 建屋
 - ・原子炉建屋
 - ・タービン建屋
 - ・制御建屋
- b. 屋外に設置されている施設
 - ・海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）
 - ・海水ストレーナ（高圧炉心スプレー補機冷却海水ストレーナ）
 - ・排気筒
 - ・非常用ガス処理系（屋外配管）
 - ・復水貯蔵タンク
 - ・地下軽油タンクピット
- c. 降下火砕物を含む海水の流路となる施設
 - ・海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）
 - ・海水ストレーナ（原子炉補機冷却海水ストレーナ，高圧炉心スプレー補機冷却海水ストレーナ）及び下流設備
- d. 降下火砕物を含む空気の流路となる施設
 - ・非常用ディーゼル発電機及び高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機（以下「非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機を含む。）」という）
 - ・非常用換気空調設備（外気取入口）のうち中央制御室換気空調系
 - ・非常用換気空調設備（外気取入口）のうち計測制御電源室換気空調系
 - ・非常用換気空調設備（外気取入口）のうち原子炉補機室換気空調系
 - ・排気筒
 - ・非常用ガス処理系（屋外配管）
- e. 外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設
 - ・計測制御設備（安全保護系）
 - ・非常用電源設備（所内低圧系）

- f. 降下火砕物の影響を受ける施設であって、その停止等により、外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設
 - ・非常用ディーゼル発電機排気消音器及び排気管，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器及び排気管（以下「非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）排気消音器及び排気管」という。）
 - ・海水取水設備（除塵装置）

上記により抽出した評価対象施設等を表 1.8.7-1 に示す。

(4) 降下火砕物による影響の選定

降下火砕物の特徴及び評価対象施設等の構造や設置状況等を考慮して、降下火砕物が直接及ぼす影響（以下「直接的影響」という。）とそれ以外の影響（以下、「間接的影響」という。）を選定する。

a. 降下火砕物の特徴

各種文献の調査結果より、降下火砕物は以下の特徴を有する。

- (a) 火山ガラス片，鉱物結晶片から成る⁽¹⁾。ただし，火山ガラス片は砂よりもろく硬度は低く⁽²⁾，主要な鉱物結晶片の硬度は砂同等またはそれ以下である⁽³⁾⁽⁴⁾。
- (b) 硫酸等を含む腐食性のガス（以下「腐食性ガス」という。）が付着している⁽¹⁾。ただし，金属腐食研究の結果より，直ちに金属腐食を生じさせることはない⁽⁵⁾。
- (c) 水に濡れると導電性を生じる⁽¹⁾。
- (d) 湿った降下火砕物は乾燥すると固結する⁽¹⁾。
- (e) 降下火砕物粒子の融点は約 1,000℃であり，一般的な砂に比べ低い⁽¹⁾。

b. 直接的影響

降下火砕物の特徴から直接的影響の要因となる荷重，閉塞，摩耗，腐食，大気汚染，水質汚染及び絶縁低下を抽出し，評価対象施設等の構造や設置状況等を考慮して直接的な影響因子を以下のとおり選定する。

(a) 荷重

「荷重」について考慮すべき影響因子は，建屋及び屋外設備の上に堆積し静的な負荷を与える「構造物への静的負荷」及び建屋及び屋外設備に対し降灰時に衝撃を与える「粒子の衝突」である。

評価に当たっては以下の荷重の組合せを考慮する。

- (a-1) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重

評価対象施設等に作用する荷重として、自重等の常時作用する荷重、内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(a-2) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は、降下火砕物によって安全機能を損なわない設計とするため、設計基準事故とは独立事象である。

また、評価対象施設等のうち設計基準事故時荷重が生じる屋外設備としては、原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても、通常運転時の系統内圧力及び温度と変わらず、機械的荷重が変化することはないため、設計基準事故時荷重と降下火砕物との組合せは考慮しない。

(a-3) その他の自然現象の影響を考慮した荷重の組合せ

降下火砕物と組み合わせを考慮すべき火山以外の自然現象は、荷重の影響において風（台風）及び積雪であり、降下火砕物の荷重と適切に組み合わせる。

(b) 閉塞

「閉塞」について考慮すべき影響因子は、降下火砕物を含む海水が流路の狭隘部等を閉塞させる「水循環系の閉塞」及び降下火砕物を含む空気が機器の狭隘部や換気系の流路を閉塞させる「換気系、電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞）」である。

(c) 摩耗

「摩耗」について考慮すべき影響因子は、降下火砕物を含む海水が流路に接触することにより配管等を摩耗させる「水循環系の内部における摩耗」及び降下火砕物を含む空気が動的機器の摺動部に侵入し摩耗させる「換気系、電気系及び計測制御系の機械的影響（摩耗）」である。

(d) 腐食

「腐食」について考慮すべき影響因子は、降下火砕物に付着した腐食性ガスにより建屋及び屋外設備の外表面を腐食させる「構造物への化学的影響（腐食）」、換気系、電気系及び計測制御系において降下火砕物を含む空気の流路を腐食させる「換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）」、及び海水に溶出した腐食性成分により海水管等を腐食させる「水循環系の化学的影響（腐食）」である。

(e) 大気汚染

「大気汚染」について考慮すべき影響因子は、降下火砕物によ

り汚染された発電所周辺の大気が運転員の常駐する中央制御室内に侵入することによる居住性の劣化及び降下火砕物の除去，屋外設備の点検等，屋外における作業環境を劣化させる「発電所周辺の大気汚染」である。

(f) 水質汚染

「水質汚染」については，給水源である河川水に降下火砕物が混入することによる汚染が考えられるが，発電所では給水処理設備により水処理した給水を使用しており，また水質管理を行っていることから，安全施設の安全機能には影響しない。

(g) 絶縁低下

「絶縁低下」について考慮すべき影響因子は，湿った降下火砕物が，電気系及び計測制御系絶縁部に導電性を生じさせることによる「盤の絶縁低下」である。

c. 間接的影響

(a) 外部電源喪失及びアクセス制限

降下火砕物によって発電所に間接的な影響を及ぼす因子は，湿った降下火砕物が送電線の碍子，開閉所の充電露出部等に付着し絶縁低下を生じさせることによる広範囲にわたる送電網の損傷に伴う「外部電源喪失」及び降下火砕物が道路に堆積することによる交通の途絶に伴う「アクセス制限」である。

(5) 降下火砕物の直接的影響に対する設計

直接的影響については，評価対象施設等の構造や設置状況等(形状，機能，外気吸入や海水通水の有無)を考慮し，想定される各影響因子に対して，影響を受ける各評価対象施設等が安全機能を損なわない以下の設計とする。

a. 降下火砕物による荷重に対する設計

(a) 構造物への静的負荷

評価対象施設等のうち，構造物への静的負荷を考慮すべき施設は，降下火砕物が堆積する以下の施設である。

・ 建屋

原子炉建屋，タービン建屋，制御建屋

・ 屋外に設置されている施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ），海水ストレーナ（高圧炉心スプレー補機冷却海水ストレーナ），復水貯蔵タンク，地下軽油タンクピット

- ・ 降下火砕物の影響を受ける施設であって、その停止等により、外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）排気消音器及び排気管

当該施設の許容荷重が、降下火砕物による荷重に対して安全裕度を有することにより、構造健全性を失わず安全機能を損なわない設計とする。若しくは、降下火砕物が堆積しにくい又は直接堆積しない構造とすることで、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

評価対象施設等の建屋においては、建築基準法における一般地域の積雪の荷重の考え方に準拠し、降下火砕物の除去を適切に行うことから、降下火砕物による荷重を短期に生じる荷重として扱う。また、降下火砕物による荷重と他の荷重を組合せた状態に対する許容限界は次のとおりとする。

- ・ 原子炉建屋，タービン建屋，制御建屋

原子炉建屋，タービン建屋および制御建屋は、各建屋の屋根スラブにおける建築基準法の短期許容応力度を許容限界とする。

- ・ 建屋を除く評価対象施設等

許容応力を「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）」等に準拠する。

(b) 粒子の衝突

評価対象施設等のうち、建屋及び屋外設備は、「粒子の衝突」に対して、「1.8.2 竜巻防護に関する基本方針」に基づく設計によって、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

b. 降下火砕物による荷重以外に対する設計

降下火砕物による荷重以外の影響は、構造物への化学的影響（腐食）、水循環系の閉塞、内部における摩耗及び化学的影響（腐食）、換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）及び化学的影響（腐食）等により安全機能を損なわない設計とする。

外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計については、「c. 外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計」に示す。

(a) 構造物への化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、構造物への化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、降下火砕物の直接的な付着による影響が考えられる以下の施設である。

- ・ 建屋

原子炉建屋，タービン建屋，制御建屋

- ・屋外に設置されている施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ），海水ストレーナ（高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ），非常用ガス処理系（屋外配管），排気筒，復水貯蔵タンク，地下軽油タンクピット

- ・降下火砕物の影響を受ける施設であって，その停止等により，外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）排気消音器及び排気管

金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食を生じないが，外装の塗装等によって短期での腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

(b) 水循環系の閉塞，内部における摩耗及び化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち，水循環系の閉塞，内部における摩耗及び化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は，以下の施設である。

- ・降下火砕物を含む海水の流路となる施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ），海水ストレーナ（原子炉補機冷却海水ストレーナ，高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ）及び下流設備

- ・降下火砕物の影響を受ける施設であって，その停止等により，外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

海水取水設備（除塵装置）

降下火砕物は粘土質ではないことから水中で固まり閉塞することはないが，当該施設については，降下火砕物の粒径に対し十分な流路幅を設けることにより，海水の流路となる施設が閉塞しない設計とする。

内部における摩耗については，主要な降下火砕物は砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから，摩耗による影響は小さい。また当該施設については，定期的な内部点検及び日常保守管理により，状況に応じて補修が可能であり，摩耗により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

化学的影響（腐食）については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないが，耐食性のある材料の

使用や塗装の実施等によって、腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお、長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(c) 換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）及び化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）及び化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、以下の施設である。

・屋外に設置されている施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ）

機械的影響（閉塞）については、海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ）の電動機本体は外気と遮断された全閉構造であり、また、原子炉補機冷却海水ポンプ電動機の空気冷却器の冷却管内径及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの冷却流路は降下火砕物粒径以上の幅を設ける構造とすることにより、機械的影響（閉塞）により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

化学的影響（腐食）については、金属腐食研究の結果より、降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないが、耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって、腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なうことのない設計とする。なお、長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(d) 絶縁低下及び化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、絶縁低下及び化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、以下の施設である。

・外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設

計測制御設備（安全保護系）、非常用電源設備（所内低圧系）

当該施設の設置場所は原子炉補機室換気空調系及び計測制御電源室換気空調系にて空調管理されており、本換気空調系の外気取入口にはバグフィルタを設置していることから、仮に室内に侵入した場合でも降下火砕物は微量であり、粒径は極めて細かな粒子である。

また、中央制御室換気空調系については、外気取入ダンパを閉止

し閉回路循環運転を行うことにより侵入を阻止することも可能である。

バグフィルタの設置により降下火砕物の侵入に対する高い防護性能を有することにより、降下火砕物の付着に伴う絶縁低下及び化学的影響（腐食）による影響を防止し、計測制御設備（安全保護系）、非常用電源設備（所内低圧系）の安全機能を損なわない設計とする。

c. 外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計

外気取入口からの降下火砕物の侵入に対して、以下のとおり安全機能を損なわない設計とする。

(a) 機械的影響（閉塞）

評価対象施設等のうち、外気取入口からの降下火砕物の侵入による機械的影響（閉塞）を考慮すべき施設は、降下火砕物を含む空気の流路となる以下の施設である。

・降下火砕物を含む空気の流路となる施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機、非常用ディーゼル発電機含む。）、非常用換気空調設備（外気取入口）、非常用ガス処理系（屋外配管）、排気筒

排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）は、降下火砕物が侵入した場合でも、排気筒の構造から排気流路が閉塞しない設計とすることにより、降下火砕物の影響に対して機能を損なわない設計とする。

また、外気を取り入れる非常用換気空調設備（外気取入口）の空気の流路にそれぞれフィルタを設置することにより、フィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とし、さらに降下火砕物がフィルタに付着した場合でも取替又は清掃が可能な構造とすることで、降下火砕物により閉塞しない設計とする。

ディーゼル発電機機関は、フィルタを通過した小さな粒径の降下火砕物が侵入した場合でも、降下火砕物により閉塞しない設計とする。

(b) 機械的影響（摩耗）

評価対象施設等のうち、外気取入口からの降下火砕物の侵入による機械的影響（摩耗）を考慮すべき施設は、以下の施設である。

・降下火砕物を含む空気の流路となる施設のうち摺動部を有する施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）

主要な降下火砕物は砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから、摩耗の影響は小さい。

また、仮にディーゼル発電機機関の内部に降下火砕物が侵入した場合でも耐摩耗性のある材料を使用することで、摩耗により非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）の安全機能を損なわない設計とする。

外気を取り入れる非常用換気空調設備（外気取入口）にバグフィルタを設置することにより、フィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とし、摩耗により非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）の安全機能を損なわない設計とする。

(c) 化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、外気取入口からの降下火砕物の侵入による化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、以下の施設である。

- ・降下火砕物を含む空気の流路となる施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）、非常用換気空調設備（外気取入口）、非常用ガス処理系（屋外配管）、排気筒

金属腐食研究の結果より、降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないが、塗装の実施等によって、腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(d) 大気汚染（発電所周辺の大気汚染）

大気汚染を考慮すべき中央制御室は、降下火砕物により汚染された発電所周辺の大気が、中央制御室換気空調系の外気取入口を通じて中央制御室に侵入しないようバグフィルタを設置することにより、降下火砕物が外気取入口に到達した場合であってもフィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とする。

また、中央制御室換気空調系については、外気取入ダンパの閉止及び閉回路循環運転を可能とすることにより、中央制御室内への降下火砕物の侵入を防止する。さらに外気取入遮断時において、酸素濃度及び二酸化炭素濃度の影響評価を実施し、室内の居住性を確保する設計とする。

(6) 降下火砕物の間接的影響に対する設計方針

降下火砕物による間接的影響として考慮する、広範囲にわたる送電

網の損傷による 7 日間の外部電源喪失及び発電所外での交通の途絶によるアクセス制限事象が生じた場合については、降下火砕物に対して非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。）の安全機能を維持することで、発電用原子炉の停止及び停止後の発電用原子炉の冷却，並びに使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。）により継続できる設計とすることにより，安全機能を損なわない設計とする。電源の供給に関する設計方針は、「10. 非常用電源設備」に記載する。

1.8.7.2 手順等

降下火砕物の降灰時における手順について、降下火砕物の除去（資機材含む。）等の対応を適切に実施するため、以下について手順を定める。

- (1) 降灰が確認された場合には、建屋や屋外の設備に長期間降下火砕物の荷重をかけ続けられないこと、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に、評価対象施設等に堆積した降下火砕物の除灰を適切に実施する手順を定める。
- (2) 降灰が確認された場合には、状況に応じて外気取入ダンパの閉止、換気空調設備の停止又は閉回路循環運転により、建屋内への降下火砕物の侵入を防止する手順を定める。
- (3) 降灰が確認された場合には、非常用換気空調設備の外気取入口のバグフィルタについて、バグフィルタの差圧を確認するとともに、状況に応じて取替え又は清掃を実施する。

1.8.7.3 参考文献

- (1) (内閣府) 広域的な火山防災対策に係る検討会 (第3回) (資料3)
- (2) 「シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状」 武若耕司, コンクリート工学, Vol. 42, 2004
- (3) 「新編火山灰アトラス[日本列島とその周辺]. 第2刷」町田洋ほか, 東京大学出版会, 2011
- (4) 「理科年表 (2017)」 国立天文台編
- (5) 「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, 1990

表 1.8.7-1 評価対象施設等の抽出結果

	設備区分	評価対象施設等
外部事象防護対象施設等	建屋	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉建屋 ・ タービン建屋 ・ 制御建屋
	屋外に設置されている施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ， 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ） ・ 海水ストレーナ（高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ） ・ 非常用ガス処理系（屋外配管） ・ 排気筒 ・ 復水貯蔵タンク ・ 地下軽油タンクピット
	降下火砕物を含む海水の流路となる施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ， 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ） ・ 海水ストレーナ（原子炉補機冷却海水ストレーナ， 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ）及び下流設備
	降下火砕物を含む空気の流路となる施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。） ・ 非常用換気空調設備（中央制御室換気空調系， 原子炉補機室換気空調系， 計測制御電源室換気空調系） ・ 非常用ガス処理系（屋外配管） ・ 排気筒
	外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安全保護系電源盤 ・ 非常用所内電源系電源盤
外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。） 排気消音器及び排気管 ・ 海水取水設備（除塵装置） 	

(3) 適合性説明

第六条 外部からの衝撃による損傷の防止

- 1 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。
- 2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。
- 3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

適合のための設計方針

第1項について

発電所敷地で想定される自然現象（地震及び津波を除く。）については、敷地及び敷地周辺の自然環境を基に洪水，風（台風），竜巻，凍結，降水，積雪，落雷，地すべり，火山の影響，生物学的事象，森林火災及び高潮を選定し，設計基準を設定するに当たっては，発電所の立地地域である女川町に対する規格・基準類による設定値及び発電所の最寄りの気象官署である石巻特別地域気象観測所で観測された過去の記録並びに大船渡特別地域気象観測所で観測された過去の記録をもとに設定する。また，これらの自然現象ごとに関連して発生する可能性がある自然現象も含める。

安全施設は，発電所敷地で想定される自然現象が発生した場合においても安全機能を損なわない設計とする。ここで，発電所敷地で想定される自然現象に対して，安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含める。

また，発電所敷地で想定される自然現象又はその組み合わせに遭遇した場合において，自然現象そのものがもたらす環境条件及びその結果として安全施設で生じ得る環境条件を考慮する。

発電用原子炉施設のうち安全施設は，以下のとおり条件を設定し，自然現象によって発電用原子炉施設の安全性が損なわれないようにする。

(9) 火山の影響

外部事象防護対象施設は、降下火砕物による直接的影響及び間接的影響が発生した場合においても、安全機能を損なわないよう以下の設計とする。

a. 直接的影響に対する設計

外部事象防護対象施設は、降下火砕物の直接的影響に対して、以下により安全機能を損なわない設計とする。

- ・ 構造物への静的負荷に対して安全裕度を有する設計とすること
- ・ 水循環系の閉塞に対して狭隘部等が閉塞しない設計とすること
- ・ 換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）に対して降下火砕物が侵入しにくい設計とすること
- ・ 水循環系の内部における摩耗並びに換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（摩耗）に対して摩耗しにくい設計とすること
- ・ 構造物の化学的影響（腐食）、水循環系の化学的影響（腐食）並びに換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）に対して短期での腐食が発生しない設計とすること
- ・ 発電所周辺の大気汚染に対して中央制御室換気空調系は降下火砕物が侵入しにくく、さらに外気を遮断できる設計とすること
- ・ 電気系及び計測制御系の盤の絶縁低下に対して空気を取り込む機構を有する計測制御設備（安全保護系）及び非常用電源設備（所内低圧系）の設置場所の非常用換気空調系は降下火砕物が侵入しにくい設計とすること
- ・ 降下火砕物による静的負荷や腐食等の影響に対して、降下火砕物の除去や非常用換気空調設備の外気取入口のバグフィルタの取替え若しくは清掃、又は、換気空調系の停止若しくは閉回路循環運転の実施により安全機能を損なわない設計とすること

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

b. 間接的影響に対する設計

降下火砕物による間接的影響として考慮する、広範囲にわたる送電網の損傷による7日間の外部電源喪失及び発電所外での交通の途絶によるアクセス制限事象が生じた場合については、降下火砕物に対して非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含

む。)の安全機能を維持することで、発電用原子炉の停止及び停止後の発電用原子炉の冷却、並びに使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。）により継続できる設計とすることにより、安全機能を損なわない設計とする。

女川原子力発電所 2 号炉
火山影響評価について

< 目次 >

1. 基本方針
 - 1.1 概要
 - 1.2 火山影響評価の流れ
2. 立地評価
 - 2.1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出
 - 2.2 運用期間における火山活動に関する個別評価
3. 影響評価
 - 3.1 火山事象の影響評価
 - 3.2 火山事象（降下火砕物）に対する設計の基本方針
 - 3.3 火山事象（降下火砕物）から防護する施設
 - 3.4 降下火砕物による影響の選定
 - 3.5 設計荷重の設定
 - 3.6 降下火砕物に対する設計
 - 3.7 降下火砕物の除去等の対策
4. まとめ

補足資料

1. 評価ガイドとの整合性について
2. 降下火砕物の特徴及び影響モードと、影響モードから選定された影響因子に対し影響を受ける評価対象施設等の組合せについて
3. 降下火砕物による摩耗について
4. 降下火砕物の化学的影響（腐食）について
5. 降下火砕物による非常用ディーゼル発電機の吸気に係るバグフィルタの影響評価について
6. 降下火砕物の侵入による非常用ディーゼル機関空気冷却器への影響について
7. 降下火砕物の侵入による潤滑油への影響について
8. 降下火砕物の金属腐食研究について
9. 計測制御設備及び非常用電源設備への降下火砕物の影響について
10. 建屋等の降灰除去について
11. 降下火砕物降灰時のバグフィルタ取替手順について
12. 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

13. 重大事故等対処設備への考慮について
14. 水質汚染に対する補給水等への影響について
15. 気中降下火砕物の対策に係る検討状況について
16. 女川原子力発電所における気中降下火砕物濃度の算出について
17. 降下火砕物と積雪荷重との組合せについて
18. 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
19. 降下火砕物による摩耗や融解の影響について
20. 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
21. 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

1. 基本方針

1.1 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第五号）」第六条において、外部からの衝撃による損傷防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、火山の影響を挙げている。

火山の影響により発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを評価するため、火山影響評価を行い、発電用原子炉施設へ影響を与えないことを評価する。

1.2 火山影響評価の流れ

火山影響評価は、「原子力発電所の火山影響評価ガイド」を参照し、図1.2-1のフローに従い立地評価と影響評価の2段階で行う。

立地評価では、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出を行い、抽出された火山の火山活動に関する個別評価を行う。具体的には設計対応不可能な火山事象が女川原子力発電所の運用期間中に影響を及ぼす可能性の評価を行う。

設計対応不可能な火山事象が影響を及ぼす可能性が十分低いと評価された場合は、原子力発電所に影響を与える可能性のある火山事象の抽出とその影響評価を行う。

影響評価では、個々の火山事象への設計対応及び運転対応の妥当性について「3.1 火山事象の影響評価」にて評価を行う。（図1.2-2）

なお、立地評価及び原子力発電所に影響を与える可能性のある火山事象の抽出とその影響評価については、「添付書類六 7. 火山」にて示す。

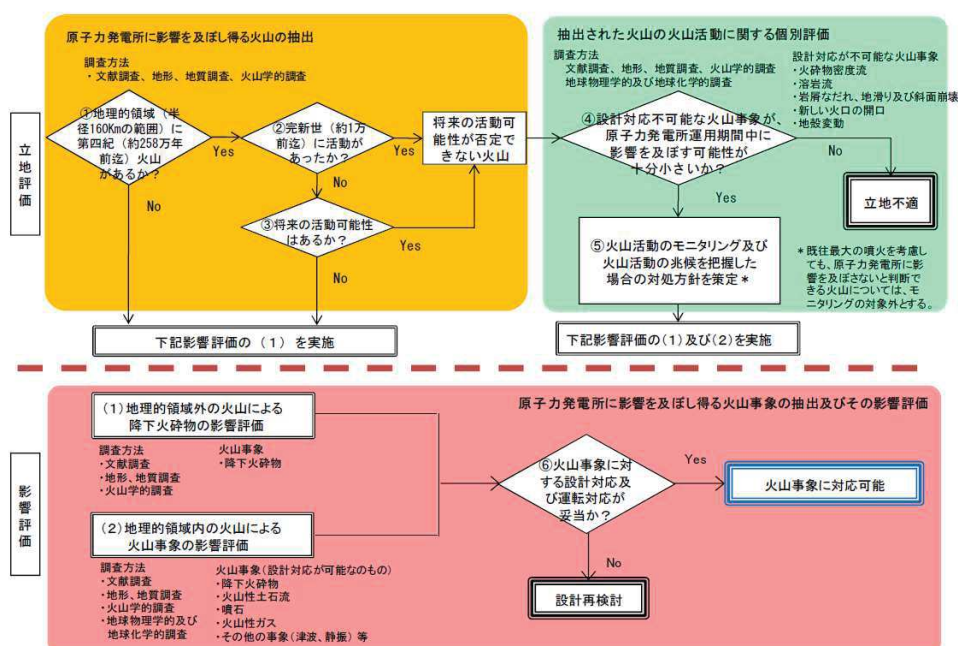


図 1.2-1 火山影響評価の基本フロー「原子力発電所の火山影響評価ガイド」から抜粋

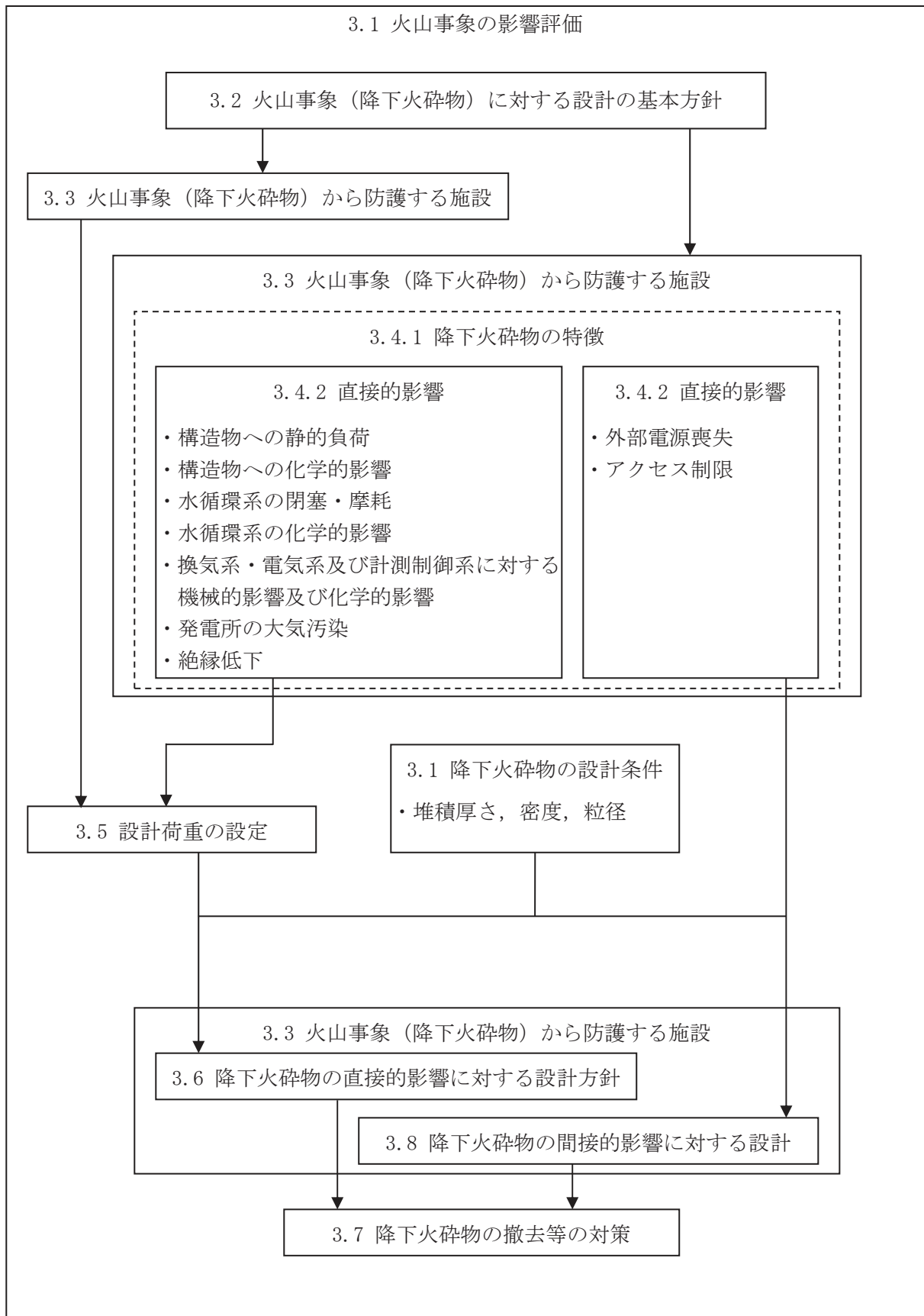


図 1.2-2 影響評価の詳細フロー

2. 立地評価

2.1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出

地理的領域内に分布する第四紀火山（31 火山）について、完新世における活動の有無及び噴火履歴より将来の火山活動の可能性を検討し、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山を抽出した。

その結果、焼石岳、鳥海山、栗駒山、鳴子カルデラ、肘折カルデラ、月山、蔵王山、笹森山、吾妻山、安達太良山及び磐梯山の 11 火山を将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として抽出した。

2.2 運用期間における火山活動に関する個別評価

将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として抽出した 11 火山を対象として、文献調査に基づき、女川原子力発電所 2 号炉の運用期間中における火山活動に関する設計対応不可能事象（火砕物密度流、溶岩流、岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊、新しい火口の開口、地殻変動）の個別評価を行った。

火砕物密度流による堆積物が敷地及び敷地周辺では確認されておらず、敷地まで十分な離隔距離があることから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

溶岩流、岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊については、それぞれの火山と敷地との位置関係より、敷地まで十分な離隔距離があることから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

新しい火口の開口及び地殻変動については、敷地が火山フロントより前弧側に 50km 以上離れていること、敷地周辺では火成活動が確認されていないことから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

以上の検討結果より、発電所の運用期間中に設計対応不可能な火山事象が、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。また、これらの火山事象は、既往最大規模の噴火を考慮しても、発電所に影響を及ぼさないと評価し、火山モニタリングは不要と判断した。

3. 影響評価

3.1 火山事象の影響評価

将来の活動可能性が否定できない火山について、女川原子力発電所 2 号炉の運用期間中の噴火規模を考慮し、それが噴火した場合、原子力発電所の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象を抽出した結果、降下火砕物（火山灰）（以下「降下火砕物」という。）のみが女川原子力発電所に影響を及ぼし得る火山事象であるという結果となった。

原子力発電所敷地内の地質調査において確認した降下火砕物の最大層厚は 10cm であり、肘折カルデラを給源とする降下火砕物（肘折尾花沢テフラ）であることを確認している。なお、原子力発電所敷地内では沖積層がジュラ系の地層を不整合に覆っており、更新世の地層が確認されないことを確認している。

一方、女川原子力発電所2号炉の運用期間中に、このような規模の降下火砕物が敷地周辺に生じる蓋然性を確認するため、文献調査結果、敷地周辺で実施した露頭調査の結果及び降下火砕物シミュレーション結果を用い評価した。降下火砕物シミュレーションの対象火山は、網羅的に抽出するため、原子力発電所敷地周辺で確認されている降下火砕物の給源火山、過去の噴出物のタイプを考慮して鳴子カルデラ、蔵王山、肘折カルデラ及び十和田とし、風速や風向の不確かさを考慮して、約12.5cm（鳴子カルデラ）という層厚を導いた。想定する降下火砕物堆積量は、この評価結果（約12.5cm）を基に設定するが、原子力発電所敷地内では更新世の地層が確認されないことも踏まえ、さらに、堆積量評価結果に保守性を考慮することとし、基準降下火砕物堆積量を15cmと設定した。そのほか得られた降下火砕物の特性を表3.1-1、及び表3.1-2に示す。なお、鉛直荷重については、湿潤状態の降下火砕物に、過去の観測記録に基づく石巻地域における平均的な積雪量を考慮し設定する。また粒径及び密度については、文献調査、地質調査及び降下火砕物シミュレーションの結果を踏まえ、粒径2mm以下、密度 $0.7\text{g}/\text{cm}^3$ （乾燥状態）～ $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ （湿潤状態）と設定した。

表 3.1-1 降下火砕物特性の設定結果

項目	設定	備考
層度	15cm	「構造物への静的負荷」の評価に使用
密度	0.7g/cm ³ ~ 1.5g/cm ³ (乾燥状態) (湿潤状態)	
堆積荷重 ^{※1}	2547N/m ²	
粒径	2mm 以下	「水循環系の閉塞」及び「換気，電気系及び計測制御系に対する機械的影響」の評価に使用
化学的特性	火山ガス成分が付着	火山ガス成分には，化学的腐食や給水の汚染を引き起こす成分（塩素イオン，フッ素イオン，硫化物イオン等）が含まれる。

表 3.1-2 火山影響評価ガイド添付1の手法により算出した気中降下火砕物の特性

ϕ	-1~0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7
粒径 i (mm) ^{※4}	1.4	7.1×10^{-1}	3.5×10^{-1}	1.8×10^{-1}	8.8×10^{-2}	4.4×10^{-2}	2.2×10^{-2}	1.1×10^{-2}
粒径 i の割合 p_i (wt%)	2.9×10^{-5}	14.0	59.0	17.0	7.9	2.2	0.26	0.032
堆積速度 v_i (g/s·m ²)	5.1×10^{-7}	0.24	1.0	0.30	0.14	3.8×10^{-2}	4.5×10^{-3}	5.6×10^{-4}
堆積期間 t (h)	24							

※1：湿潤状態の降下火砕物の荷重 ($0.15\text{m} \times 1500\text{kg/m}^3 \times 9.80665\text{m/s}^2$)

+降下火砕物による荷重と組み合わせる積雪荷重 ($17\text{cm}^{※2} \times 20\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{cm})^{※3}$) = $2,547\text{N/m}^2$

※2：降下火砕物による荷重と組み合わせる積雪荷重は石巻地域における年最大積雪深さの平均値とする。

※3：建築基準法施行令に基づく積雪の単位荷重（積雪1cm当たり20N/m²）

※4： ϕ スケール($i=2^{-\phi}$ (mm))による中央粒径を示す

3.2 火山事象（降下火砕物）に対する設計の基本方針

将来の活動可能性が否定できない火山について，女川原子力発電所2号炉の運用期間中の噴火規模を考慮し，発電所の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象を抽出した結果，「3.1 火山事象の影響評価」に示すとおり該当する火山事象は降下火砕物のみであり，地理的領域（160km）の広範囲に影響を及ぼす降下火砕物に対し，安全施設の安全機能を損なわない設計とする。以下に火山事象（降下火砕物）に対する設計の基本方針を示す。

(1) 降下火砕物による直接的な影響（荷重，閉塞，摩耗，腐食等）に対して，安全機能を損なわない設計とする。

- (2) 原子力発電所内の構築物、系統及び機器における降下火砕物の除去等の対応が可能な設計とする。
- (3) 降下火砕物による間接的な影響である 7 日間の外部電源の喪失、発電所外での交通の途絶によるアクセス制限事象に対し、発電所の安全性を維持するために必要となる電源の供給が継続でき、安全機能を損なわない設計とする。

3.3 火山事象（降下火砕物）から防護する施設

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子炉規制委員会規則第五号）」第六条において、「安全施設は、想定される自然現象が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。」とされていることから、降下火砕物の影響から防護する施設は、発電用原子炉施設の安全性を確保するため、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されている安全重要度分類クラス 1、クラス 2 及びクラス 3 に該当する構築物、系統及び機器とする。

また、以下の点を踏まえ、外部事象防護対象施設は、発電用原子炉を停止するため又は停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器、並びに使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物、系統及び機器として安全重要度分類のクラス 1、クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物、系統及び機器とする。また、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて外部事象防護対象施設等という。

- ・ 降下火砕物襲来時の状況を踏まえ、必要に応じプラント停止の措置をとること
- ・ プラント停止後は、その状態を維持することが重要であること

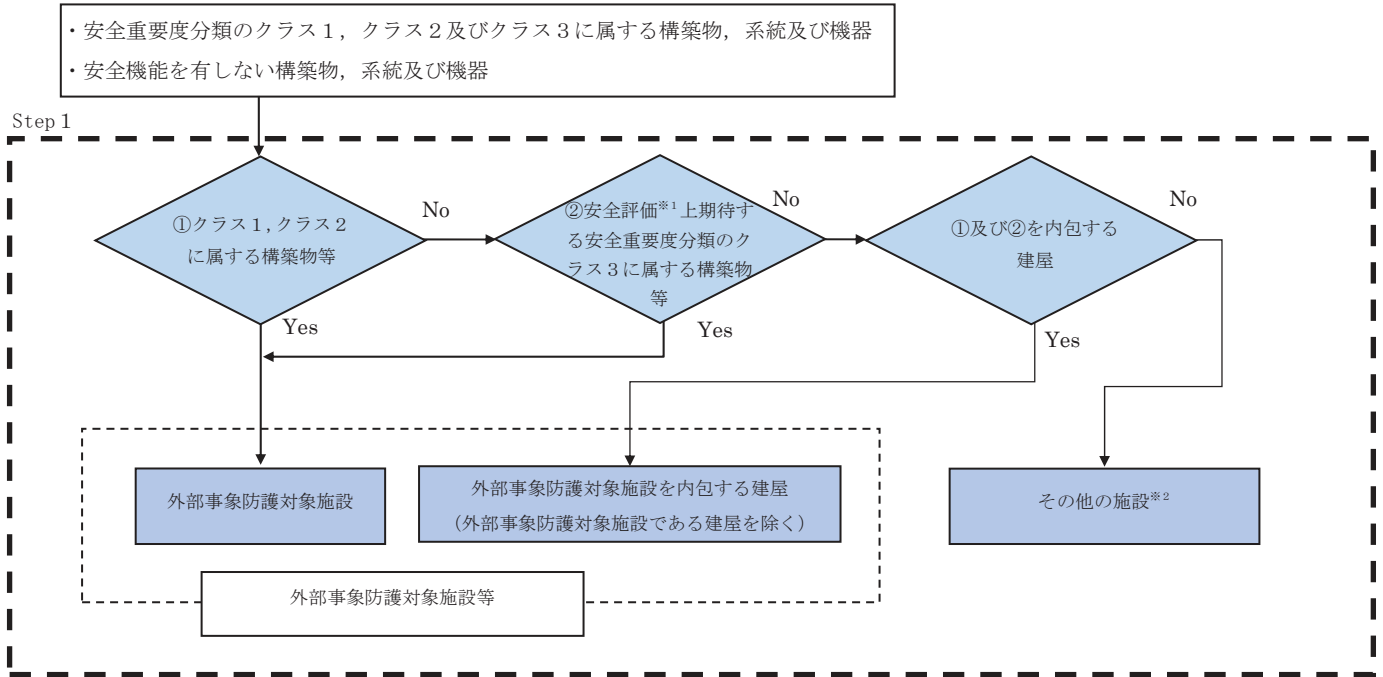
その上で、外部事象防護対象施設等のうち、屋内設備は内包する建屋により防護する設計とし、評価対象施設を、建屋、屋外に設置されている施設、降下火砕物を含む海水の流路となる施設、降下火砕物を含む空気の流れとなる施設、外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設に分類し抽出する。また、評価対象施設及び外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設を評価対象施設等という。

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

以上を踏まえた抽出フローを図 3.3-1 に示す。抽出フローに基づき抽出した評価対象施設等表 3.3-1、表 3.3-2 に示すとともに、評価対象施設等の設置場所を図 3.3-3 に示す。

なお、津波防護施設は重要度分類指針におけるクラス1、クラス2及びクラス3に属する構築物、系統及び機器に該当しないが、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。

(補足資料-20)



※1 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

※2 降下火砕物に対して機能を維持すること若しくは降下火砕物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での除灰、修復等の対応が可能であることを確認する。

図 3.3-1 外部事象防護対象施設等の抽出フロー

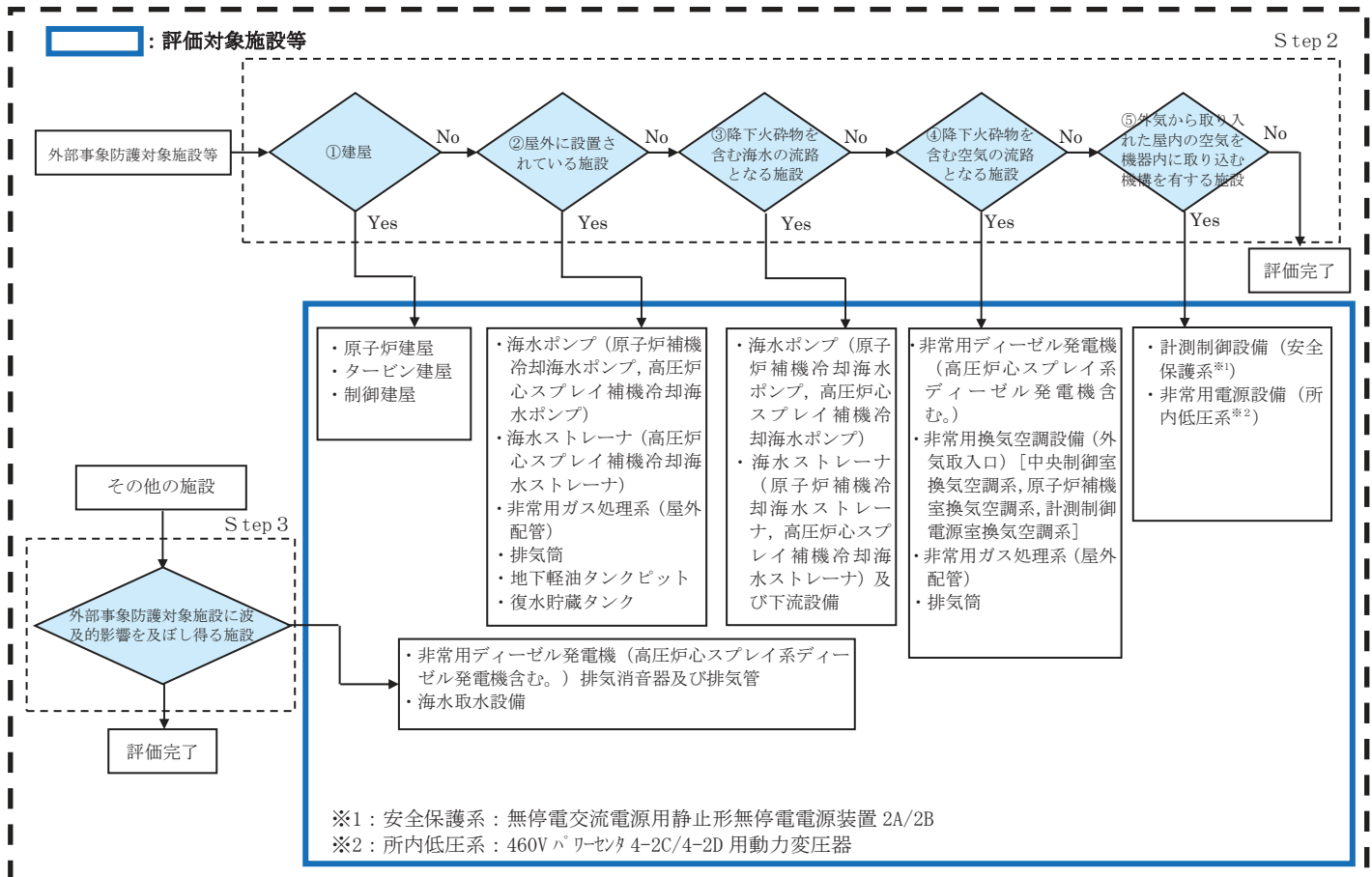


図 3.3-2 評価対象施設等の抽出フロー

表 3.3-1 評価対象施設等の抽出結果

	設備区分	評価対象施設等
外部事象防護対象施設等	建屋	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋 ・タービン建屋 ・制御建屋
	屋外に設置されている施設	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ， 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ） ・海水ストレーナ（高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ） ・非常用ガス処理系（屋外配管） ・排気筒 ・復水貯蔵タンク ・地下軽油タンクピット
	降下火砕物を含む海水の流路となる施設	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ， 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ） ・海水ストレーナ（原子炉補機冷却海水ストレーナ， 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ）及び下流設備
	降下火砕物を含む空気の流路となる施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。） ・非常用換気空調設備（中央制御室換気空調系， 原子炉補機室換気空調系， 計測制御電源室換気空調系） ・非常用ガス処理系（屋外配管） ・排気筒
	外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設	<ul style="list-style-type: none"> ・計測制御設備（安全保護系） ・非常用電源設備（所内低圧系）
外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。）排気消音器及び排気管 ・海水取水設備（除塵装置） 	

表 3.3-2 評価対象施設等の抽出結果 (1/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	定義	重要度分類指針	機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点 ^{※1}		設置場所 ^{※2}	評価対象施設等	備考				
					STEP1	STEP2							
					①	②				③	④	⑤	
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ンダリ機能 2) 過剰反応度の印加防止機能 3) 炉心形状の維持機能	構築物、系統又は機器 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く。)	原子炉圧力容器	○	×	×	×	×	R	-		
				原子炉再循環ポンプ	○	×	×	×	×	×	R	-	
				配管、弁	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				原子炉圧力容器バウンダリ隔離弁	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				制御棒カプリング	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				制御棒駆動機構カプリング	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				炉心シュラウド	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				シュラウドサポート	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				上部格子板	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				炉心支持板	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				燃料支持金具	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				制御棒案内管	○	×	×	×	×	×	×	R	-
				制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	×	×	×	R	-
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ン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	原子炉停止系の制御棒及び制御棒駆動系(スクラム機能)	構築物、系統又は機器	○	×	×	×	×	×	R	-		
			原子炉圧力容器	○	×	×	×	×	×	R	-		
			原子炉再循環ポンプ	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			配管、弁	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			原子炉圧力容器バウンダリ隔離弁	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			制御棒カプリング	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			制御棒駆動機構カプリング	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			炉心シュラウド	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			シュラウドサポート	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			上部格子板	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			炉心支持板	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			燃料支持金具	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
			制御棒案内管	○	×	×	×	×	×	×	R	-	
制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
燃料集合体(上部タイププレート)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
燃料集合体(下部タイププレート)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
燃料集合体(スベーサ)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
直接関連系(燃料集合体)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
制御棒	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
制御棒案内管	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
制御棒駆動機構	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
制御棒駆動機構カプリング	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
直接関連系(制御棒駆動水圧系)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
制御棒	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
制御棒カプリング	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
直接関連系(制御棒駆動水圧系)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
ぼう酸水注入系(ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁、注入配管及び弁)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				
主蒸気逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	○	×	×	×	×	×	×	R	-				

※1 : 評価対象施設等の抽出の観点 : STEP1=外部事象防護対象施設、①=建屋、②=屋外に設置されている施設、③=降下火砕物を含む海水の流路となる施設、④=降下火砕物を含む空気の流路となる施設、⑤=外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設、STEP3=外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設
 ※2 : R=原子炉建屋、T=タービン建屋、L0=地下壓タンクピット、D=固体廃棄物貯蔵所、HB=補助ボイラー建屋、TSC=緊急時対策所

○：Yes ×：No -：該当せず

表 3.3-2 評価対象施設等の抽出結果 (2 / 7)

分類	定義	重要度分類指針	機能	構造物、系統又は機器	抽出の観点 ^{※1}					設置場所 ^{※2}	評価対象施設等	備考
					STEP1	STEP2						
						①	②	③	④				⑤
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、原子炉冷卻材圧力バウンス防止、敷地周囲の公衆への過度の放射線の影響を防止する構造物、系統及び機器	4) 原子炉停止後の除熱機能	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	残留熱除去系 (ポンプ、熱交換器、原子炉停止時冷却モードのルートとなる配管及び弁)	○	×	×	×	×	R	-
					直接関連系 (残留熱除去系)	○	×	×	×	×	R	-
					原子炉隔離時冷却系 (ポンプ、サブプレッションチェンバ、タービン、サブプレッションチェンバから注水先までの配管、弁)	○	×	×	×	×	R	-
					タービンへの蒸気供給配管、弁	○	×	×	×	×	R	-
					ポンプミニムムフローラインの配管、弁	○	×	×	×	×	R	-
					サブプレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	×	R	-
					復水貯蔵タンク	○	×	○	×	×	屋外	○
					ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁	○	×	×	×	×	R	-
					ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁	○	×	×	×	×	R	-
					潤滑油冷却器及びその冷却器までの冷却水供給配管	○	×	×	×	×	R	-
高圧炉心スプレイス (ポンプ、サブプレッションチェンバ、サブプレッションチェンバからスプレイス先までの配管、弁、スプレイスパーージャ)	○	×	×	×	×	R	-					
ポンプミニムムフローラインの配管、弁	○	×	×	×	×	R	-					
サブプレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	×	R	-					
直接関連系 (高圧炉心スプレイス)	○	×	○	×	×	屋外	○					
主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能)	○	×	×	×	×	R	-					
原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	○	×	×	×	×	R	-					
駆動用弁素源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	×	R	-					
自動減圧系 (手動逃がし機能)	○	×	×	×	×	R	-					
原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	○	×	×	×	×	R	-					
駆動用弁素源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	×	R	-					
直接関連系 (自動減圧系 (手動逃がし機能))	○	×	×	×	×	R	-					
原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	○	×	×	×	×	R	-					
駆動用弁素源 (アキユムレータ、アキユムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁)	○	×	×	×	×	R	-					

※1：評価対象施設等の抽出の観点：STEP1＝外部事象防護対象施設、①＝建屋、②＝屋外に設置されている施設、③＝降下火砕物を含む海水の流路となる施設、④＝降下火砕物を含む空気の流路となる施設、⑤＝外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設、STEP3＝外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

※2：R＝原子炉建屋、C＝制御建屋、T＝タービン建屋、L0＝地下掘削タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所

○：Yes ×：No -：該当せず※3

表 3.3-2 評価対象施設等の抽出結果 (5 / 7)

分類	定義	重要度分類指針	機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点※1				設置場所※2	評価対象施設等	備考		
					STEP1	STEP2						STEP3	
						①	②	③					④	⑤
MS-1	2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器		2) 安全上特に重要な関連機能	非常用内電源系、制御室及びその遮へい、非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流水源系 (いずれも、MS-1 関連のもの)	構築物、系統又は機器	○	×	×	×	C	-		
					中央制御室及び中央制御室遮へい	○	×	×	×	C	-	非常用換気空調設備 (外気取入口)	
					中央制御室換気空調系 (放射線防護機能及び有毒ガス防護機能) (再循環送風機、再循環フィルタ装置、空気調和装置、送風機、排風機、ダクト及びダンパ)	○	×	×	○	×	C	-	
					原子炉補機冷却水系 (ポンプ、熱交換器、非常用系負荷冷却ライン配管、弁 (MS-1 関連))	○	×	×	×	R	-		
					直接関連系 (原子炉補機冷却水系)	○	×	×	×	R	-		
					高圧炉心スプレイ補機冷却水系 (ポンプ、熱交換器、配管、弁)	○	×	×	×	R	-		
					直接関連系 (高圧炉心スプレイ補機冷却水系)	○	×	×	×	R	-		
					原子炉補機冷却水系 (ポンプ、配管、弁、ストレーナ (MS-1 関連))	○	×	○	×	R, 屋外	○	原子炉補機冷却海水ポンプ	
					直接関連系 (原子炉補機冷却水系)	○	×	×	×	R	-	原子炉補機冷却海水ストレーナ	
					取水路 (屋外トレント含む)	○	×	×	×	屋外	○	海水取水設備 (除塵装置) (補修の実施により対応)	
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損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計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されてはいないものは除く。)	非常用内電源系、制御室及びその遮へい、非常用換気空調系、非常用補機冷却水系、直流水源系 (いずれも、MS-1 関連のもの)	○	×	×	×	×	R, 屋外	○	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ	
				高圧炉心スプレイ補機冷却水系 (ポンプ、配管、弁、ストレーナ)	○	×	○	×	R, 屋外	○	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ		
				直接関連系 (高圧炉心スプレイ補機冷却水系)	○	×	○	×	R, 屋外	○	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ		
				取水路 (屋外トレント含む)	○	×	×	×	屋外	○	海水取水設備 (除塵装置) (補修の実施により対応)		
				直流電源設備 (蓄電池、蓄電池から非常用負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連))	○	×	×	×	R, C	-	関連設備として非常用換気空調設備 (計測制御電源室換気空調系) を抽出		
				計測制御用電源設備 (蓄電池から非常用計測制御装置までの配電設備及び電路 (MS-1 関連))	○	×	×	○	×	R, C	○		
				原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)	○	×	×	×	R	-			
				主蒸気系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)	○	×	×	×	R, T	-			
				原子炉隔離時冷却系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分でタービン止め弁まで)	○	×	×	×	R	-			

※1：評価対象施設等の抽出の観点：STEP1=外部事象防護対象施設、①=建屋、②=屋外に設置されている施設、③=降下火砕物を含む海水の流路となる施設、④=降下火砕物を含む空気の流路となる施設、⑤=外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設、STEP3=外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設
 ※2：R=原子炉建屋、C=制御建屋、T=タービン建屋、L0=地下圧油タンクピット、D=固体廃棄物貯蔵所、IB=補助ボイラー建屋、TSC=緊急時対策所

○：Yes ×：No -：該当せず※3

表 3.3-2 評価対象施設等の抽出結果 (6/7)

分類	定義	機能	構造物, 系統又は機器	抽出の観点※1							設置場所※2	評価対象施設等	備考	
				STEP1	STEP2					STEP3				
					①	②	③	④	⑤					
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損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造物, 系統及び機器	2) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されているものであつて、放射性物質を貯蔵する機能	構造物, 系統又は機器 気体廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの), 使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	構築物, 系統又は機器 気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホールドアップ装置) 使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む) 新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能) (新燃料貯蔵ラック)	○	○	○	○	○	○	○	○	-	
		3) 燃料を安全に取り扱う機能	燃料取扱設備	原子炉建屋クレーン 直接関連系 (燃料取扱設備)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
MS-2	2) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであつて、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構造物, 系統及び機器	1) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	逃がし安全弁 (吹き止まり機能) に関連する部分	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)	○	○	○	○	○	○	○	○	-	
		1) 燃料プールの補給機能	非常用補給水系	残留熱除去系 (ポンプ, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバ内のストレーナから燃料プールまでの配管, 弁) 直接関連系 (残留熱除去系) ポンプミニマムフローラインの配管, 弁 サブプレッションチェンバ内のストレーナ	○	○	○	○	○	○	○	○	-	
MS-2	1) PS-2 の構造物, 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造物, 系統及び機器	放射線気体廃棄物処理系の隔離弁, 排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	放射線気体廃棄物処理系の隔離弁 (非非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	気体廃棄物処理系の隔離弁 排気筒	○	○	○	○	○	○	○	○	-	
		2) 放射性物質放出の防止機能	燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系	原子炉建屋 (原子炉建屋原子炉棟 (ブローアウトパネル付き)) 直接関連系 (原子炉建屋原子炉棟) 非常用ガス処理系 (乾燥装置, 排風機, フィルタ装置, 原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒までの配管, 弁) 直接関連系 (非常用ガス処理系) 乾燥装置 (乾燥機能部分)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-

※1：評価対象施設等の抽出の観点：STEP1=外部事象防護対象施設, ①=建屋, ②=屋外に設置されている施設, ③=降下火砕物を含む海水的の流路となる施設, ④=降下火砕物を含む空気の流路となる施設, ⑤=外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設, STEP3=外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

※2：R=原子炉建屋, T=制御建屋, C=制御建屋, L0=地下貯蔵タンクピット, D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策所

○：Yes ×：No -：該当せず※3

表 3.3-2 評価対象施設等の抽出結果 (7/7)

分類	定義	重要度分類指針	機能	構造物、系統又は機器	抽出の観点※1							設置場所※2	評価対象施設等	備考
					STEP1	STEP2			STEP3					
						①	②	③		④	⑤			
MS-2	2) 異常状態への対応上特に重要な構造物、系統及び機器	1) 事故時のプラント状態の把握機能	構造物、系統又は機器	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子束 (起動領域モニタ) ・原子炉スクラム用電磁接触器の状態制御機位置 ・原子炉水位 (広帯域、燃料域) ・原子炉圧力 ・原子炉格納容器圧力 ・サブプレッションプール水温度 ・格納容器内雰囲気モニタ (放射線レベル) 【低温停止への移行】 <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉圧力 ・原子炉水位 (広帯域) 【ドライヴェルズブレイ】 <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉水位 (広帯域、燃料域) ・原子炉格納容器圧力 【サブプレッションチェンバ冷却】 <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉水位 (広帯域、燃料域) ・サブプレッションプール水温度 【可燃性ガス濃度制御系起動】 <ul style="list-style-type: none"> ・格納容器内雰囲気モニタ (水素・酸素濃度) (対象外)	○	×	×	×	×	×	R,C	-		
					2) 異常状態の緩和機能	事故時監視器の一部	○	×	×	×	×	×	×	R,C
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構造物、系統及び機器	3) 制御室外からの安全停止機能	構造物、系統又は機器	BWR には対象機能なし 制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの) 原子力発電所緊急時対策所、燃料採取系、通信連絡設備、放射能監視設備、事故時監視計器の一部、消火系、安全避難通路、非常用照明	○	×	×	×	×	×	C	-		
					1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	放射線監視設備 (気体廃棄物処理設備排気放射線モニタ)	○	×	×	×	×	×	T	-
		外殻となる施設			2号制御建屋	○	×	×	×	×	×	○	外殻施設	
					2号タービン建屋	○	×	×	×	×	×	○	外殻施設	
					地下軽油タンクピット	○	×	×	×	×	×	○	外殻施設	

※1：評価対象施設等の抽出の観点：STEP1＝外部事象防護対象施設、①＝建屋、②＝屋外に設置されている施設、③＝降下火砕物を含む海水の流路となる施設、④＝降下火砕物を含む空気の流路となる施設、⑤＝外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設、STEP3＝外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

※2：R＝原子炉建屋、C＝制御建屋、T＝タービン建屋、L0＝地下軽油タンクピット、D＝固体廃棄物貯蔵所、HB＝補助ボイラー建屋、TSC＝緊急時対策所

非常用換気空調設備(外気取入口)

図 3.3-3 評価対象施設等の設置場所 (2 / 3)

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

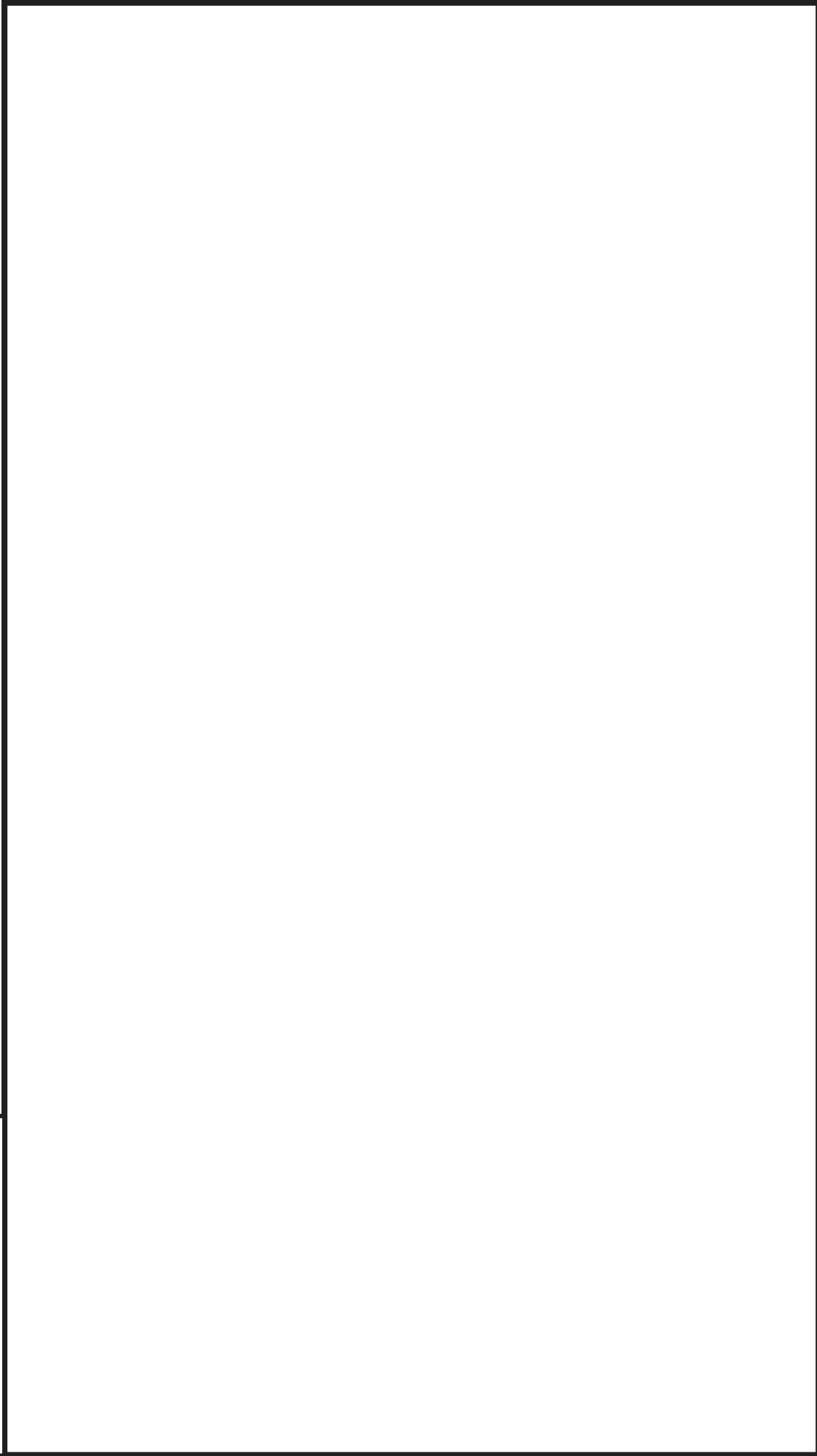


図 3.3-3 評価対象施設等の設置場所 (3 / 3)

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

3.4 降下火砕物による影響の選定

降下火砕物の特徴及び評価対象施設等の構造や設置状況等を考慮して、降下火砕物が直接及ぼす影響（以下「直接的影響」という。）とそれ以外の影響（以下「間接的影響」という。）を選定する。

3.4.1 降下火砕物の特徴

各種文献の調査結果より、降下火砕物は以下の特徴を有する。

- (1) 火山ガラス片、鉱物結晶片から成る。ただし、火山ガラス片は砂よりもろく硬度は低く、主要な鉱物結晶片の硬度は砂と同等、又はそれ以下である。
- (2) 硫酸等を含む腐食性のガス（以下「腐食性ガス」という。）が付着している。ただし、金属腐食研究の結果より、直ちに金属腐食を生じさせることはない。
- (3) 水に濡れると導電性を生じる。
- (4) 湿った降下火砕物は乾燥すると固結する。
- (5) 降下火砕物粒子の融点は約 1,000℃であり、一般的な砂に比べ低い。

（補足資料－2，3，8，19）

3.4.2 直接的影響

降下火砕物の特徴から直接的影響の要因となる荷重，閉塞，摩耗，腐食，大気汚染，水質汚染及び絶縁影響を抽出し，評価対象施設等の構造や設置状況等を考慮して直接的な影響因子を以下のとおり選定する。なお，女川原子力発電所2号炉で想定される降下火砕物の条件を考慮し，表 3.4.2-1 に示す項目について評価を実施する。

(1) 直接的影響の要因の選定と評価手法

(a) 荷重

「荷重」について考慮すべき影響因子は，建屋及び屋外設備の上に堆積し静的な負荷を与える「構造物への静的負荷」，並びに建屋及び屋外設備に対し降灰時に衝撃を与える「粒子の衝突」である。

粒子の衝突による影響については，「竜巻影響評価について」に包絡される。

(b) 閉塞

「閉塞」について考慮すべき影響因子は，降下火砕物を含む海水が流路の狭隘部等を閉塞させる「水循環系の閉塞」，及び降下火砕物を含む空気が機器の狭隘部や換気系の流路を閉塞させる「換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞）」である。

(c) 摩耗

「摩耗」について考慮すべき影響因子は，降下火砕物を含む海水が流路に接触することにより配管等を摩耗させる「水循環系の内部における摩耗」，並びに降下火砕物を含む空気が動的機器の摺動部に侵入し摩耗させる「換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（摩耗）」である。

(d) 腐食

「腐食」について考慮すべき影響因子は、降下火砕物に付着した腐食性ガスにより建屋及び屋外施設の外面を腐食させる「構築物への化学的影響(腐食)」、換気系、電気系及び計測制御系において降下火砕物を含む空気の流路等を腐食させる「換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響(腐食)」、及びに海水に溶出した腐食性成分により海水管等を腐食させる「水循環系の化学的影響(腐食)」である。

(e) 大気汚染

「大気汚染」について考慮すべき影響因子は、降下火砕物により汚染された発電所周辺の大気が運転員の常駐する中央制御室内に侵入することによる居住性の劣化、並びに降下火砕物の除去、屋外設備の点検等、屋外における作業環境を劣化させる「発電所周辺の大気汚染」である。

(f) 水質汚染

「水質汚染」については、外部から供給される水源である、河川水に降下火砕物が混入することによる「給水の汚染」が考えられるが、発電所では給水処理設備により水処理した給水を使用しており、また給水は水質管理を行っていることから、安全施設の安全機能に影響しない。

(補足資料-14)

(g) 絶縁影響

「絶縁影響」について考慮すべき影響因子は、湿った降下火砕物が電気系及び計測制御系絶縁部に導電性を生じさせることによる盤の「絶縁低下」である。

表 3.4.2-1 降下火砕物が設備に影響を与える可能性のある因子

影響を与える可能性のある因子	評価方法	詳細検討すべきもの
構造物への静的負荷	屋外の構築物において降下火砕物堆積荷重による影響を評価する。なお、荷重条件は水を含んだ場合の負荷が大きくなるため、降雨条件及び積雪との重畳を考慮する。	○
構造物への化学的影響（腐食）	屋外設備は外装の塗装等や金属材料の使用によって、短期での腐食による影響が小さいことを評価する。	○
粒子の衝突	降下火砕物は微小な粒子であり、「竜巻影響評価について」で設定している設計飛来物の衝突に包絡されることを確認していることから、詳細評価は不要。	-
水循環系の閉塞	海水中に漂う降下火砕物の狭隘部等における閉塞の影響を評価する。また、必要に応じて、海水を供給している下流の設備への影響についても考慮する。	○
水循環系の内部における摩擦	海水中に漂う降下火砕物による設備内部の摩擦の影響を評価する。また、必要に応じて、海水を供給している下流の設備への影響についても考慮する。	○
水循環系の化学的影響（腐食）	耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって、腐食による影響がないことを評価する。	○
換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（摩擦・閉塞）	屋外設備等において影響を考慮すべき要因である。なお、必要に応じて、換気系の給気を供給している範囲への影響についても考慮する。	○
換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）	屋外設備等において影響を考慮すべき要因である。なお、必要に応じて、換気系の給気を供給している範囲への影響についても考慮する。	○
発電所周辺の大気汚染	運転員が常時滞在する中央制御室における居住性を評価する。	○
水質汚染	発電所では給水処理設備により水処理した給水を使用しており、降下火砕物の影響を受ける可能性のある淡水を直接給水として使用していない、また、給水は水質管理を行っており、給水の汚染が設備に影響を与える可能性はない（補足資料-14）。	-
絶縁低下	屋内の施設であっても、屋内の空気を取り込み機構を有する電源盤については、影響がないことを評価する。	○

3.4.3 間接的影響

降下火砕物によって原子力発電所に間接的な影響を及ぼす因子は、湿った降下火砕物が送電線の碍子、開閉所の充電露出部等に付着し絶縁低下を生じさせることによる広範囲にわたる送電網の損傷に伴う「外部電源喪失」、並びに降下火砕物が道路に堆積することによる交通の途絶に伴う「アクセス制限」である。

3.4.4 評価対象施設等に対する影響因子の想定

評価すべき直接的影響の要因については、その内容によりすべての評価対象施設等に対して評価する必要がない項目もあることから、各評価対象施設等と評価すべき直接的影響の要因について整理し、評価対象施設等の特性を踏まえて必要な評価項目を表 3.4.4-1 のとおり選定した。

3.5 設計荷重の設定

設計荷重は、以下のとおり設定する。

(1) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重

評価対象施設等に作用する荷重として、自重等の常時作用する荷重、内圧等の運転時荷重であり、降下火砕物との荷重とを適切に組み合わせる。

(2) 設計基準事故時荷重

評価対象施設等は、降下火砕物によって安全機能を損なわない設計とするため、設計基準事故とは独立事象である。

また、評価対象施設等のうち設計基準事故時荷重が生じる屋外施設としては、屋外設備の動的機器である原子炉補機冷却海水ポンプ、及び高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても、原子炉補機冷却海水ポンプ、及び高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプに有意な機械的荷重は発生しないことから、設計基準事故時に生じる荷重の組合せは考慮しない。

(3) その他の自然現象の影響を考慮した荷重の組合せ

降下火砕物と組合せを考慮すべき火山以外の自然現象は、荷重の影響において風（台風）及び積雪であり、降下火砕物との荷重と適切に組み合わせる。

（補足資料-19）

3.6 降下火砕物に対する設計

直接的影響については、評価対象施設等の構造や設置状況等（形状、機能、外気吸入や海水通水の有無等）を考慮し、想定される各影響因子に対して、影響を受ける各評価対象施設等が安全機能を損なわない以下の設計とする。評価が必要となる設備については、表 3.4.4-1 の影響因子を踏まえて評価を実施した。評価結果を表 3.6.1-1 に示す。（個別評価-1～9 参照）

3.6.1 降下火砕物による荷重に対する設計

(1) 構造物への静的負荷

評価対象施設等のうち、降下火砕物が堆積する建屋及び屋外施設は、以下の施設である。

a. 建屋

原子炉建屋，タービン建屋，制御建屋

b. 屋外に設置されている施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）

ンプ)、海水ストレーナ(高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ)、復水貯蔵タンク、地下軽油タンクピット

- c. 降下火砕物の影響を受ける施設であって、その停止等により、上位の安全重要度の施設の運転に影響を及ぼす可能性のある屋外の施設

非常用ディーゼル発電機(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。)排気消音器及び排気管

当該施設の許容荷重が、降下火砕物による荷重に対して安全裕度を有することにより、構造健全性を失わず安全機能を損なわない設計とする。若しくは、降下火砕物が堆積しにくい又は直接堆積しない構造とすることで、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

評価対象施設等の建屋においては、建築基準法における一般地域の積雪の荷重の考え方に準拠し、降下火砕物の除去を適切に行うことから、降下火砕物による荷重を短期に生じる荷重として扱う。また、降下火砕物による荷重と他の荷重を組み合わせた状態に対する許容限界は次のとおりとする。

- ・原子炉建屋、タービン建屋、制御建屋

原子炉建屋、タービン建屋及び制御建屋は、各建屋の屋根スラブにおける建築基準法の短期許容応力度を許容限界とする。

- ・建屋を除く評価対象施設等

許容応力を「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987(日本電気協会)」等に準拠する。

(2) 粒子の衝突

評価対象施設等のうち、建屋及び屋外設備は、「粒子の衝突」に対して、「1.8.2 竜巻防護に関する基本方針」に基づく設計によって、外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

3.6.2 降下火砕物による荷重以外に対する設計方針

降下火砕物による荷重以外の影響は、構造物への化学的影響(腐食)、水循環系の閉塞、内部における摩耗及び化学的影響(腐食)、換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響(閉塞)及び化学的影響(腐食)等により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計については、「3.6.3 外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計方針」に示す。

(1) 構造物への化学的影響(腐食)

評価対象施設等のうち、構造物への化学的影響(腐食)を考慮すべき施設は、降下火砕物の直接的な付着による影響が考えられる以下の施設である。

a. 建屋

原子炉建屋、タービン建屋、制御建屋

b. 屋外に設置されている施設

海水ポンプ(原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ)、海水ストレーナ(高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ)、非常用ガス処理系(屋外配管)、排気筒、復水貯蔵タンク、地下軽油タンクピット

- c. 降下火砕物の影響を受ける施設であって、その停止等により、上位の安全重要度の施設の運転に影響を及ぼす可能性のある屋外の施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレー系ディーゼル発電機を含む。）
排気消音器及び排気管

金属腐食研究の結果より、降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食を生じないが、外装の塗装等によって短期での腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

- (2) 水循環系の閉塞、内部における摩耗及び化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、水循環系の閉塞、内部における摩耗及び化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、降下火砕物を含む海水の流路となる以下の施設である。

- a. 降下火砕物を含む海水の流路となる施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）、海水ストレーナ（原子炉補機冷却海水ストレーナ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ストレーナ）及び下流設備

- b. 降下火砕物の影響を受ける施設であって、その停止等により、上位の安全重要度の施設の運転に影響を及ぼす可能性のある屋外の施設

海水取水設備（除塵装置）

降下火砕物は粘土質ではないことから水中で固まり閉塞することはないが、当該施設については、降下火砕物の粒径に対し十分な流路幅を設けることにより、海水の流路となる施設が閉塞しない設計とする。

内部における摩耗については、主要な降下火砕物は砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから、摩耗による影響は小さい。また当該施設については、定期的な内部点検及び日常保守管理により、状況に応じて補修が可能であり、摩耗により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

化学的影響（腐食）については、金属腐食研究の結果より、降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないが、耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって、腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお、長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

- (3) 換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）及び化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）及び化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、以下の施設である。

- a. 屋外に設置されている施設

海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）

機械的影響（閉塞）については、海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）の電動機本体は外気と遮断された全閉構造であり、また、原子炉補機冷却海水ポンプ電動機の空気冷却器の冷却管内径及び高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプの冷却流路は降下火砕物粒

径以上の幅を設ける構造とすることにより、機械的影響（閉塞）により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

化学的影響（腐食）については、金属腐食研究の結果より、降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないが、耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって、腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なうことのない設計とする。なお、長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(4) 絶縁低下及び化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、絶縁低下及び化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、電気系及び計測制御系のうち外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する以下の施設である。

a. 外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する施設

計測制御設備（安全保護系）、非常用電源設備（所内低圧系）

当該施設の設置場所は原子炉補機室換気空調系及び計測制御電源室換気空調系にて空調管理されており、本換気空調系の外気取入口にはバグフィルタを設置していることから、仮に室内に侵入した場合でも降下火砕物は微量であり、粒径は極めて細かな粒子である。

また、中央制御室換気空調系については、外気取入ダンパを閉止し閉回路循環運転を行うことにより侵入を阻止することも可能である。

バグフィルタの設置により降下火砕物の侵入に対する高い防護性能を有することにより、降下火砕物の付着に伴う絶縁低下及び化学的影響（腐食）による影響を防止し、計測制御設備（安全保護系）、非常用電源設備（所内低圧系）の安全機能を損なわない設計とする。

3.6.3 外気取入口からの降下火砕物の侵入に対する設計

外気取入口からの降下火砕物の侵入に対して、以下のとおり安全機能を損なわない設計とする。

(1) 機械的影響（閉塞）

評価対象施設等のうち、外気取入口からの降下火砕物の侵入による機械的影響（閉塞）を考慮すべき施設は、降下火砕物を含む空気の流路となる以下の施設である。

a. 降下火砕物を含む空気の流路となる施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機、非常用ディーゼル発電機含む。）、非常用換気空調設備（外気取入口）、非常用ガス処理系（屋外配管）、排気筒

排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）は、降下火砕物が侵入した場合でも、排気筒の構造から排気流路が閉塞しない設計とすることにより、降下火砕物の影響に対して機能を損なわない設計とする。

また、外気を取り入れる非常用換気空調設備（外気取入口）の空気の流路にそれぞれフィルタを設置することにより、フィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とし、さらに降下火砕物がフィルタに付着した場合でも取替又は清掃が可能な構造とすることで、降下火砕物により閉塞しない設計とする。

ディーゼル発電機機関は、フィルタを通過した小さな粒径の降下火砕物が

侵入した場合でも、降下火砕物により閉塞しない設計とする。

(2) 機械的影響（摩耗）

評価対象施設等のうち、外気取入口からの降下火砕物の侵入による機械的影響（摩耗）を考慮すべき施設は、外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構及び摺動部を有する以下の施設である。

a. 降下火砕物を含む空気の流路となる施設のうち摺動部を有する施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）

降下火砕物は砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから、摩耗の影響は小さい。

また、仮にディーゼル発電機機関の内部に降下火砕物が侵入した場合でも耐摩耗性のある材料を使用することで、摩耗により非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）の安全機能を損なわない設計とする。

外気を取り入れる非常用換気空調設備（外気取入口）にバグフィルタを設置することにより、フィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とし、摩耗により非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）の安全機能を損なわない設計とする。

(3) 化学的影響（腐食）

評価対象施設等のうち、外気取入口からの降下火砕物の侵入による化学的影響（腐食）を考慮すべき施設は、降下火砕物を含む空気の流路となる以下の施設である。

a. 降下火砕物を含む空気の流路となる施設

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機を含む。）、

非常用換気空調設備（外気取入口）、非常用ガス処理系（屋外配管）、排気筒

金属腐食研究の結果より、降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないが、塗装の実施等によって、腐食により外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(4) 大気汚染（発電所周辺の大気汚染）

大気汚染を考慮すべき中央制御室は、降下火砕物により汚染された発電所周辺の大気が、中央制御室換気空調系の外気取入口を通じて中央制御室に侵入しないようバグフィルタを設置することにより、降下火砕物が外気取入口に到達した場合であってもフィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とする。

また、中央制御室換気空調系については、外気取入ダンパの閉止及び閉回路循環運転を可能とすることにより、中央制御室内への降下火砕物の侵入を防止する。さらに外気取入遮断時において、酸素濃度及び二酸化炭素濃度の影響評価を実施し、室内の居住性を確保する設計とする。

3.6.4 間接的影響に対する設計方針

女川原子力発電所2号炉の非常用所内交流電源設備は、非常用ディーゼル発電機（非常用ディーゼル発電機2台/号炉、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機1台/号炉）とそれぞれに必要な耐震Sクラスの燃料ディタンク（非常用ディーゼル

発電機用：20m³×2基，高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用：14m³×1基）を有している。さらに，軽油タンク（110m³×3基×2系列）を有している。

これらにより，7日間の外部電源喪失に対して，また，原子力発電所外での影響（長期間の外部電源の喪失及び交通の途絶）を考慮した場合においても，原子炉の停止並びに停止後の原子炉及び使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が継続できる設計とする。

（補足資料－18）

表 3.4.4-1 降下火砕物が影響を与える評価と影響因子の組合せ

影響因子 評価対象施設等	構造物への 静的負荷	構造物への 化学的影響 (腐食)	水循環系の 閉塞・摩耗	水循環系の 化学的影響 (腐食)	換気系、電気系及び 計測制御系に対する 機械的影響 (閉塞・摩耗)	換気系、電気系及び 計測制御系に対する 化学的影響 (腐食)	発電所周辺 の大気汚染	絶縁低下
原子炉建屋、制御建屋、タービン建屋及び地下軽油タンクピット	●	●	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)
海水ポンプ (原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイスプレイ補機冷却海水ポンプ)	●	●	● (ポンプ)	● (ポンプ)	● (モータ)	● (モータ)	—(③)	—(③)
海水ストレーナ (原子炉補機冷却海水ストレーナ) 及び下流設備	—(①)	—(①)	●	●	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)
海水ストレーナ (高圧炉心スプレイスプレイ補機冷却海水ストレーナ) 及び下流設備	●	●	●	●	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)
海水取水設備 (除塵装置)	—(③)	—(②)	●	●	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)
非常用換気空調設備	—(①)	—(②)	—(③)	—(③)	●	●	●	—(③)
非常用ディーゼル発電機 (高圧炉心スプレイスプレイ系ディーゼル発電機含む)	—(①)	—(①)	—(③)	—(③)	●	●	—(③)	—(③)
	●	●	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)
計測制御設備 (安全保護系) 及び非常用電源設備 (所内低圧系)	—(①)	—(①)	—(③)	—(③)	—(③)	●	—(③)	●
復水貯蔵タンク	●	●	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)	—(③)
排気筒及び非常用ガス処理系 (屋外配管)	—(①)	●	—(③)	—(③)	●	●	—(③)	—(③)

【評価除外理由】

- 凡例 ●：詳細な評価が必要な設備
- ：評価対象外()内数値は理由
- ①：降下火砕物 (静的荷重等) の影響を受け難い構造 (屋内設備の場合含む)
- ②：腐食に対して、機能に有意な影響を受け難い
- ③：影響因子と直接関連しない

※1：非常用ディーゼル発電機 (高圧炉心スプレイスプレイ系ディーゼル発電機含む。)

※2：非常用ディーゼル発電機 (高圧炉心スプレイスプレイ系ディーゼル発電機含む。) 排気消音器及び排気管

表 3.6.1-1 降下火砕物による直接的影響の評価結果 (1 / 2)

評価対象施設等	確認結果	個別評価
原子炉建屋, 制御建屋, タービン建屋及び地下軽油タンクピット	<ul style="list-style-type: none"> 考慮する堆積荷重は $2,547\text{N/m}^2$ であり, 各施設の許容堆積荷重はそれを十分に上回っていることから, 安全性への影響はない。 外壁塗装が施されていること, 又はコンクリート構造であることから, 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。 	1
海水ポンプ (原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイング補機冷却海水ポンプ)	<ul style="list-style-type: none"> 海水ポンプに発生する応力は許容値に対して十分な裕度を有しており, 機器の機能に影響を及ぼすことはない。 海水ポンプ及びモーターは外面塗装が施されており, 降下火砕物による短期の腐食により, 機器の機能に影響を及ぼすことはない。 海水ポンプ流水路の狭隘部は降下火砕物の粒径より大きく, 閉塞には至らない。軸受部は異物逃がし溝を設けているため, 降下火砕物による閉塞には至らない。また, 降下火砕物は破砕し易く, 摩擦による影響は小さいことから, 降下火砕物による閉塞・摩擦により, 機器の機能に影響を及ぼすことはない。 海水ポンプ内面は塗装が施されており, 降下火砕物による短期の腐食により, 機器の機能に影響を及ぼすことはない。 海水ポンプモーターは外気を直接内部に取込まない冷却方式であり, モーター内部に降下火砕物の侵入はない。また, 原子炉補機冷却海水ポンプモーターは空気冷却器冷却管があるが, 外気取込口は下向きに設置され, 吸込部には金網が設置されており降下火砕物が侵入し難い構造である。仮に侵入した場合にも, 冷却管内径に対して降下火砕物の粒径は十分小さく閉塞の可能性は低い。したがって, モーター軸受部の摩擦及び空気冷却器冷却管への侵入による摩擦・閉塞により機器の機能に影響を及ぼすことはない。 	2
海水ストレーナ (原子炉補機冷却海水ストレーナ, 高圧炉心スプレイング補機冷却海水ストレーナ) 及び下流設備	<ul style="list-style-type: none"> 降下火砕物の粒径は, 海水ストレーナのフィルタの穴径及び下流設備である熱交換器の伝熱管内径に対して十分小さいこと, また海水ストレーナは差圧管理により切替・洗浄が可能であることから, 降下火砕物による閉塞により, 機器の機能に影響を及ぼすことはない。 降下火砕物は破砕し易く摩擦による影響は小さいことから, 降下火砕物による摩擦により機器の機能に影響を及ぼすことはない。 海水ストレーナ内面はライニングを使用している。また, 下流設備である熱交換器の伝熱管は耐食性の高い材料の使用, 及び管内面の保護被膜により腐食対策を実施しているため, 降下火砕物による短期での腐食により, 機器の機能に影響を及ぼすことはない。 	3

表 3.6.1-1 降下火砕物による直接的影響の評価結果 (2/2)

評価対象施設等	確認結果	個別評価
非常用ディーゼル発電機(高圧炉心スプレイスターゼル発電機含む)	<ul style="list-style-type: none"> 外気取入口は、降下火砕物が侵入し難い構造であり、また、バグフィルタ(粒径約$2\mu\text{m}$に対して80%以上を捕獲する性能)により降下火砕物が捕集されること、また、バグフィルタは必要に応じて、取替え又は清掃することにより除灰が可能であることから、降下火砕物による閉塞により機器の機能に影響を及ぼすことはない。 機関吸気に降下火砕物が侵入した場合でも、シリンドライナー及びピストリング間隙が非常に狭く、降下火砕物が侵入しても閉塞する可能性は小さい。また、降下火砕物は砂と比較して破砕しやすく、硬度は砂と同等又は低いことから、降下火砕物による摩耗の影響は小さい。 金属材料の使用、又は外装塗装が施されていることから、降下火砕物による短期の腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。 	4
非常用換気空調設備	<ul style="list-style-type: none"> 外気取入口には、ルーバ及びバグフィルタ(粒径約$2\mu\text{m}$に対して80%以上を捕獲する性能)が設置されていることから、給気を供給する設備に対して、降下火砕物が与える影響は小さい。また、金属腐食研究の結果から、降下火砕物による短期の腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。 中央制御室換気空調系については、外気取入ダンパを閉止し、再循環運転を行った場合でも、中央制御室の居住性が維持されることを確認した。 	5
海水取水設備(除塵装置)	<ul style="list-style-type: none"> 降下火砕物の粒径は取水設備に設置されているメッシュスクリーン幅に対して十分小さく、取水口を閉塞することはない。また、降下火砕物は破砕し易く、摩耗による影響は小さいことから、降下火砕物による閉塞・摩耗により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。 取水設備(除塵装置)は塗装等の対応を実施しており、降下火砕物による短期での腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。 	6
計測制御設備(安全保護系)及び非常用電源設備(所内低圧系)	<ul style="list-style-type: none"> 計測制御設備(安全保護系)及び非常用電源設備(所内低圧系)が設置されている部屋は、原子炉補機室換気空調系及び計測制御電源室換気空調系にて空調管理されており、外気取入口にはバグフィルタ(粒径約$2\mu\text{m}$に対し80%以上を捕獲する性能)が設置されていることから、降下火砕物が大量に盤内に侵入することの可能性は小さい。また、侵入する降下火砕物は微細なものに限られ、その付着により短絡等が発生させる可能性はない。 	7
復水貯蔵タンク	<ul style="list-style-type: none"> 復水貯蔵タンクに発生する応力は許容値に対して十分な裕度を有しており、健全性に影響を及ぼすことはない。 復水貯蔵タンクは外面塗装が施されているため、降下火砕物による短期の腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。 	8
排気筒及び非常用ガス処理系(屋外配管)	<ul style="list-style-type: none"> 排気筒は常時排気があり、その排気速度は、降下火砕物の自由降下速度を上回っていることから、降下火砕物が排気筒内に侵入することはない。閉塞により機器の機能に影響を及ぼすことはない。 排気筒及び非常用ガス処理系(屋外配管)は金属材料の使用、又は外装塗装が施されており、降下火砕物による短期の腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。 	9

3.7 降下火砕物の除去等の対策

3.7.1 降下火砕物に対応するための運用管理

降下火砕物に備え、手順を整備し、図 3.7.1-1 のフローのとおり段階的に対応することとしている。その体制については地震、津波、火山噴火等の自然災害に対し、保安規定に基づく保安管理体制として整備し、その中で体制の移行基準、活動内容についても明確にする。なお、多くの火山では、噴火前に、震源の浅い火山性地震の頻度が急増し、火山性微動の活動が始まるため、事前に対策準備が可能である。

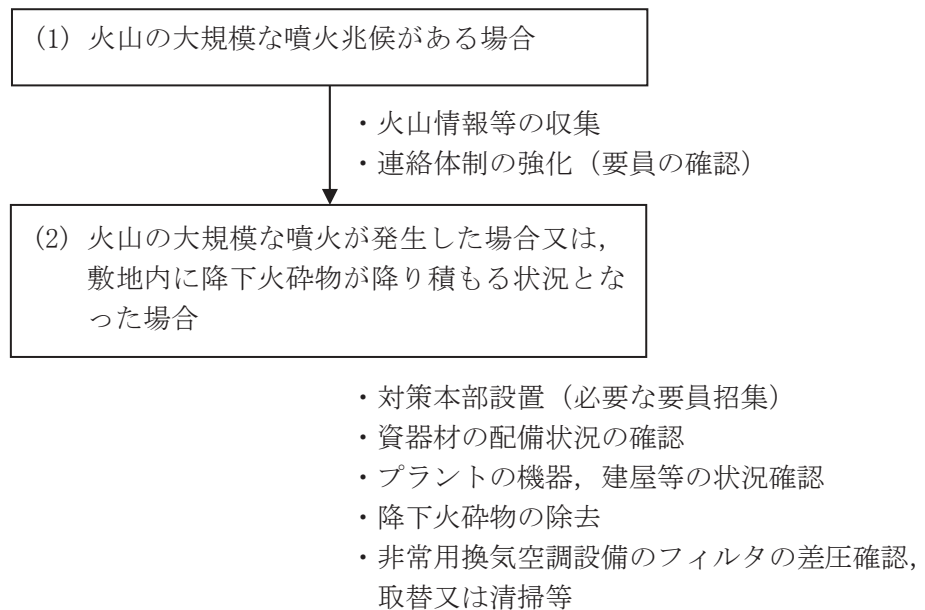


図 3.7.1-1 降下火砕物に対応するための運用管理フロー

(1) 通常時の対応

火山の噴火事象発生に備え、担当箇所は降下火砕物の除去等に使用する資機材等（シャベル、ゴーグル及び防護マスク等）については、定期的に配備状況を確認する。

(2) 火山の大規模な噴火兆候がある場合

担当箇所は、火山情報（火山の位置、噴火規模、風向、降灰予測等）を把握し、連絡体制を強化する。

(3) 火山の大規模な噴火が発生した場合又は、降下火砕物が降り積もる状況となった場合

担当箇所は、火山の大規模な噴火が確認された場合、又は、原子力発電所敷地で降灰が確認された場合に、関係箇所と協議の上、対策本部を設置する。

非常用換気空調設備の取替用フィルタの配備状況を確認するとともに、アクセスルート・屋外廻りの機器・屋外タンク・建屋等の降下火砕物の除去のため、発電所内に保管しているブルドーザ・スコップ・マスク等の資機材の配備状況の確認を行う。

プラントの機器、建屋等の現在の状態(屋外への開口部が開放されていないか)を確認する。

敷地内に降下火砕物が到達した場合には、降灰状況を把握する。

プラント及び屋外廻りの監視を強化し、アクセスルート・屋外廻りの機器・屋外タンク・建屋等の降下火砕物の除去を行うとともに、非常用換気空調設備のフィルタ差圧を確認し、フィルタの取替、清掃等を行う。

降下火砕物により安全機能を有する設備が損傷等により機能が確保できなくなった場合、必要に応じプラントを停止する。

(補足資料-10, 18)

3.7.2 手順

火山に対する防護については、降下火砕物に対する影響評価を行い、安全施設が安全機能を損なわないよう手順を定める。

- (1) 発電所内に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かけ続けられないこと、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に、評価対象施設等に堆積した降下火砕物の除灰を適切に実施する。
- (2) 降灰が確認された場合には、状況に応じて外気取入ダンパの閉止、換気空調設備の停止又は閉回路循環運転により、建屋内への降下火砕物の侵入を防止する手順を定める。
- (3) 降灰が確認された場合には、非常用換気空調設備の外気取入口のバグフィルタについて、バグフィルタ差圧を確認するとともに、状況に応じて取替え又は清掃等を実施する。

4. まとめ

降下火砕物による直接的影響及び間接的影響のすべての項目について評価した結果、降下火砕物による直接的影響及び間接的影響はなく、発電用原子炉施設の安全機能を損なうことはないことを確認した。

降下火砕物の飛来のおそれがある場合は、火山噴火対策を行うための体制を構築し、発電所及び屋外廻りの監視の強化、降下火砕物の除去等を実施する。

建屋等に係る影響評価

降下火砕物による原子炉建屋等への影響について以下のとおり評価した。

1. 評価項目

(1) 構造物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重（降雨の影響含む）により原子炉建屋，制御建屋，タービン建屋及び地下軽油タンクピットの健全性に影響がないことを評価する。なお，堆積荷重は，積雪及び風（台風）の荷重を考慮し，適切に組み合わせる。

(2) 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の構造物への付着や堆積による化学的影響（腐食）により，構造物への影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

- ・堆積量：15cm
- ・密度：1.5g/cm³（湿潤密度）

(2) 積雪条件

- ・積雪量：17cm（石巻地域における年最大積雪深さの平均値）
- ・単位荷重：積雪量1cm当たり20N/m²（建築基準法施行令に基づく積雪の単位荷重）

3. 評価結果

(1) 構造物への静的負荷

設計堆積荷重は以下のとおり。

湿潤状態の降下火砕物の荷重（2,207 N/m²）

+降下火砕物と組み合わせる積雪荷重（340 N/m²）=2,547N/m²

表1に建屋ごとに裕度が最も小さい部位の評価結果を示す。評価の結果，各建屋において，許容堆積荷重は堆積荷重を十分に上回っている。また，地下軽油タンクピットについては，上載荷重として，4,900N/m²を考慮した設計を行っており，上載荷重は設計堆積荷重を十分に上回っていることから，安全性への影響はない。

表1 建屋の堆積荷重概略評価結果

評価対象建屋	対象施設エリア	許容堆積荷重 ^{※1} (N/m ²)	降下火砕物 堆積荷重(N/m ²)	結果
原子炉建屋	屋根スラブ	4,117	2,547	○
制御建屋	屋根スラブ	4,559		○
タービン建屋	屋根スラブ	4,117		○

※1：降下火砕物堆積荷重は短期荷重として評価した。評価においては，許容応力度の比（短期／長期=1.5以上）から，短期では少なくとも長期の1.5倍の荷重が負担できるため，短期荷重として負担できる荷重と長期荷重の差分を許容堆積荷重とした。（許容堆積荷重の算定フローを図1に示す。）

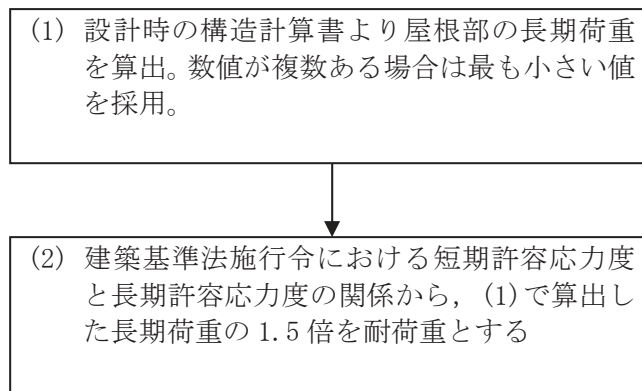


図1 許容堆積荷重算定フロー

(2) 構造物への化学的影響（腐食）

原子炉建屋，制御建屋及びタービン建屋への化学的影響（腐食）については，外壁塗装を施していることから，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。地下軽油タンクピットへの化学的影響（腐食）については，ピット頂版はコンクリート構造物であること，また，ハッチ部については金属材料（ステンレス鋼）を用いていることから，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによる金属腐食の影響を考慮し，外装塗装※を実施することで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。

（補足資料－4，8）

※：ハッチ（ステンレス鋼）部は酸，アルカリなどに水分の加わった強度腐食環境での塗装としてエポキシ樹脂系の塗装を実施

以 上

海水ポンプに係る影響評価

降下火砕物による原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（以下「海水ポンプ」という。）に係る影響評価について以下のとおり評価した。

1. 評価項目

(1) 構造物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重により原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの機能に影響がないことを評価する。なお、堆積荷重は、積雪及び風（台風）の荷重を考慮し、適切に組み合わせる。

a. 原子炉補機冷却海水ポンプ

評価部位は、モータの外扇カバーに降下火砕物が堆積した場合に直接荷重の影響を受ける外扇カバー及び機器の自重及び運転時荷重（ポンプスラスト荷重）を考慮した場合、最も荷重負荷が大きいモータフレームとする。外扇カバー及びモータフレームに生じる応力は、保守的に電動機上面の投影面積の最も大きい外扇カバー全面に均等に降下火砕物が堆積した場合を想定し、その上でモータフレームについては、モータ自重＋運転時荷重（ポンプスラスト荷重）が加わる状態で荷重評価を行う。図1に原子炉補機冷却海水ポンプモータの概要及び降下火砕物の堆積範囲を示す。

b. 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ

評価部位は、雨よけカバーに降下火砕物が堆積した場合に直接荷重の影響を受ける雨よけカバー及び機器の自重及び運転時荷重（ポンプスラスト荷重）を考慮した場合、最も荷重負荷が大きいモータフレームとする。雨よけカバー及びモータフレームに生じる応力は、保守的に電動機上面の投影面積の最も大きい雨よけカバー全面に均等に降下火砕物が堆積した場合を想定し、その上でモータフレームについては、モータ自重＋運転時荷重（ポンプスラスト荷重）が加わる状態で荷重評価を行う。図2に高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプモータの概要及び降下火砕物の堆積範囲を示す。

(2) 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物のポンプ及びモータへの付着や堆積による化学的影響（腐食）により、機器の機能に影響がないことを評価する。

(3) 水循環系の閉塞・摩耗

降下火砕物が混入した海水を海水ポンプにより取水した場合でも、流水部、軸受部等が閉塞し、又は、内部構造物との摩耗により機器の機能に影響がないことを評価する。

(4) 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物が混入した海水を海水ポンプにより取水した場合に、内部構造物に対する化学的影響（腐食）により機器の機能に影響がないことを評価する。

(5) 換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞・摩耗）

降下火砕物の海水ポンプモータ冷却空気への侵入による地絡・短絡、モータ軸受部の摩耗及び空気冷却器冷却管への侵入による閉塞によって、機器の機能に影響がないことを評価する。

(6) 換気系，電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

降下火砕物の海水ポンプモータ冷却空気への侵入による内部の腐食及び外装への接触による腐食によって，機器の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

- ・粒径 : 2mm 以下
- ・堆積量 : 15cm
- ・密度 : 1.5g/cm³ (湿潤密度)

(2) 積雪条件

- ・積雪量 : 17cm (石巻地域における年最大積雪深さの平均値)
- ・単位荷重 : 積雪量 1cm 当たり 20N/m² (建築基準法施行令に基づく積雪の単位荷重)

(3) 堆積荷重

湿潤状態の降下火砕物の荷重 (2, 207 N/m²)

$$+ \text{降下火砕物と組み合わせる積雪荷重 (340 N/m}^2) = 2, 547 \text{ N/m}^2$$

3. 評価結果

(1) 構造物への静的負荷

表 1 に評価結果を示す。荷重が直接加わる原子炉補機冷却海水ポンプの外扇カバーや高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの雨よけカバーが損傷した場合には，モータの冷却器に外気を送り込む機能に影響を及ぼす可能性があるが，評価結果のとおり，原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプに発生する応力は許容値に対して十分な裕度を有しており，機器の機能に影響を及ぼすことはない。

表 1 海水ポンプモータに対する降下火砕物の堆積荷重による発生応力の評価

評価部位		応力	計算値 [MPa]	許容値※ [MPa]	結果
原子炉補機冷却海水ポンプ	モータフレーム	曲げ応力	6	282	○
		圧縮応力	4	244	○
	外扇カバー	曲げ応力	147	282	○
高圧炉心スプレイ補機冷却 海水ポンプ	モータフレーム	曲げ応力	3	130	○
		圧縮応力	2	130	○
	雨よけカバー (取付溶接部)	せん断応力	14	141	○

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

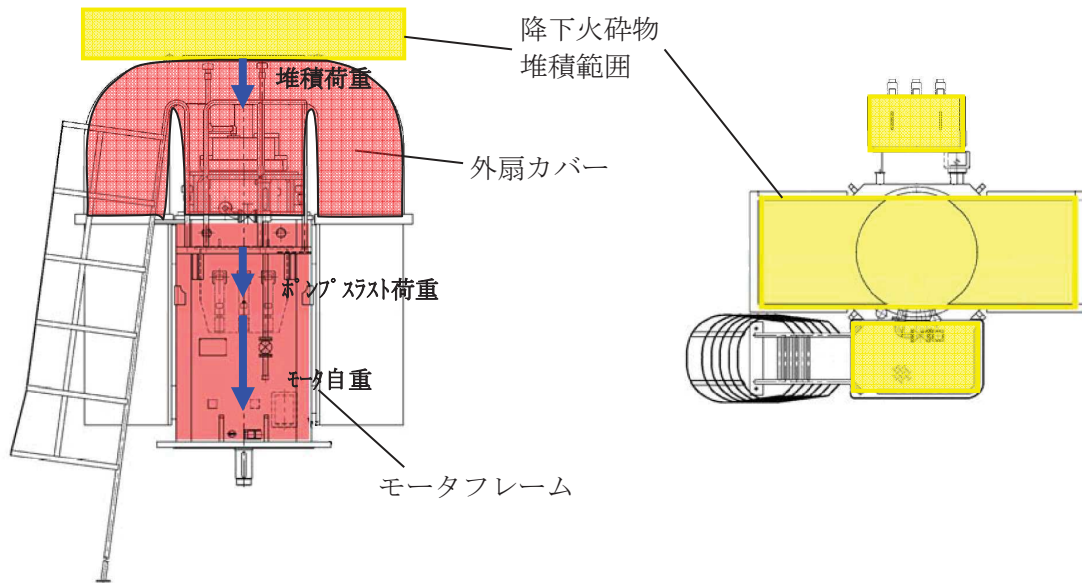


図1 原子炉補機冷却海水ポンプモータ

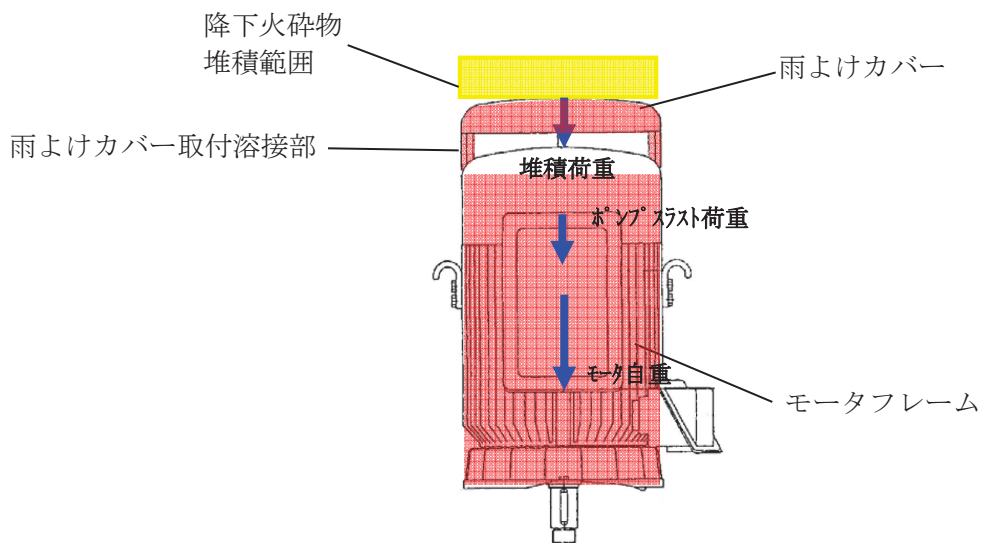


図2 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプモータ

(2) 構造物への化学的影響（腐食）

海水ポンプ及びモータは外面塗装が施されており，降下火砕物による短期での腐食により，機器の機能に影響を及ぼすことはない。

なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

（補足資料－4）

(3) 水循環系の閉塞・摩耗

a. 流水部の閉塞

海水ポンプ流水部の狭隘部の寸法は、図3、4に示すように原子炉補機冷却海水ポンプが約55mmであり、高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプが約29mmである。想定する降下火砕物の粒径は約2mm以下であり、閉塞には至らない。

b. 軸受部の閉塞

原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプの軸受の隙間はそれぞれ、1.2mm、0.7mmの許容値以下で管理されている。想定する粒径は約2mm以下であり、一部の降下火砕物は軸受の隙間より、軸受け内部に入り込む可能性があるが、図3、4に示すように軸受溝部間隙(2.5mm~5.5mm)を設けているため、軸受部の閉塞に至らない。

c. 水循環系の摩耗

降下火砕物は破碎しやすく、砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから、降下火砕物による摩耗が、海水ポンプに与える影響は小さい。

(補足資料-3, 19)

評価の結果より、降下火砕物による海水ポンプの閉塞・摩耗により機器の機能に影響を及ぼすことはない。

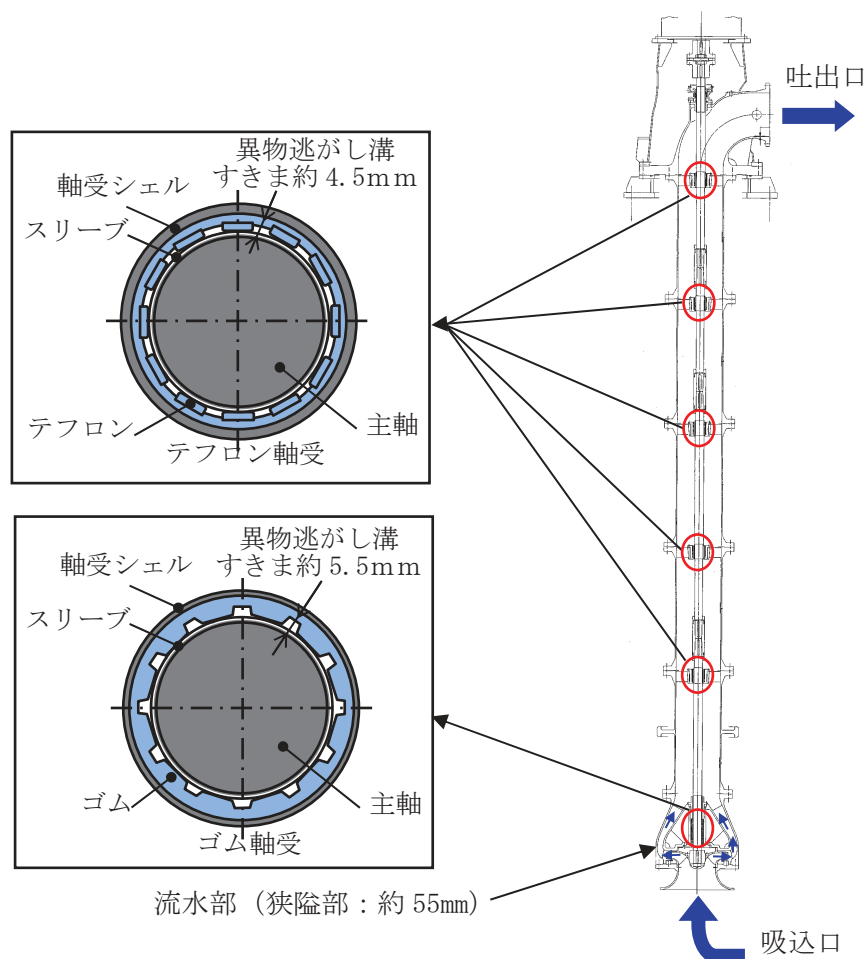


図3 原子炉補機冷却海水ポンプ構造

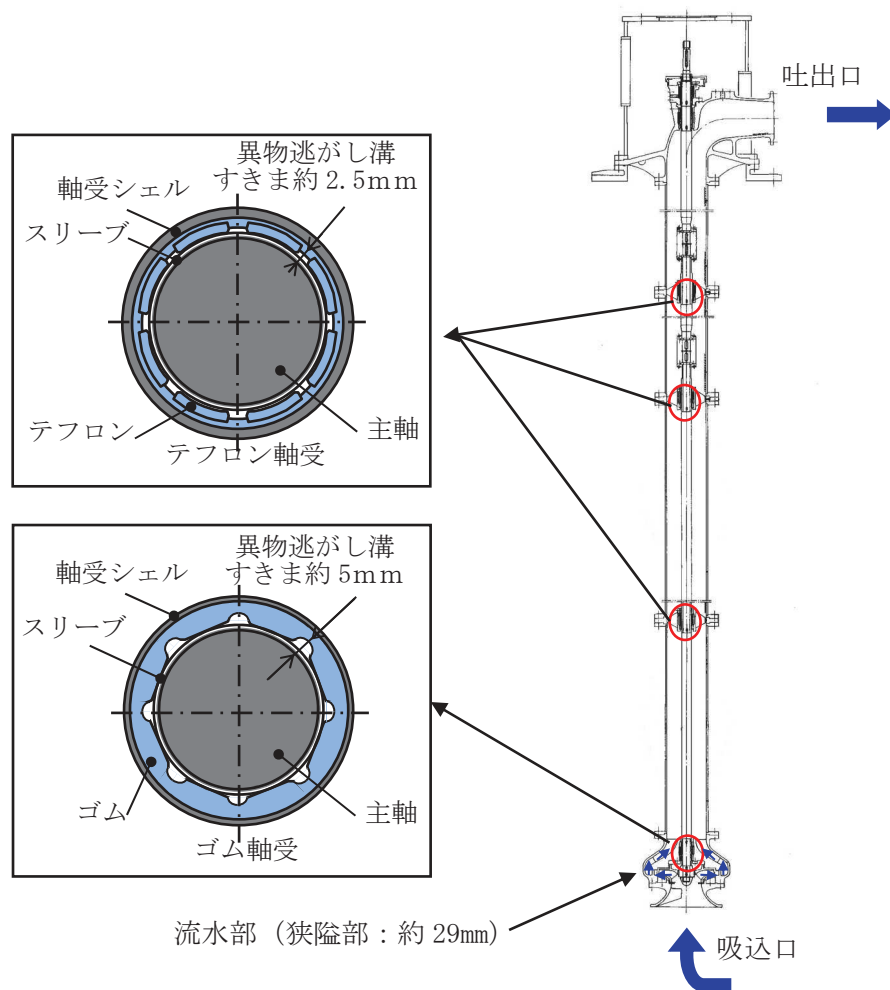


図4 高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ構造

(4) 水循環系の化学的影響（腐食）

海水ポンプの主要部は、内面ゴムライニングや塗装等の対応を実施していることから、降下火砕物による短期での腐食により機器の機能に影響を及ぼすことはない。

(補足資料-4)

(5) 換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞・摩耗）

海水ポンプモータは、図5、6に示すように外気を直接モータ内部に取り込まない冷却方式であり、モータ内部に降下火砕物の侵入はない。したがって、地絡、短絡及びモータ軸受部への影響はない。

また、原子炉補機冷却海水ポンプモータについては空冷式空気冷却器の冷却管があり、降下火砕物に空気中の水分が混ざり、凝集することによる影響が考えられる。

外気の入込口は下向きに設置され外気を取込む構造であり、吸込部には金網が設置されているため、降下火砕物が侵入し難い構造であること、また水分を含み重くなった降下火砕物はより侵入し難いこと、仮に侵入しても冷却管の内径（約29mm）に対して降下火砕物の粒径が十分小さく、運転中はファンからの通風（管内風速：約15m/s）により外部に排出されると考えられる。したがって、空気冷却器冷却管への降下火砕物の侵入による閉塞の可能性は小さく、機器へ影響を及ぼ

すことはない。

(6) 換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

海水ポンプモータは外気を直接モータ内部に取り込まない冷却方式であり、モータ内部に降下火砕物の侵入がない。また、モータが冷却流に接する部分には金属材料を用いているが、防錆塗装が施されていることから、降下火砕物による短期での腐食により機器の機能に影響を及ぼすことはない。

なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常の保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(補足資料－４)

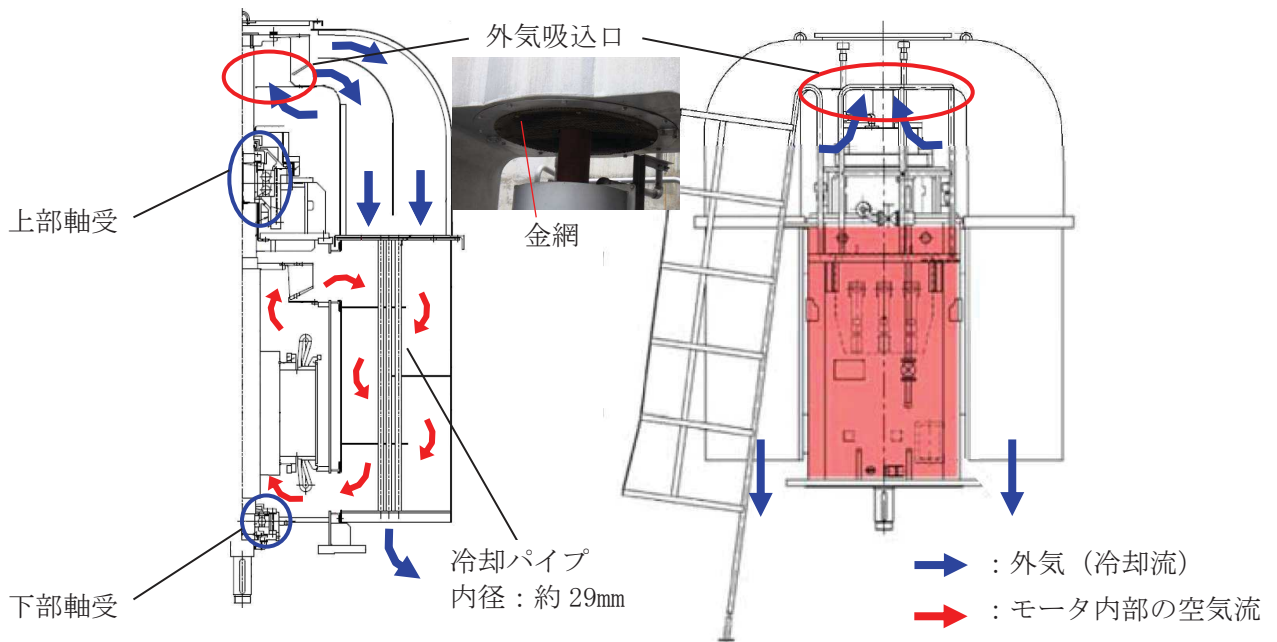


図 5 原子炉補機冷却海水ポンプモータの冷却方式

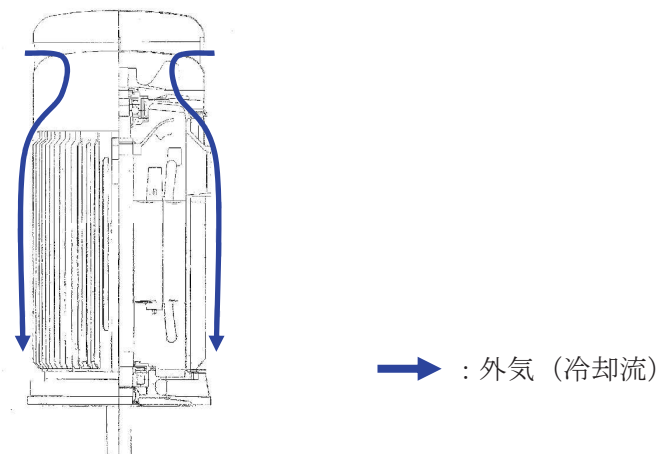


図 6 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプモータの冷却方式

以上

海水ストレーナに係る影響評価

降下火砕物による原子炉補機冷却海水ストレーナ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ（以下「海水ストレーナ」という。）に係る影響評価について以下のとおり評価した。

1. 評価項目

(1) 構造物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重により屋外に設置している高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナの機能に影響がないことを評価する。

(2) 水循環系の閉塞

降下火砕物による海水ストレーナの閉塞により、機器の機能に影響がないことを評価する。

(3) 水循環系の摩耗

降下火砕物による海水ストレーナの摩耗により、機器の機能に影響がないことを評価する。

(4) 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物による海水ストレーナの内部構造物の化学的影響（腐食）により、機器の機能に影響がないことを評価する。また、海水を供給している下流の設備への影響についても同様に評価する。

(5) 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナへの付着や堆積による化学的影響（腐食）により、機器の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

粒 径：2mm 以下

3. 評価結果

(1) 構造物への静的負荷

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナは降下火砕物が堆積しにくい形状をしているため、荷重の影響を受けることはない。

(2) 水循環系の閉塞

想定する降下火砕物の粒径は 2mm 以下であり、海水ストレーナのフィルタ穴径は 8mm であることから、フィルタ穴径に対して十分小さい。また、降下火砕物には粘性を生じさせる粘土鉱物等は含まれていないことから、海水ストレーナが閉塞することはない。なお、原子炉補機冷却海水ストレーナはフィルタが閉塞することがないように差圧管理されており、一定の差圧（15.2kPa）で自動洗浄される。高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナはフィルタが閉塞することがないように、ストレーナ差圧が上昇した場合には切替・洗浄が可能である。

また、海水ストレーナのフィルタを通過した降下火砕物の粒子は、表 1 に示す下流設備である原子炉補機冷却水系熱交換器及び高圧炉心スプレイ補機冷却水系熱交換器（以下「熱交換器」という。）の伝熱管内径に対して、降下火砕物の粒径

が十分小さく、伝熱管等の閉塞により、下流設備に影響を及ぼすことはない。よって、降下火砕物による閉塞により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。

表1 海水ストレーナ下流設備の熱交換器

機器名	伝熱管内径	材質
原子炉補機冷却水系熱交換器	23mm	アルミニウム黄銅管
高圧炉心スプレイ補機冷却水系熱交換器	23mm	アルミニウム黄銅管

(3) 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物は破碎し易く、砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから降下火砕物による摩耗が設備に与える影響は小さく、機器の機能に影響を及ぼすことはない。

(補足資料－3，19)

(4) 水循環系の化学的影響（腐食）

海水ストレーナの内面は、ライニングが施工されていることから、短期での腐食により海水ストレーナの機能に影響を及ぼすことはない。

また、海水ストレーナの下流設備の熱交換器（伝熱管）には、耐食性の高い材料（アルミニウム黄銅管）を使用していること、さらに鉄イオン注入による管内内面の保護被膜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下流設備の機能に影響を及ぼすことはない。

(補足資料－4)

(5) 構造物への化学的腐食

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナは外装塗装が施されており、降下火砕物による短期での腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。

なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常の保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

(補足資料－4)

以上

非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機，
非常用ディーゼル発電機吸気系含む）に係る影響評価

降下火砕物による非常用ディーゼル発電機に係る影響評価について以下のとおり評価する。

1. 評価項目

(1) 構造物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重により屋外に設置されている排気消音器及び排気管の機能に影響がないことを評価する。

(2) 換気系，電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞，摩耗）

降下火砕物の非常用ディーゼル発電機（機関）への侵入等による閉塞・摩耗により，機器の機能に影響がないことを評価する。

(3) 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の排気消音器及び排気管への付着による化学的影響（腐食）について，機器の機能に影響がないことを評価する。

(4) 換気系，電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

降下火砕物の非常用ディーゼル発電機（機関）への侵入等による化学的影響（腐食）により，機器の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

粒径：2mm 以下

3. 評価結果

(1) 構造物への静的負荷

屋外に設置されている排気消音器及び排気管は，降下火砕物が堆積しにくい形状をしているため，荷重の影響を受けることはない。

(2) 換気系，電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞，摩耗）

非常用ディーゼル発電機吸気系は，原子炉補機室換気空調系の外気取入口より上流側に，バグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して 80%以上を捕捉する性能）が設置されており，降下火砕物の大半は捕捉される。実際に使用しているバグフィルタの粒径別捕集効率を図1に示す。また，バグフィルタは取替え又は清掃が可能である。

粒径が $2\mu\text{m}$ 程度の微細な粒子については，図2に示すように過給器，空気冷却器（空気側）に侵入する可能性はあるが，機器の間隙は十分大きく閉塞に至らない。

また，機関シリンダ内に降下火砕物が混入した場合，シリンダライナー／ピストリング間隔と同程度のものが当該間隙内に侵入し，摩耗が発生することが懸念されるが，主要な降下火砕物は，砂と比較しても破砕し易く^{*1}，硬度は同等又は低い^{*2, 3}こと，加えて，現在までの保守点検において有意な摩耗は確認されていないことから，降下火砕物の摩耗による影響は小さいと考えられる。

降下火砕物の溶融による影響については，降下火砕物の融点が約 850°C 以上であることに対して，シリンダから排出される排気ガスの温度が，約 500°C であり，シ

リンダ内の金属表面近傍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、火山灰は溶融には至らないと考えられる。よって、短期的な非常用ディーゼル発電機(機関)の閉塞・摩耗により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。

長期的な影響についても、シリンダライナー及びピストンの間隙内に侵入した降下火砕物は、シリンダとピストン双方の往復運動が繰り返されるごとに、さらに細かい粒子に破碎され、破碎された粒子はシリンダライナーとピストンリング間隙に付着している潤滑油により機関外へ除去されると考える。潤滑油系には機関付フィルタが設置されているが、フィルタのメッシュ寸法が $30\mu\text{m}$ 程度であることから、潤滑油に含まれる降下火砕物によって閉塞する可能性は小さい。さらに、バグフィルタを通過した降下火砕物が潤滑油へ混入した場合を想定し、降下火砕物に付着した火山性ガスによる影響を確認するため、潤滑油に降下火砕物を混入させた状態における潤滑油の成分分析を実施した結果、潤滑油の性状に影響がないことを確認した。非常用ディーゼル機関は定期的に分解点検を実施しており、長期的な影響については保守点検において適切に対応を行うこととする。

(補足資料-2, 3, 6, 7, 8, 19)

(3) 構造物への化学的影響(腐食)

非常用ディーゼル発電機排気消音器及び排気管は図3に示すように外装塗装が施されており、降下火砕物による短期での腐食により、機器の機能に影響を及ぼすことはない。また、排気消音器及び排気管の腐食により非常用ディーゼル発電機の機能に影響を与えることはない。

なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常の保守管理等により、状況に応じて補修を実施する。(補足資料-4)

(4) 換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響(腐食)

金属腐食研究の結果より、降下火砕物に含まれる腐食性ガスによる短期的な金属腐食の影響は小さいことから、金属材料を用いることで、短期での腐食により非常用ディーゼル発電機の機能に影響を及ぼすことはない。なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常の保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。(補足資料-8)

※1: 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. 3, P38-47

※2: 恒松修二 ほか(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

※3: Properties of volcanic ash: volcanic ash hazards and ways to minimize them", USGS(米国地質調査所)



図1 バグフィルタの粒径別捕集効率

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

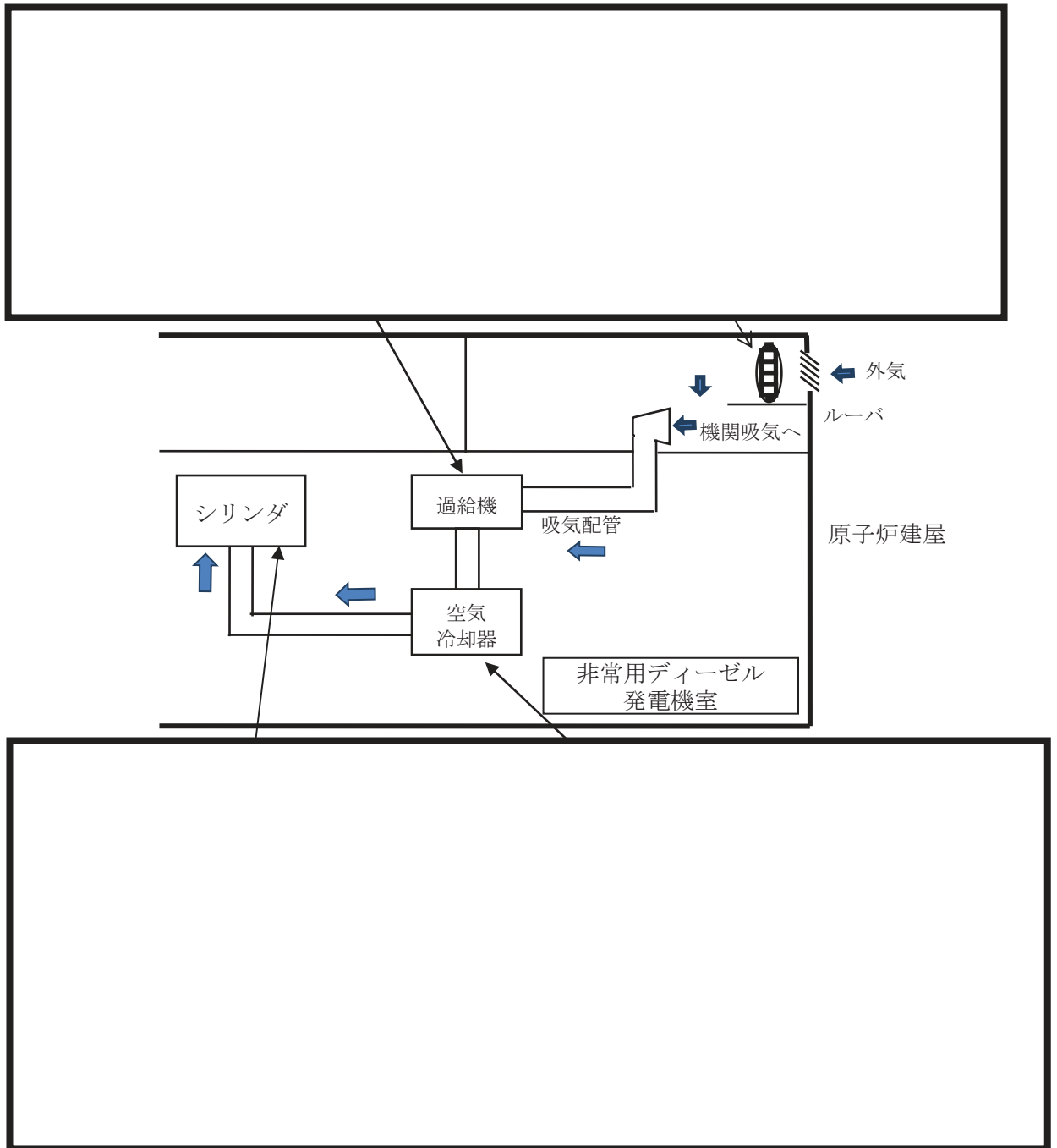


図2 非常用ディーゼル機関吸気系統構造図

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません



図3 非常用ディーゼル発電機排気消音器及び排気管

以 上

非常用換気空調設備に係る影響評価

降下火砕物による非常用換気空調設備（中央制御室換気空調系，原子炉補機室換気空調系，計測制御電源室換気空調系）への影響について以下のとおり評価した。

1. 評価項目

- (1) 換気系，電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞，摩耗）
降下火砕物による非常用換気空調設備に対する機械的影響（閉塞，摩耗）により，機器の機能に影響がないことを評価する。
- (2) 換気系，電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）
降下火砕物による非常用換気空調設備に対する化学的影響（腐食）により，機器の機能に影響がないことを評価する。
- (3) 発電所周辺の大気汚染
降下火砕物により汚染された原子力発電所周辺の大気が換気空調等設備を経て運転員が駐在している中央制御室の居住性に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

- (1) 降下火砕物条件
粒 径：2mm 以下

3. 評価結果

- (1) 換気系，電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞，摩耗）
各評価対象施設等の外気取入口には，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造となっていることから，上方より降下してくる降下火砕物に対し，取り込み難い構造となっている。また，外気取入口にはバグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕獲する性能）が設置されており，想定する降下火砕物は十分除去されるため，給気を供給する系統及び機器に対して降下火砕物が及ぼす影響は少ない。
なお，バグフィルタには差圧計が設置されており，必要に応じて清掃及び取替することが可能である。よって，非常用換気空調設備の閉塞，摩耗により機器の機能に影響を及ぼすことはない。換気空調系の外気取入口イメージ図を図1に，原子炉補機(A)室換気空調系の外気取入口を図2に示す。

(補足資料－5, 11, 19)

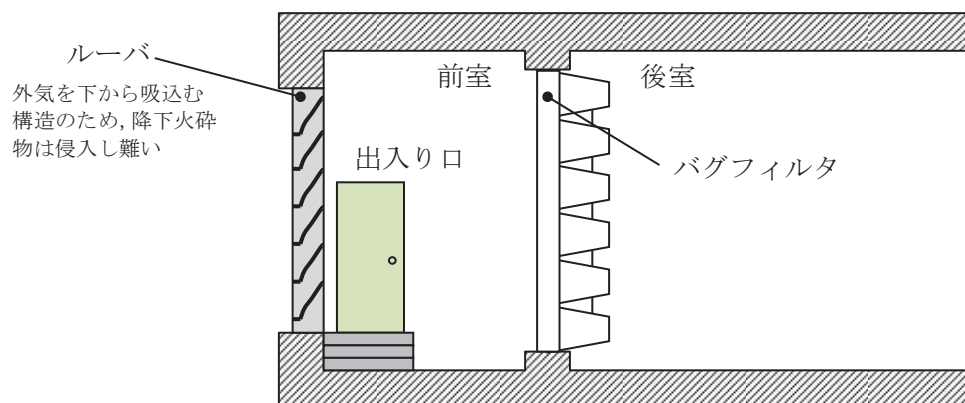


図1 換気空調系の外気取入口イメージ図



図2 原子炉補機（A）室換気空調系の外気取入口

(2) 換気系，電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

非常用換気空調系の外気取入口はアクリル樹脂塗装を実施したアルミニウム合金を使用しているため，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによる短期的な金属腐食の影響は小さいことから，金属材料を用いることで短期での腐食により非常用換気空調設備（外気取入口）の機能に影響を及ぼすことはない。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

（補足資料－4，8）

(3) 発電所周辺の大気汚染

運転員が常駐している中央制御室は，中央制御室換気空調系によって空調管理されており，他の空調設備と同様，外気取入口には，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造となっていることから，上方より降下してくる降下火砕物に対し，取り込み難い構造となっている。また，外気取入口にはバグフィルタ（粒径 $2\mu\text{m}$ 以上に対して約80%を捕獲する性能）が設置されており，想定する降下火砕物は十分除去されるから，降下火砕物が与える影響は少ない。中央制御室換気空調系の外気取入口の写真を図3に示す。

なお，大気汚染による人に対する居住性の観点から，運転員が常駐する中央制御室については，中央制御室排風機の停止及び外気取入ダンパの閉止を行い再循環運転することにより，中央制御室の居住環境を維持できる。以下に，外気取入ダンパを閉止した状態の酸素濃度及び二酸化炭素濃度について評価した結果を示す。



図3 中央制御室換気空調系の外気取入口

○酸素濃度

「空気調和・衛生工学便覧 空調設備編」に基づき、酸素濃度について評価した。

【評価条件】

- ・ 在室人数 7名
- ・ 中央制御室バウンダリ内体積 8,800m³
- ・ 空気流入はないものとする。
- ・ 初期酸素濃度 20.95%（「空気調和・衛生工学便覧」成人呼吸気の酸素量）
- ・ 酸素消費量 0.066m³/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の歩行（中等作業相当）での酸素消費量）
- ・ 許容酸素濃度 18%以上（酸素欠乏症等防止規則）

【評価結果】

表1 中央制御室再循環運転における酸素濃度の時間変化

時間	12 時間	24 時間	36 時間	565 時間
酸素濃度	20.8%	20.8%	20.7%	18.0%

○二酸化炭素濃度

「空気調和・衛生工学便覧 空調設備編」に基づき、二酸化炭素濃度について評価した。

【評価条件】

- ・ 在室人数 7名
- ・ 中央制御室バウンダリ内体積 8,800m³
- ・ 空気流入はないものとする。
- ・ 初期二酸化炭素濃度 0.03%（原子力発電所中央制御室運転員の事故時被ばくに関する規程（JEAC4622-2009））
- ・ 二酸化炭素排出量 0.046m³/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の中等作業での二酸化炭素排出量）
- ・ 許容二酸化炭素濃度 1.0%以下（「労働安全衛生規則」の許容二酸化炭素濃度 1.5%に余裕を見た値）

【評価結果】

表2 中央制御室再循環運転における二酸化炭素濃度の時間変化

時間	12 時間	24 時間	36 時間	266 時間
炭酸濃度	0.08 %	0.12%	0.17%	1.0%

表1, 2の結果から、266時間外気取入れを遮断したままでも、中央制御室内に滞在する運転員の操作環境に影響を与えない、なお、噴火継続時間に関する最近の観測記録（補足資料-12）に比較し、十分な裕度が確保できていることを確認した。

以上

海水取水設備（除塵装置）に係る影響評価

1. 評価項目

(1) 水循環系の閉塞

降下火砕物が混入した海水を取水することに伴う、海水取水設備が閉塞しないことを評価する。

(2) 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物が混入した海水を取水することに伴う、海水取水設備の摩耗により、機器の機能に影響がないことを評価する。

(3) 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物が混入した海水を取水することによる構造物内部の化学的影響（腐食）により、機器の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

粒 径：2mm 以下

3. 評価結果

(1) 水循環系の閉塞

海水取水設備（トラベリングスクリーンメッシュ幅 12mm）への降下火砕物を想定しても、想定する降下火砕物の粒径はスクリーンメッシュ幅に対して十分小さく、また、降下火砕物には粘性を生じさせる粘土鉱物等は含まれていないことから、海水取水設備が閉塞することはない。

(2) 水循環系の内部における摩耗

主要な降下火砕物は破碎し易く、砂と同等又は硬度が低いことから、降下火砕物による摩耗が、設備に影響を与える影響は小さい。

（補足資料－3, 19）

(3) 水循環系の化学的影響（腐食）

海水系の化学的腐食については、海水取水設備は塗装等を実施しており、海水と金属が直接接することはないため、降下火砕物による短期での腐食により海水取水設備の機能に影響を及ぼすことはない。

（補足資料－4）

以 上

計測制御設備（安全保護系）及び非常用電源設備（所内低圧系）
に係る影響評価

降下火砕物による電気系及び計測制御系の盤への影響について、外気から取り込んだ屋内の空気を取込む機構を有するもの（計測制御設備（安全保護系）及び非常用電源設備（所内低圧系））への影響について、以下のとおり評価する。

1. 評価項目

(1) 絶縁低下

降下火砕物が盤内に侵入する可能性及び侵入における、絶縁低下の影響について評価する。

(2) 換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

降下火砕物による計測制御設備及び非常用電源設備に対する化学的影響（腐食）により、機器の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

粒 径：2mm 以下

3. 評価結果

(1) 絶縁低下

屋内の電気系及び計測制御系の盤については、その発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るため、降下火砕物が盤内に侵入する可能性がある。

計測制御設備及び非常用電源設備が設置されているエリアは、原子炉補機室換気空調系又は計測制御電源室換気空調系にて空調管理されており、外気取入口に設置されているバグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して 80% 以上を捕捉する性能）を介した換気空気を吸入している。したがって、降下火砕物が大量に盤内に侵入する可能性は少なく、その付着により短絡を発生させる可能性はないため、計測制御設備及び非常用電源設備の安全機能が損なわれることはない。

（補足資料－ 9）

(2) 換気系、電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

計測制御設備及び非常用電源設備が設置されているエリアは、原子炉補機室換気空調系又は計測制御電源室換気空調系にて空調管理されており、外気取入口に設置されているバグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して 80% 以上を捕捉する性能）を介した換気空気を吸入している。したがって、降下火砕物が大量に盤内に侵入する可能性は少ないことから、短期での腐食により、計測制御設備及び非常用電源設備の安全機能が損なわれることはない。

以 上

復水貯蔵タンクに係る影響評価

降下火砕物による復水貯蔵タンクへの影響について以下のとおり評価した。

1. 評価項目及び内容

(1) 構造物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重により復水貯蔵タンクの健全性に影響がないことを評価する。なお、堆積荷重は積雪との重畳を考慮する。

(2) 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の構造物への付着や堆積による化学的影響（腐食）により構造物の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物条件

- ・堆積量：15cm
- ・密度：1.5g/cm³（湿潤密度）

(2) 積雪条件

- ・積雪量：17cm（石巻地域における年最大積雪深さの平均値）
- ・単位荷重：積雪量1cm当たり20N/m²（建築基準法施行令に基づく積雪の単位荷重）

3. 評価結果

(1) 構造物への静的負荷

a. 堆積荷重

湿潤状態の降下火砕物の荷重（2,207 N/m²）

+降下火砕物と組み合わせる積雪荷重（340 N/m²）=2,547 N/m²

表1に評価結果を示す。評価の結果、復水貯蔵タンクの屋根部及び側板は発生する応力は許容値に対して十分な裕度を有しており、復水貯蔵タンクの健全性に影響を及ぼすことはない。

表1 復水貯蔵タンクに対する降下火砕物の堆積による発生応力評価

評価部位	応力	計算値 (MPa)	許容値* (MPa)	裕度	結果
屋根部	一次一般膜応力	22	188	8	○
	一次膜+曲げ応力	65	282	4	○
側板	一次一般膜応力	19	188	9	○
	一次膜+曲げ応力	60	282	4	○

※：各部位の許容応力は、JEAG4601-1987の「クラス2容器及びクラス2支持構造物」における許容応力状態Ⅲ_ASに基づく。

(2) 構造物への化学的影響（腐食）

復水貯蔵タンクは外面塗装が施されおり、降下火砕物による短期での腐食により復水貯蔵タンクの機能に影響を及ぼすことはない。

なお、降灰後の長期的な腐食の影響については、日常の保守管理等により、状況に応じて補修が可能な設計とする。

（補足資料－4）

以上

排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）に係る影響評価

降下火砕物による排気筒（非常用ガス処理系含む）への影響について以下のとおり評価する。

1. 評価項目及び内容

(1) 換気系，電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）

降下火砕物の排気筒への侵入により，機器の機能に影響がないことを評価する。具体的には，排気筒の吹出し速度が降下火砕物の沈下速度よりも大きく，降下火砕物は排気筒へ侵入しないことを確認する。また，降下火砕物が侵入したとしても流路が閉塞しないことを確認する。

(2) 換気系，電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

降下火砕物の付着に伴う化学的影響（腐食）により，機器の機能に影響がないことを評価する。

(3) 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の付着に伴う化学的影響（腐食）により，機器の機能に影響がないことを評価する。

2. 評価条件

(1) 降下火砕物の条件

- ・粒径 : 2mm 以下
- ・密度 : 1.5g/cm³（湿潤密度とする）
- ・降下速度 : 3.5m/s（単粒子が静止した気体中を自由落下し，粒子の流体抗力，重力及び浮力の間につり合いの状態が生じたときの速度）

3. 評価結果

(1) 換気系，電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）

排気筒は常時排気があり，その排気速度（約 22m/s）は降下火砕物の自由降下速度（3.5m/s）を上回っており，降下火砕物が排気筒内に侵入することはないことから，降下火砕物により流路が閉塞することはない，機器の機能に影響を及ぼすことはない。

(2) 換気系，電気系及び計測制御系に対する化学的影響（腐食）

排気筒は常時排気があり，その排気速度（約 22m/s）は降下火砕物の自由降下速度（3.5m/s）を上回っており，降下火砕物が排気筒内に侵入することはない。また，侵入した場合であっても，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによる短期的な金属腐食の影響は小さいことから，金属材料を用いることで，短期での腐食により機能に影響を及ぼすことはない。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。（補足資料－8）

(3) 構造物への化学的影響（腐食）

排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）は外面塗装が施されおり，降下火砕物による短期での腐食により，機器の機能に影響を及ぼすことはない。

なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。（補足資料－4）

以上

評価ガイドとの整合性について

原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性について、以下の表 1 に示す。

表 1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（1 / 7）

降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性	原子力発電所の火山影響評価ガイド
<p>1. はじめに</p> <p>原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下設置許可基準規則）という。」第六条において、外部からの衝撃による損傷防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならず、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、火山の影響を挙げている。</p> <p>火山の影響により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価するための「原子力発電所の火山影響評価ガイド」に沿って、以下のとおり火山影響評価を行い、安全機能が維持されることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 立地評価 ・ 影響評価 	<p>1. 総則</p> <p>本評価ガイドは、原子力発電所への火山影響を適切に評価するため、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出、抽出された火山の火山活動に関する個別評価、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山事象の抽出及びその影響評価のための方法と確認事項をとりまとめたものである。</p> <p>1. 1 一般</p> <p>原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならず、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、火山の影響を挙げている。</p> <p>火山の影響評価としては、最近では使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査において評価実績があり、2009年に日本電気協会が「原子力発電所火山影響評価技術指針」（JEA64625-2009）を制定し、2012年にIAEAがSafety Standards “Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations” (No. SSG-21)を策定した。近年、火山学は基本的記述科学から、以前は不可能であった火山システムの観察と複雑な火山プロセスの数値モデルの使用に依存する定量的科学へと発展しており、これらの知見を基に、原子力発電所への火山影響を適切に評価する一例を示すため、本評価ガイドを作成した。</p> <p>本評価ガイドは、新規制基準が求める火山の影響により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることの評価方法の一例である。また、本評価ガイドは、火山影響評価の妥当性を審査官が判断する際に、参考とするものである。</p> <p>1. 2 適用範囲</p> <p>本評価ガイドは、実用発電用原子炉及びその附属施設に適用する。</p>

表 1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（3 / 7）

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性
<p>【立地評価】（項目名のみ記載）</p> <p>原子力発電所の火山影響評価ガイド</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出 3. 1 文献調査 3. 2 地形・地質調査及び火山学的調査 3. 3 将来の火山活動可能性 4. 原子力発電所の運用期間における火山活動に関する個別評価 4. 1 設計対応不能な火山事象を伴う火山活動の評価 4. 2 地球物理学的及び地球化学的調査 5. 火山活動のモニタリング 5. 1 監視対象火山 5. 2 監視項目 5. 3 定期的評価 5. 4 火山活動の兆候を把握した場合の対処 	<p>【立地評価】</p> <p>文献調査、地形・地質調査及び火山学的調査を行い、完新世の活動の有無や将来の活動可能性を検討した結果、原子力発電所の地理的領域内には 31 の第四紀火山があり、そのうち、将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として、焼石岳、烏海山、栗駒山、鳴子カルデラ、肘折カルデラ、月山、蔵王山、笹森山、吾妻山、安達太良山及び磐梯山の 11 火山を抽出した。</p> <p>将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない 11 火山を対象に、原子力発電所との距離及び地形的条件を考慮するとともに、各火山に関する文献調査の結果から、設計対応不能な火山事象（火砕物密度流、溶岩流、岩屑なだれほか、新しい火口の開口及び地殻変動）が発電所に影響を及ぼす可能性はないと評価した。また、将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない 11 火山の既往最大の噴火を考慮しても発電所に影響を及ぼさないと判断されることから、火山活動のモニタリングの必要性はないと評価した。</p> <p>（第 189 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（平成 27 年 1 月 30 日）、第 238 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（平成 27 年 6 月 12 日）、第 446 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（平成 29 年 2 月 24 日）にてご説明済）</p>

表 1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物 (火山灰) に対する設備影響の評価の整合性 (4 / 7)

降下火砕物 (火山灰) に対する設備影響の評価の整合性	原子力発電所の火山影響評価ガイド																												
<p>【影響評価】</p> <p>6. 原子力発電所への火山事象の影響評価</p> <p>将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない 11 火山を対象に、原子力発電所との距離及び地形的条件を考慮し、火山性土石流、飛来物 (噴石)、火山性ガス及びその他の火山事象のうち影響を評価すべき事象はしないと評価した。</p> <p>降下火砕物に関しては、文献調査、敷地内での地質調査、敷地周辺での露頭調査を実施するとともに、これらの調査結果を踏まえたシミュレーションを行い、原子力発電所で考慮する降下火砕物の層厚を 15cm と評価した。</p> <p>(第 446 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 (平成 29 年 2 月 24 日) にてご説明済)</p>	<p>【影響評価】</p> <p>6. 原子力発電所への火山事象の影響評価</p> <p>原子力発電所の運用期間中において設計対応不可能な火山事象によって原子力発電所の安全性に影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価された火山について、それが噴火した場合、原子力発電所の安全性に影響を与える可能性のある火山事象を表 1 に従い抽出し、その影響評価を行う。ただし、降下火砕物に関しては、火山抽出の結果にかかわらず、原子力発電所の敷地及びその周辺調査から求められる単位面積あたりの質量と同等の火砕物が降下するものとする。なお、敷地及び敷地周辺で確認された降下火砕物で、噴出源が同定でき、その噴出源が将来噴火する可能性が否定できる場合は考慮対象から除外する。</p> <p>また、降下火砕物は浸食等で厚さが低く見積もられるケースがあるので、文献等も参考にして、第四紀火山の噴火による降下火砕物の堆積量を評価すること。(解説-14)</p> <p>抽出された火山事象に対して、4 章及び 5 章の調査結果等を踏まえて、原子力発電所への影響評価を行うための、各事象の特性と規模を設定する。(解説-15)</p> <p>以下に、各火山事象の影響評価の方法を示す。</p> <p>解説-14. 文献等には日本第四紀学会の「日本第四紀地図」を含む。</p> <p>解説-15. 原子力発電所との位置関係について</p> <p>表 1 に記載の距離は、原子力発電所火山影響評価技術指針 (JEA G4625) から引用した。JEA G4625 では、調査対象火山事象と原子力発電所との距離は、わが国における第四紀火山の火山噴出物の既往最大到達距離を参考に設定している。また、噴出中心又は発生源の位置が不明な場合には、第四紀火山の火山噴出物等の既往最大到達距離と噴出物の分布を参考にその位置を想定する。</p> <p>例えば、噴出中心と原子力発電所との距離が、表中の位置関係に記載の距離より短ければ、火山事象により原子力発電所が影響を受ける可能性があると考えられる。</p> <table border="1" data-bbox="1053 1299 1308 1792"> <caption>表 1. 原子力発電所と火山影響評価技術指針 (JEA G4625) に記載の火山事象</caption> <thead> <tr> <th>火山事象</th> <th>原子力発電所との位置関係</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1. 火山噴出物</td> <td>100km</td> </tr> <tr> <td>2. 火山噴出物 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100km</td> </tr> <tr> <td>3. 噴石</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>4. 噴石 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>5. 火山性土石流</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>6. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>7. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>8. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>9. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>10. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>11. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>12. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> <tr> <td>13. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)</td> <td>100m</td> </tr> </tbody> </table> <p>注 1. 噴出中心と原子力発電所との距離は、表中の位置関係に記載の距離より短ければ、火山事象により原子力発電所が影響を受ける可能性があるものとする。</p> <p>注 2. 降下火砕物については、原子力発電所の敷地及び敷地周辺の火山噴出物の既往最大到達距離を参考にその位置を想定するものとする。</p> <p>注 3. 噴石の既往最大到達距離については、原子力発電所の敷地及び敷地周辺の火山噴出物の既往最大到達距離を参考にその位置を想定するものとする。</p> <p>注 4. 火山性土石流については、原子力発電所の敷地及び敷地周辺の火山噴出物の既往最大到達距離を参考にその位置を想定するものとする。</p>	火山事象	原子力発電所との位置関係	1. 火山噴出物	100km	2. 火山噴出物 (水蒸気、半二酸化硫素)	100km	3. 噴石	100m	4. 噴石 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	5. 火山性土石流	100m	6. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	7. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	8. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	9. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	10. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	11. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	12. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m	13. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m
火山事象	原子力発電所との位置関係																												
1. 火山噴出物	100km																												
2. 火山噴出物 (水蒸気、半二酸化硫素)	100km																												
3. 噴石	100m																												
4. 噴石 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
5. 火山性土石流	100m																												
6. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
7. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
8. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
9. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
10. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
11. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
12. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												
13. 火山性土石流 (水蒸気、半二酸化硫素)	100m																												

表 1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（5 / 7）

降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性	原子力発電所の火山影響評価ガイド
<p>6. 1 降下火砕物</p> <p>(1) 降下火砕物の影響</p> <p>(a) 直接的影響</p> <p>降下火砕物は、最も広範囲に及ぶ火山事象で、ごくわずかな火山灰の堆積でも、原子力発電所の通常運転を妨げる可能性がある。降下火砕物により、原子力発電所の構造物への静的負荷（降下火砕物の衝突、閉塞、磨耗、腐食、大気汚染、水質汚染及び絶縁影響等、降下火砕物が設備に影響を与える可能性のある因子を網羅的に抽出・評価し、その中から詳細に検討すべき影響因子を選定した。</p> <p>影響評価において、必要となる降下火砕物の粒径及び密度については、文献調査・地質調査を基に設定した。なお、降下火砕物の密度については、降雨の影響を考慮した。</p> <p>(b) 間接的影響</p> <p>降下火砕物は広範囲に及ぶことから、広範囲にわたる送電網の損傷による長期の外部電源喪失の可能性や原子力発電所へのアクセス制限事象の可能性も考慮し、間接的影響を確認した。</p> <p>(2) 降下火砕物による原子力発電所への影響評価</p> <p>降下火砕物の影響を考慮すべき設備としては、外部事象防護対象施設のうち、屋内設備は内包する建屋により防護する設計とし、評価対象施設を、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り込む機構を有する施設に分類し抽出した。また、降下火砕物の影響を受ける施設であって、その停止等により、上位の安全重要度の施設の運転に影響を及ぼす可能性のある屋外の施設も評価を行った。</p> <p>抽出した評価対象施設について影響を評価し、原子炉施設の安全性を損なわないことを確認した。</p>	<p>6. 1 降下火砕物</p> <p>(1) 降下火砕物の影響</p> <p>(a) 直接的影響</p> <p>降下火砕物は、最も広範囲に及ぶ火山事象で、ごくわずかな火山灰の堆積でも、原子力発電所の通常運転を妨げる可能性がある。降下火砕物により、原子力発電所の構造物への静的負荷、粒子の衝突、水循環系の閉塞及びその内部における磨耗、換気系、電気系及び計装制御系に対する機械的及び化学的影響、並びに原子力発電所周辺の大気汚染等の影響が挙げられる。</p> <p>降雨・降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。火山灰粒子には、化学的腐食や給水の汚染を引き起こす成分（塩素イオン、フッ素イオン、硫化物イオン等）が含まれている。</p> <p>(b) 間接的影響</p> <p>前述のように、降下火砕物は広範囲に及ぶことから、原子力発電所周辺の社会インフラに影響を及ぼす。この中には、広範囲な送電網の損傷による長期の外部電源喪失や原子力発電所へのアクセス制限事象が発生しうることも考慮する必要がある。</p> <p>(2) 降下火砕物による原子力発電所への影響評価</p> <p>降下火砕物の影響評価では、降下火砕物の降灰量、堆積速度、堆積期間及び火山灰等の特性などの設定、並びに降雨等の同時期に想定される気象条件が火山灰等特性に及ぼす影響を考慮し、それらの原子炉施設又はその附属設備への影響を評価し、必要な場合には対策がとられ、求められている安全機能が担保されることを評価する。（解説-16、18）</p>

表 1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（6/7）

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性
<p>(3) 確認事項</p> <p>(a) 直接的影響の確認事項</p> <p>① 降下火砕物堆積荷重に対して、安全機能を有する構造物、系統及び機器の健全性が維持されること。</p> <p>② 降下火砕物により、取水設備、原子炉補機冷却海水系統、格納容器ベント設備等の安全上重要な設備が閉塞等によりその機能を喪失しないこと。</p> <p>③ 外気取入口からの火山灰の侵入により、換気空調系統のフィルタの目詰まり、非常用ディーゼル発電機の損傷等による系統・機器の機能喪失がなく、加えて中央制御室における居住環境を維持すること。（解説-17）</p> <p>④ 必要に応じて、原子力発電所内の構造物、系統及び機器における降下火砕物の除去等の対応が取れること。</p>	<p>(3) 降下火砕物の影響の確認結果</p> <p>(a) 直接的影響の確認結果</p> <p>① 降下火砕物による静的荷重影響に対して、原子炉建屋、制御建屋、タービン建屋、地下軽油タンクピット、海水ポンプ、海水ストレーナ（高圧炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ）、非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む）排気消音器及び排気管、復水貯蔵タンクの健全性が維持されることを確認した。</p> <p>② 降下火砕物による化学的影響に対して、原子炉建屋、制御建屋、タービン建屋、地下軽油タンクピット、海水ポンプ、海水取水設備（除塵装置）、海水ストレーナ及び下流設備、非常用換気空調設備、非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む）、計測制御設備（安全保護系）、非常用電源設備（所内低圧系）、復水貯蔵タンク、排気筒、非常用ガス処理系（屋外配管）の機能が維持されることを確認した。</p> <p>③ 降下火砕物が外気取入口に侵入した場合であっても、フィルタによって大部分の降下火砕物は除去されることから、給気を供給する系統及び機器の機能喪失がなく、加えて、中央制御室換気空調系については、外気取入ダンプを閉止し閉回路循環運転をすることにより、中央制御室の居住性に影響を及ぼさないことを確認した。</p> <p>④ 必要に応じて、構造物、系統及び機器における降下火砕物の除去、換気空調系フィルタの清掃・取替が可能な設計であることを確認した。</p>
<p>(b) 間接的影響の確認事項</p> <p>原子力発電所外での影響（長期間の外部電源の喪失及び交通の途絶）を考慮し、燃料油等の備蓄又は外部からの支援等により、原子炉及び使用済燃料プールの安全性を損なわないように対応が取れること。</p>	<p>(b) 間接的影響の確認結果</p> <p>原子力発電所外での影響（長期の外部電源の喪失及び交通の途絶）を考慮した場合においても、発電所内に貯蔵されている燃料油等の備蓄により、7日間は原子炉及び使用済燃料プールの安全性を損なわないように対応が取れることを確認した。</p>

解説-16. 原子力発電所内及びその周辺敷地において降下火砕物の堆積が観測されない場合は、次の方法により堆積物量を設定する。
 ✓ 類似する火山の降下火砕物堆積物の情報を基に求める。
 ✓ 対象となる火山の総噴火量、噴煙柱高度、全粒径分布、及びその領域における風速分布の変動を高度及び関連パラメータの間数として、原子力発電所における降下火砕物の数値シミュレーションを行うことにより求める。数値シミュレーションに際しては、過去の噴火履歴等の関連パラメータ、及び類似の火山降下火砕物堆積物等の情報を参考とすることができる。

解説-17. 堆積速度、堆積期間については、類似火山の事象やシミュレーション等に基づいて評価する。また、外気取入口から侵入する火山灰の想定に当たっては、添付1の「気中降下火砕物濃度の推定手法について」を参照した気中降下火砕物濃度を用いる。堆積速度、堆積期間及び気中降下火砕物濃度は、原子力発電所への間接的な影響の評価にも用いられる。

解説-18. 火山灰の特性としては粒度分布、化学的特性等がある。

表 1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（7/7）

降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性	原子力発電所の火山影響評価ガイド
<p>将来の活動可能性がある火山について、運用期間中の噴火規模を考慮し、敷地において考慮する火山事象を評価した結果、降下火砕物以外の火山事象については、原子炉施設の安全機能に影響を及ぼすことはないと評価した。</p> <p>以上</p>	<p>【立地評価の結果を考慮し評価する項目】（項目名のみ記載）</p> <ul style="list-style-type: none"> 6. 2 火砕物密度流 6. 3 溶岩流 6. 4 岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊 6. 5 火山性土石流、火山泥流及び洪水 6. 6 火山から発生する飛来物（噴石） 6. 7 火山ガス 6. 8 新しい火口の開口 6. 9 津波及び静振 6. 10 大気現象 6. 11 地殻変動 6. 12 火山性地震とこれに関連する事象 6. 13 熱水系及び地下水の異常

降下火砕物の特徴及び影響モードと、影響モードから選定された影響因子に対し影響を受ける評価対象施設等の組合せについて

降下火砕物の特徴から抽出される影響モード，影響モードから選定される影響因子，影響因子から影響を受ける評価対象施設等の組合せについて，本資料「表3.4.4-1 降下火砕物が影響を与える評価対象施設等と影響因子の組合せ」にて，評価すべき組合せを検討した結果，図1に示す結果となった。なお，選定された影響因子は，「原子力発電所の火山影響評価ガイド」に示されたものと同じ項目となった。

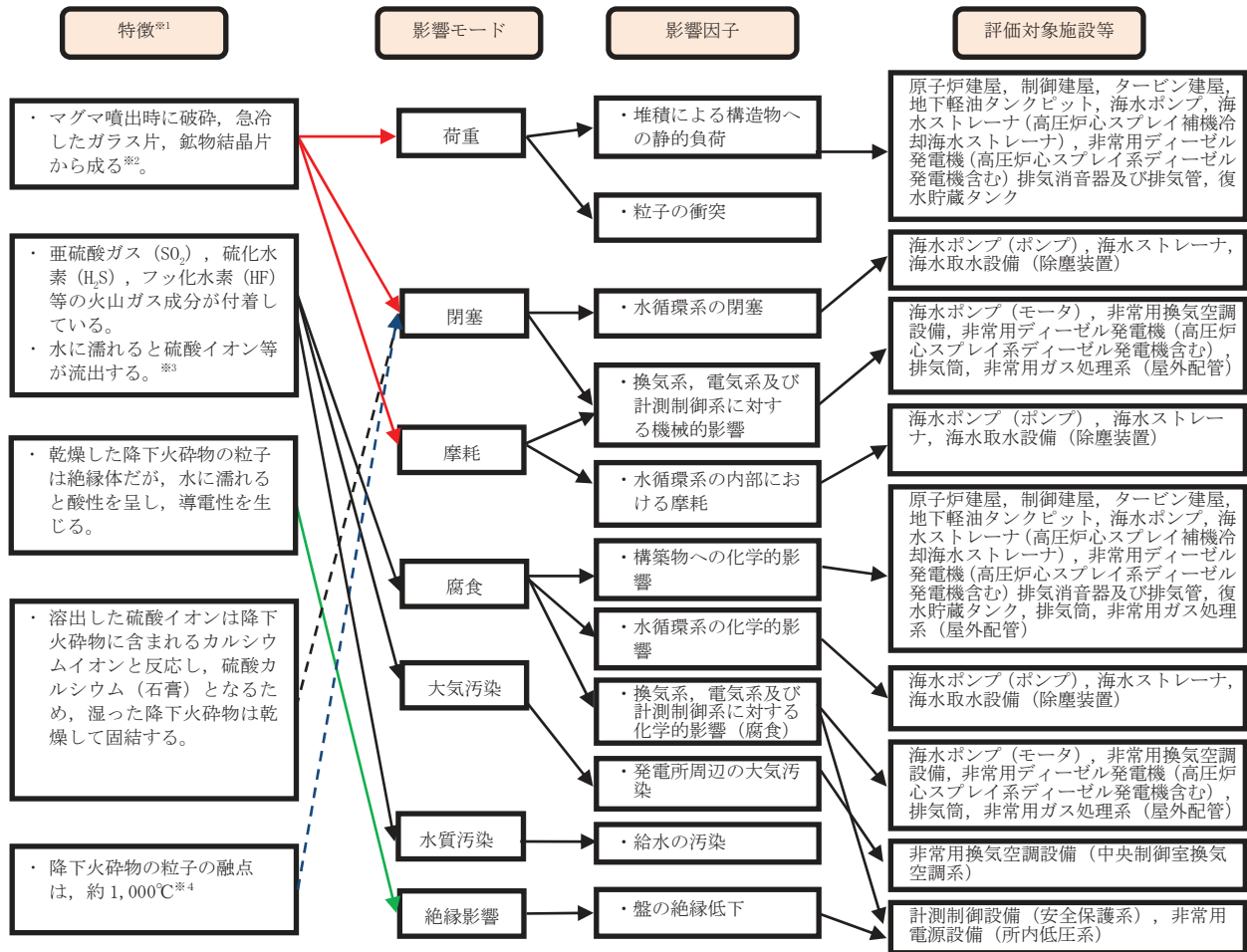


図1 降下火砕物の特徴と影響因子

※1：「広域的な火山防災対策に係る検討会（第3回）（資料2）」（事務局：内閣府（防災担当），消防庁，国土交通省水管理・国土保全局砂防部，気象庁：平成24年11月）

※2：粘性を生じさせる粘土鉱物等は含まれていない。

※3：〔火山灰による金属腐食の研究報告の例〕

4種類の金属材料（Znメッキ，Al，SS41，Cu）に対して，桜島の降下火砕物を水で洗浄し，可溶性の成分を除去した後，金属試験片に堆積させ，実際の自然条件より厳しい条件である高濃度のSO₂ガス雰囲気（150～200ppm）で加熱，冷却を繰り返すことで，結露，蒸発を繰り返した金属腐食の程度は，表面厚さとして十数～数十μmのオーダーの腐食。（補足資料－8参照）

〔試験条件・・・温度，湿度，保持時間 [①（40℃，95%，4h）～②（20℃，80%，2h）×18サイクル〕

〔参考文献〕出雲茂人，末吉秀一ほか，火山環境における金属材料の腐食，1990，防食技術Vol. 39，pp. 247-253）
⇒設計時の腐食代（数mmオーダー）を考慮すると，構造健全性に影響を与えることはないと考えられる。

※4：降下火砕物の融点は約1,000℃であり，一般的な砂に比べて低いとされているが，調査の結果，女川原子力発電所で想定する降下火砕物を構成する火山ガラス及び鉱物結晶片の融点は850℃以上であると考えられる。（補足資料－19参照）

降水による降下火砕物の固結の影響について

降下火砕物は、湿ったのち乾燥することで固結する特徴をもっており、影響モードとして閉塞が考えられるが、一般的に流水等で除去可能である。

降下火砕物が固結した場合の評価対象施設等に対する影響モードとしては、水循環系の閉塞及び換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）が考えられるが、水循環系の閉塞においては、大量の海水が通水しているため、固結による影響はない。

換気系、電気系及び計測制御系に対する機械的影響（閉塞）としては、非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕獲する性能）の閉塞が考えられるが、非常用換気空調系の外気取入口にはルーバが設置されており、下向から吸い込む構造となっていることから、平時に比べ雨が降っている場合の降下火砕物の侵入は減少すると考えられる。なお、侵入した降下火砕物は、非常用換気空調系のバグフィルタによって除去されるが、湿った降下火砕物がバグフィルタに付着し固結した場合においても、バグフィルタの取替えが可能なことから、固結による影響はない。

一方、評価対象施設等に対して間接的な影響を与え得る事象としては、固結した降下火砕物によって、構内排水に影響を及ぼす事象が考えられる。構内に降った雨水は、最終的には、北側及び南側に設置されている各幹線排水路に集水され海域に排水される。各幹線排水路は、評価対象施設等に有意な影響を及ぼし得る大雨時の流入量に対して、十分な裕度を有していることから、構内の排水に対して影響を及ぼさない。

なお、原子炉建屋等については、溢水対策として建屋貫通部の止水処置等を実施していることから、評価対象施設等への影響はない。

以 上

降下火砕物による摩耗について

水循環系において最も摩耗の影響を受けやすい箇所はライニングが施されていない各冷却器の伝熱管と考えられるが、発電所の運用期間中において海水取水中に含まれる砂等の摩耗によるトラブルは発生していないこと、及び主要な降下火砕物は、砂と同等又は砂より硬度が低くもろいことから、降下火砕物による摩耗が設備に影響を与える可能性はないと評価している。

1. 降下火砕物と砂の破碎しやすさの違いについて

降下火砕物と砂の破碎しやすさの違いについては、「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. 3, P38-47.」による調査報告があり, 図 1 に示すとおり, 「シラスは川砂などに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。

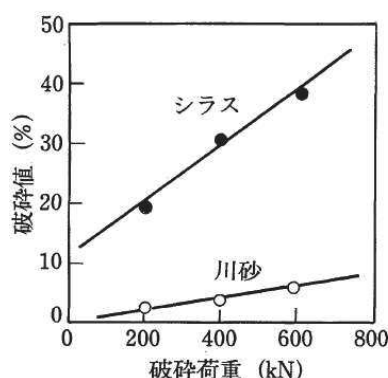


図 1 シラスの破碎試験結果

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。
- ・女川原子力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, カミントン閃石, 黒雲母, 磁鉄鉱であり, 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)。
- ・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。また, 東北地方太平洋沖地震に伴う津波による海水中の砂に対しても, 海水ポンプの運転が継続している実績があることから, 摩耗による設備への影響は軽微と考える。

以上

降下火砕物の化学的影響（腐食）について

女川原子力発電所第2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る短期的な腐食により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

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、原子炉建屋、制御建屋、タービン建屋、海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）、海水ストレーナ（高圧炉心スプレー補機冷却海水ストレーナ）、排気筒、非常用ガス処理系（屋外配管）、復水貯蔵タンク、地下軽油タンクピット、非常用ディーゼル発電機（高圧炉心スプレーディーゼル発電機含む。）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エポキシ樹脂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、海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）、海水ストレーナ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ）及びその下流設備、海水取水設備（除塵装置）についてはエポキシ樹脂系、タール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、海水ストレーナの下流設備である熱交換器の伝熱管については、耐食性に優れたアルミニウム黄銅を使用していること、鉄イオン注入による管内内面の保護被膜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、海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー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、非常用換気空調設備（外気取入口）には耐食性のあるアルミニウム合金にアクリル塗装による塗装を実施しているため、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）	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋，制御建屋，タービン建屋 海水ポンプ（原子炉補機冷却海水ポンプ，高压炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ） 海水ストレーナ（高压炉心スプレイ補機冷却海水ストレーナ） 非常用ガス処理系（屋外配管） 排気筒 復水貯蔵タンク 地下軽油タンクピット 非常用ディーゼル発電機（高压炉心スプレイ系ディーゼル発電機含む。）排気消音器及び排気管 	外壁	塗装	エポキシ樹脂系塗料による防食塗装	
		ポンプ	ケーシング		塗装
		モータ	外面		塗装
		ストレーナ外面	塗装		
		配管，支持構造物	塗装		
		排気筒，支持構造物	塗装		
		タンク	塗装		
		ハッチ	塗装		
		排気消音器	排気管		塗装
		排気管			

※1：塗装ハンドブックによると，プラントの塗装として，酸，アルカリなどに水分の加わった強度腐食環境での塗装には耐薬品性のある塗料として，エポキシ樹脂塗料，ターボエポキシ樹脂塗料などが使用されるとの記載がある。

〔参考文献〕：石塚未豊・中道敏彦，塗装ハンドブック，1996，朝倉書店，P312

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

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

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

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

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

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

降下火砕物による非常用ディーゼル発電機の吸気に係る バグフィルタの影響評価について

非常用ディーゼル発電機の吸気は換気空調系のバグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕捉する性能）を介した換気空気を吸入しているため、降下火砕物の侵入による非常用ディーゼル発電機への影響は小さいと考えられる。なお、バグフィルタの手前には、外気取入口に下向き羽根のついたルーバが設置されており、降下火砕物により容易に閉塞しないと考えられるが、閉塞までの灰捕集容量について、以下のとおり評価する。

1. 降下火砕物によるバグフィルタ閉塞試験

バグフィルタの閉塞試験は、実機で使用しているバグフィルタを用い、実際の火山灰を用いて実施した。

(1) 試験装置の構成

試験装置は図1に示すように、下流側にブロアを設置し、フィルタ通過風量が非常用ディーゼル発電機運転時と同様となるように流量調整が可能な設計とする。上流には粉塵発生装置を設置し、規定の火山灰を供給する。

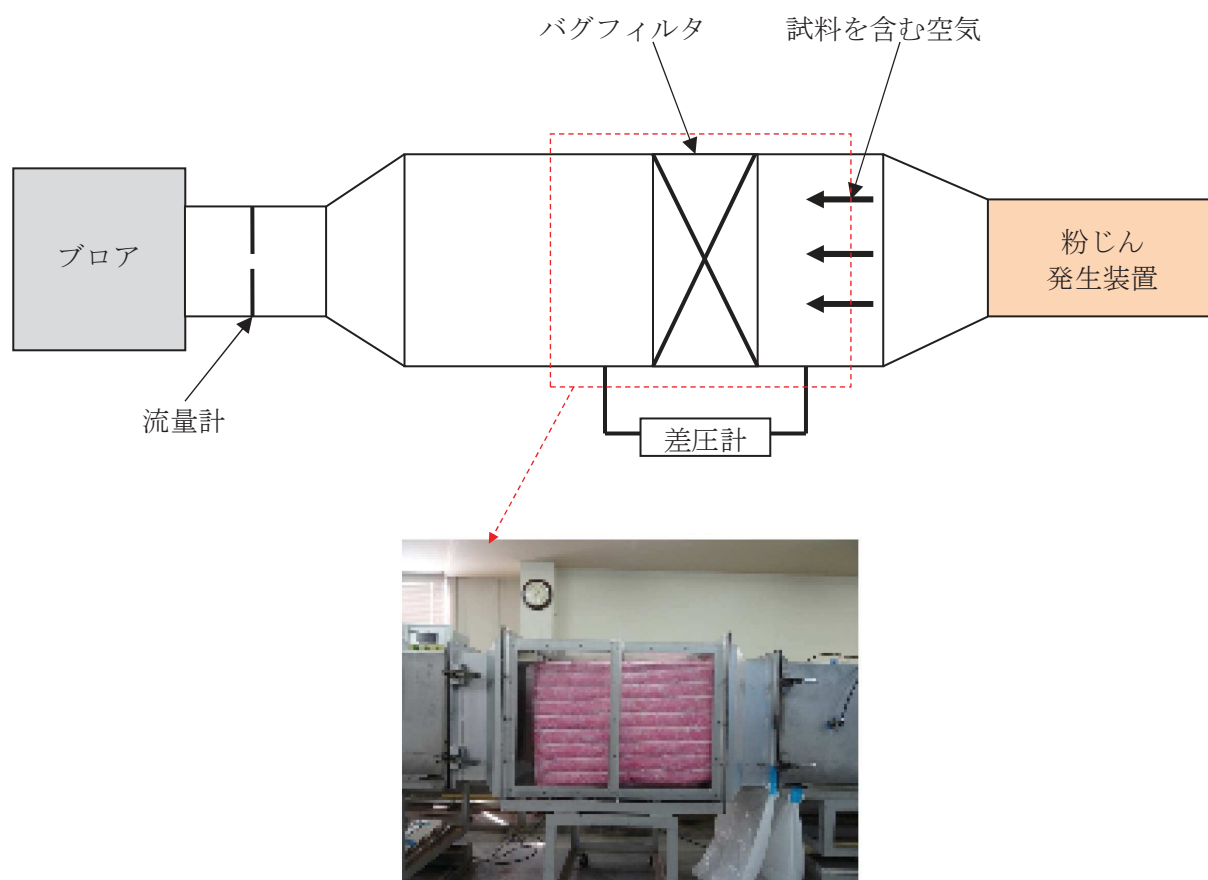


図1 試験装置の構成

(2) 試験条件及び試験方法

a. 試験条件

・ 降下火砕物の濃度

降下火砕物の大気中濃度には、評価対象火山のうち堆積層厚の最大値を与える鳴子カルデラに対して、「原子力発電所の火山影響評価ガイド」に示される数値シミュレーション (Tephra2) により気中降下火砕物濃度を推定する手法に基づき、算出される値 2.7g/m^3 (以下「参考濃度」という。) を用いた。

・ 降下火砕物の粒径

降下火砕物の粒径は、参考濃度の算出で用いる数値シミュレーション (tephra2) によって得られた粒径分布を基に表 1 のとおり設定した。

表 1 試験にて噴霧する降下火砕物の粒径



・ 試験風量

非常用ディーゼル発電機の吸気に係わるバグフィルタの定格風量 (m^3/h) とした。

・ 試験方法

フィルタの差圧を連続的に測定し、差圧が設定値 (系統要求値) に到達するまでの火山灰の供給量を測定する。

(3) 判定基準

バグフィルタ差圧 (圧力損失) の判定基準は、設計値 (系統要求値) の Pa とした。

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

(4) 試験結果

バグフィルタの差圧と捕集重量の関係を図2に示す。図2より、バグフィルタの差圧が設定値である Pa に到達したときの灰捕集量は約 g/枚であった。



図2 バグフィルタ閉塞試験の結果

表2に吸気バグフィルタ閉塞までの保持容量の比較を示す。吸気バグフィルタの閉塞までの灰捕集容量は設計値である粉塵保持容量 g/枚に対して 倍程度となった。

なお、本試験は現在継続中であり、今後実施予定の試験等についても適切に反映していく。

表2 吸気バグフィルタ閉塞までの保持容量の比較

	粉塵保持容量 ^{※1}	降下火砕物による試験結果に基づく灰捕集容量
① バグフィルタ ダスト保持容量 (g/枚)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
② バグフィルタ 1枚あたりの定格風量 (m ³ /h)	<input type="text"/>	
③ 降下火砕物の大気中濃度 (g/m ³)	2.7	

※1：定格風量で最終圧力損失に達した時点においてバグフィルタが保持している粉塵量の設計値。（試験用粉体は換気用エアフィルタユニットの性能試験方法（JIS B 9908）で用いられる、JIS Z 8901の試験粉体1-15種を使用）

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

2. バグフィルタの閉塞に対する対応

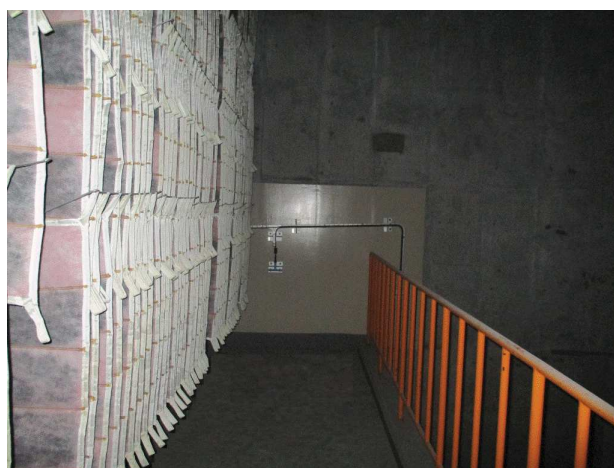
非常用ディーゼル発電機の吸気バグフィルタは1系統あたり最大で48枚で構成されており、バグフィルタの取替え又は清掃に複雑な作業の必要はない。

ただし、参考濃度を想定した場合には取替え又は清掃時のバグフィルタの重量が通常時よりも重くなることで、時間や要員が多く必要になると考えられるため、取替え又は清掃に要する要員及び手順については、これらの結果を踏まえて今後検討を行うこととする。非常用ディーゼル発電機のバグフィルタの写真を図3に示す。

なお、今後実施予定の試験等についても適切に対応に反映していく。



(バグフィルタ入口側)



(バグフィルタ出口側)

図3 非常用ディーゼル発電機のバグフィルタ

以上

降下火砕物の侵入による非常用ディーゼル機関空気冷却器への影響について

非常用ディーゼル機関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。

非常用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、給気ルーバ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、吸入空気の温度（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い。図1に非常用ディーゼル機関吸気系の概略系統図を示す。

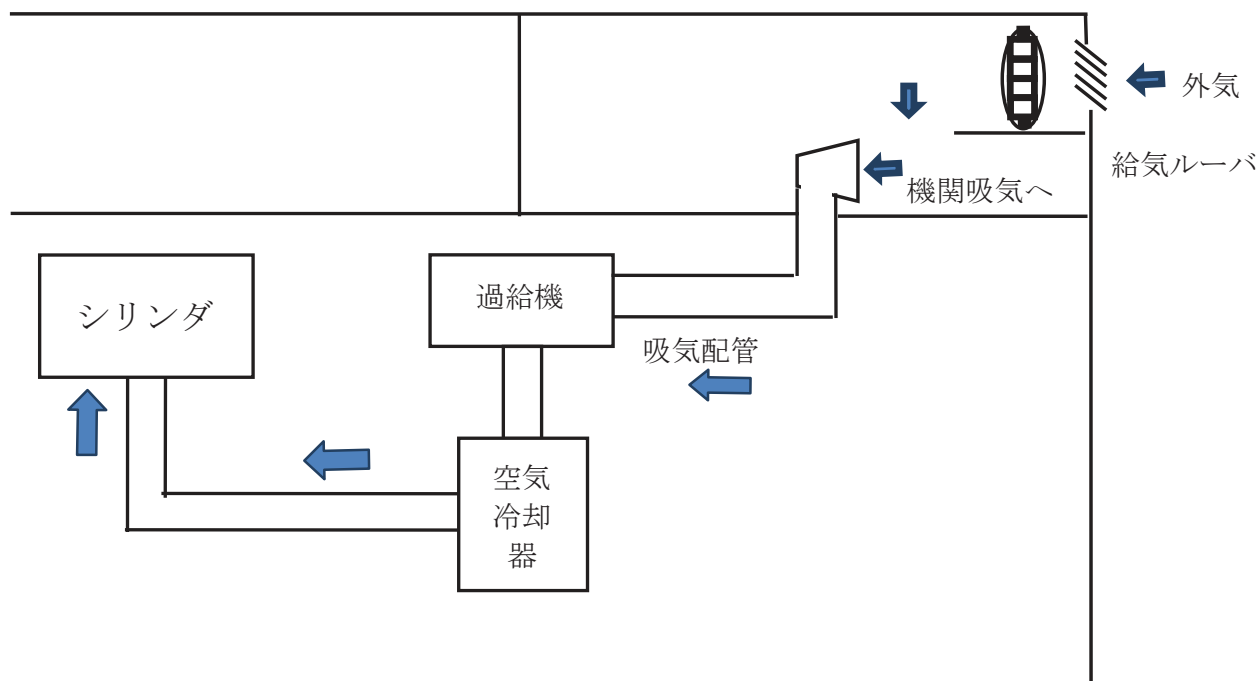


図1 非常用ディーゼル機関吸気系概略系統図

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、非常用ディーゼル発電機吸気口上流に設置されているバグフィルタを通過し、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

非常用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 T103）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 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 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 g/l の降下火砕物の濃度においても試験を実施した。

表 1 想定される潤滑油中の降下火砕物濃度

	非常用ディーゼル発電機
①非常用ディーゼル発電機の吸気用として外気取込口から取込まれる降下火砕物の総量(g) = a × b × c	<input type="text"/>
a. 非常用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}	2.7
②非常用ディーゼル発電機（機関）に取込まれる降下火砕物 (g) = ① × (100-d) / 100 × e / 100	<input type="text"/>
d. 非常用換気空調系のバグフィルタの除去効率 (%)	80
e. 非常用換気空調系のバグフィルタを通過する降下火砕物の粒径割合 (%) ^{※2}	<input type="text"/>
③非常用ディーゼル発電機潤滑油系の潤滑油量 (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、評価対象火山の一つである鳴子カルデラに対して、「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 2.7g/m³ を用いた。

※2：2 μm 以下の降下火砕物の割合。

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

(2) 粒径

混入させる降下火砕物の粒径は、原子炉補機室換気空調系のバグフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対し 80%以上を捕獲する性能）を通過した際に想定される $2\mu\text{m}$ 程度とする。

なお、 $2\mu\text{m}$ 程度は、潤滑油に有意な影響を与える非常用ディーゼル発電機の機関付メッシュ寸法（ $30\mu\text{m}$ ）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、非常用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。

非常用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。

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（酸性の可能性のある物質）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、非常用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。

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

表 2 試験項目及び判定基準等

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要視される項目の一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℃)	潤滑油の油膜厚さが適正に保持できるかを示す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 (蒸留法)	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、油膜切れによる潤滑不良を起こすことから選定した。		(JIS K2275) 蒸留フラスコ中の試料に、水に不溶な溶剤を加えて、加熱しながら還流させ、検水管の捕集水量から試料中の水分を求める。
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に添加されている塩基成分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、電位差測定する。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) トルエン不溶分 (A法)	潤滑油の不溶分が増加すると粘度の上昇、潤滑油系の清浄性の悪化、フィルタ目詰まり等を起こ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て、不溶分を乾燥させ重量を測定する。

※1：トルエン不溶分とペンタン不溶分には相関関係があり、ペンタン不溶分からトルエン不溶分を差し引いた値が、潤滑油の熱・酸化劣化物の量を表すため、ペンタン不溶分のみを判定基準とした。

枠囲みの内容は商業機密又は防護上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非常用ディーゼル発電機の運転状態（非常用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（約370倍）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、非常用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[°C]	258	208 以上		○	
動粘度[mm ² /s]	97.9	122 以下		○	
水分[%]	-	0.5 以下		○	
塩基価[mgKHO/g]	13	6 以上		○	
ペンタン不溶[%]	-	5 以下		○	

※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が、今後データ採取をする計画であるため、今回の比較では代表性状（カタログ値）を参照した。

※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又は防護上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女川原子力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なったものである。

火山ガスの成分は亜硫酸ガス、硫化水素、フッ化水素などが挙げられ、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、女川原子力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 SO₂ 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

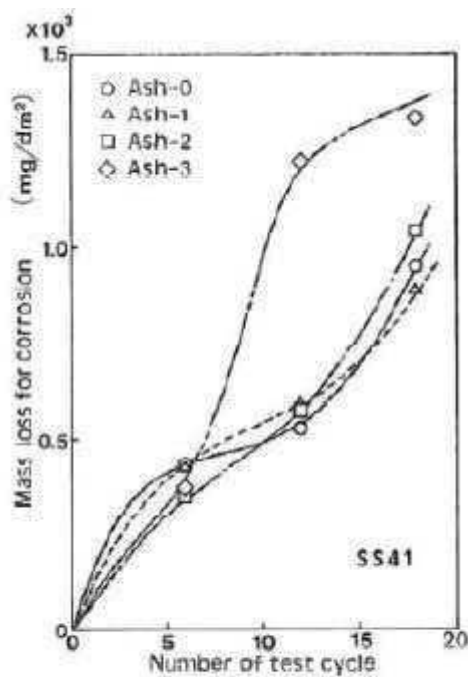
験であり、自然環境に存在する火山灰よりも高い腐食条件^{※2}で金属腐食量を求めている。女川原子力発電所の評価対象施設等のうち、地下軽油タンクピットのハッチ（ステンレス鋼）については、降下火砕物に付着した火山性ガスが水に濡れたときに生ずる硫酸イオン等により腐食が発生する可能性がある。このため、ハッチについては、外装塗装^{※3}を施すことによって、降下火砕物による短期での腐食により機能に影響を及ぼすことはない設計とする。

※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 卷（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：ハッチ（ステンレス鋼）部は酸，アルカリなどに水分の加わった強度腐食環境での塗装としてエポキシ樹脂系の塗装を実施



- Ash-0：降下火砕物のない状態
- 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1 SS41の腐食による質量変化

以上

計測制御設備及び非常用電源設備への降下火砕物の影響について

降下火砕物の建屋内侵入については、非常用換気空調設備（外気取入口）からの侵入が考えられるが、バグフィルタは、粒径 $2\mu\text{m}$ 以上に対して 80%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砕物の影響は小さいと考えられるものの、ここでは降下火砕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、外気取入口にバグフィルタが設置されており、降下火砕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、降下火砕物が侵入することを考慮し、以下のとおり検討した。

1. 侵入する降下火砕物の粒径

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系である、原子炉補機室換気空調系及び計測制御電源室換気空調系の外気取入口にはバグフィルタ（粒径 $2\mu\text{m}$ 以上に対して 80%以上を捕獲する性能）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、降下火砕物の粒径は、 $2\mu\text{m}$ 以下の細かな粒子であると推定される。

2. 計測制御設備及び非常用電源設備に対する降下火砕物の影響

計測制御設備及び非常用電源設備において、数 μm 程度の線間距離となるのは、集積回路（IC など）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、降下火砕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、降下火砕物が付着しても、短絡等を発生させることはない。したがって、万が一、細かな粒子の降下火砕物が盤内に侵入した場合においても、降下火砕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		評価緒元
①堆積面積(m ²)	原子炉建屋	6,620
	制御建屋	1,860
	タービン建屋	5,660
	復水貯蔵タンク	2,030
	地下軽油タンクピット	650
	合計	16,820
②堆積厚さ(m)		0.15
③堆積量=①×②(m ³)		2,523
④1m ³ 当たりの作業人工※(人日)		0.39

1. 作業量(上記のとおり)

$$0.39 \text{ 人日} \cdot \text{m}^3 \times 2,523 \text{ m}^3 = \text{約} 984 \text{ 人日}$$

2. 作業日数(試算例)

(1) 作業人数: 60人(6人/組×10組)

・1組あたり6人体制とする。

原子炉建屋	: 3組
制御建屋	: 2組
タービン建屋	: 3組
復水貯蔵タンク	: 1組
地下軽油タンクピット	: 1組
合計	: 10組

(2) 所要日数: 約17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バグフィルタ取替手順について

換気空調系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にバグフィルタの取替・交換イメージを示す。

- ・ フィルタの取替作業はルーバ内にて行うため、降灰の影響を受けにくいと考えられるが、保護具（マスク、めがね）を装備する。
- ・ 開口部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、空調機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。

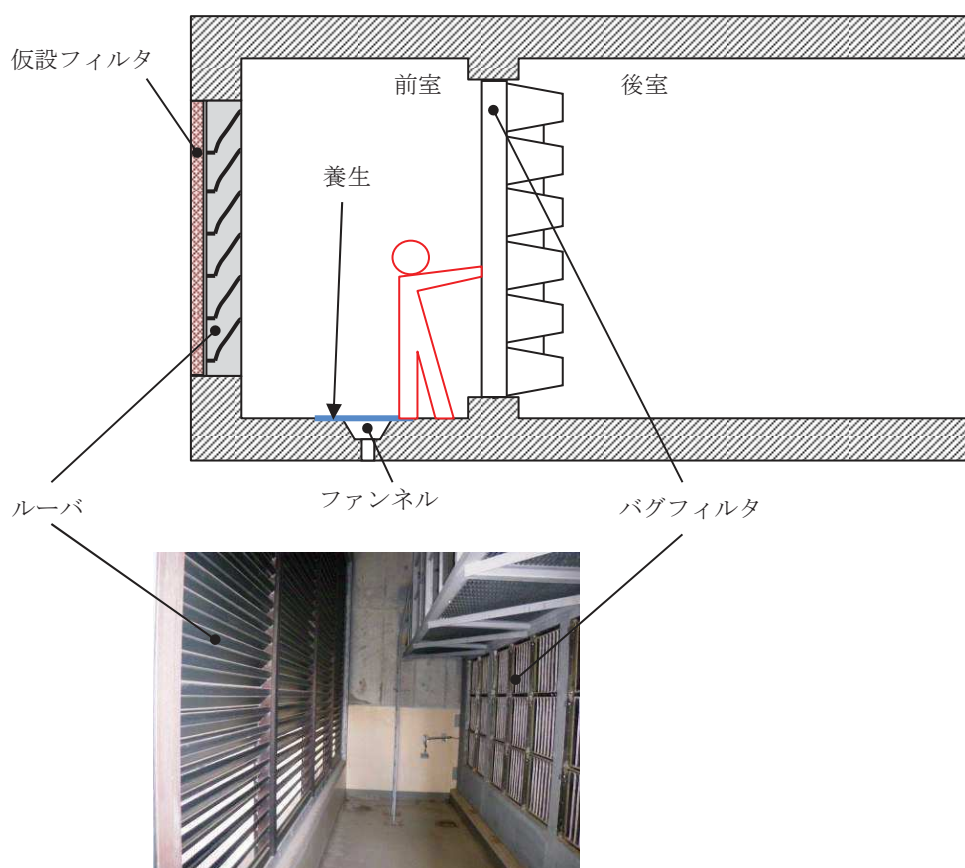


図1 バグフィルタの清掃・取替イメージ

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。

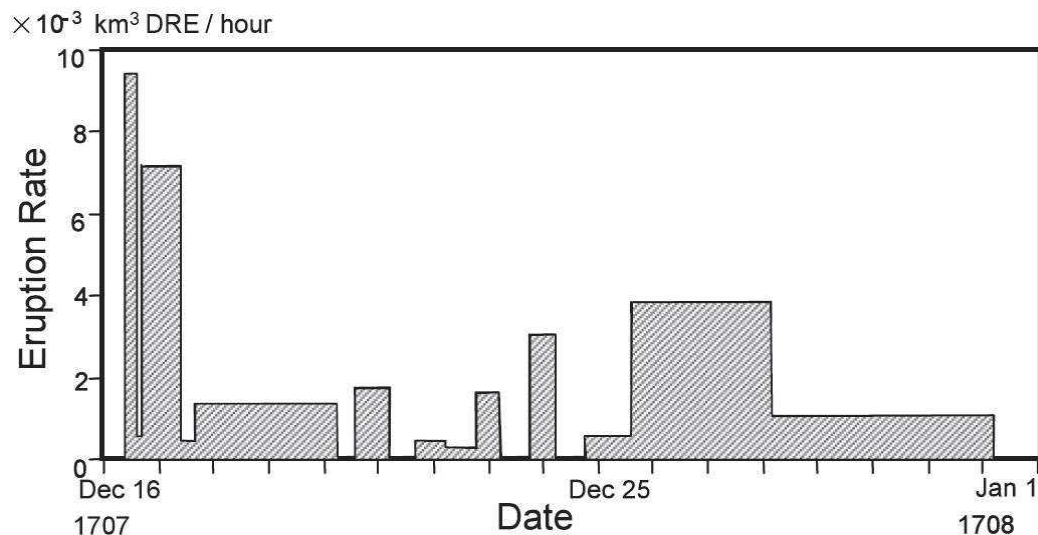


図1 富士山（宝永噴火 1707 年）の噴出率の推移（宮地・小山（2007））

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

重大事故等対処施設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。

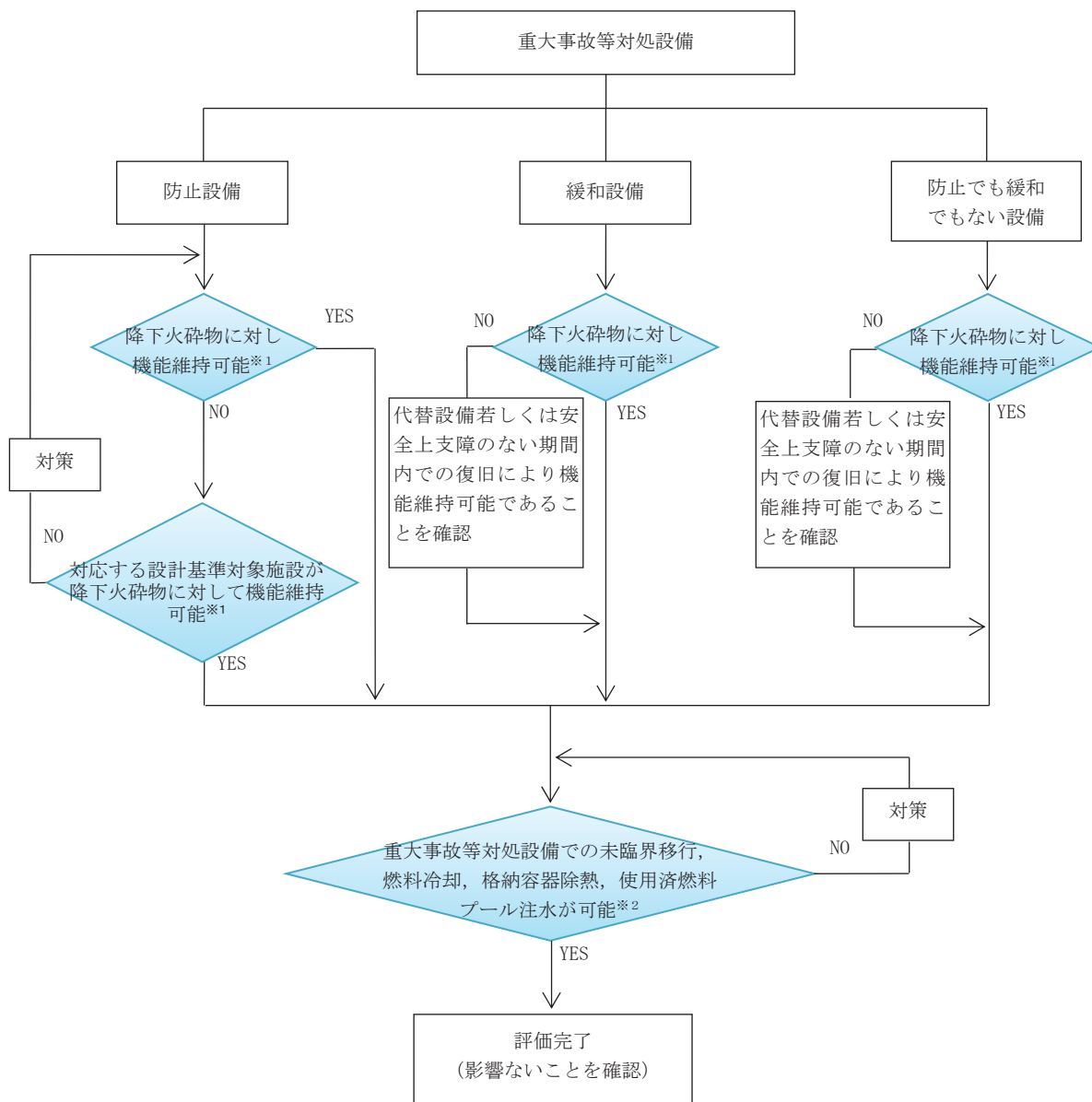
重大事故等対処設備の機能維持は、以下の方針に従い評価を実施する。

- (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、使用済燃料プール注水機能）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：ATWS 緩和設備（代替制御棒挿入機能）
- ・ 燃料冷却機能：低圧代替注水系（可搬型）
- ・ 格納容器除熱機能：原子炉補機代替冷却水系
- ・ 使用済燃料プール注水機能：燃料プール代替注水系（可搬型）

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、制御建屋、緊急時対策建屋）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施設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 (1/8)

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		
				評価	防護方法	
第 37 条 (重大事故等の拡大の防止等)	—	—	—	—	—	
第 38 条 (重大事故等対処施設の地盤)	—	—	—	—	—	
第 39 条 (地震による損傷の防止)	—	—	—	—	—	
第 40 条 (津波による損傷の防止)	—	—	—	—	—	
第 41 条 (火災による損傷の防止)	—	—	—	—	—	
第 42 条 (特定重大事故等対処施設)	特定重大事故等対処施設	→申請範囲外	—	—	—	
第 43 条 (重大事故等対処設備)	ブルドーザ	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	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)	ATWS 緩和設備 (代替制御棒挿入機能), 制御棒, 制御棒駆動機構, 制御棒駆動水圧系水圧制御ユニット, 制御棒駆動水圧系配管	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備 (代替原子炉再循環ポンプトリップ機能)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ほう酸水注入系	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備 (自動減圧系作動阻止機能)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
第 45 条 (原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	高圧代替注水系	高圧代替注水系ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉隔離時冷却系	復水貯蔵タンク	56 条に記載	—	—	
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	原子炉隔離時冷却系	復水貯蔵タンク	56 条に記載	—	—	
	高圧炉心スプレイス	高圧炉心スプレイスポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	高圧炉心スプレイス	復水貯蔵タンク	56 条に記載	—	—	
	高圧炉心スプレイス	サブプレッションチェンバ	56 条に記載	—	—	
ほう酸水注入系		44 条に記載	—	—		
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)	主蒸気逃がし安全弁, 逃がし弁機能用アキュムレータ, 自動減圧機能用アキュムレータ, 主蒸気系配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	代替自動減圧回路 (代替自動減圧機能)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備 (自動減圧系作動阻止機能)	44 条に記載		—	—	
	可搬型代替直流電源設備	57 条に記載		—	—	
	主蒸気逃がし安全弁用可搬型蓄電池	防止設備	C/B	○	建屋内	
	高圧窒素ガス供給系 (非常用)	高圧窒素ガスポンプ, 主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ, 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替高圧窒素ガス供給系	高圧窒素ガスポンプ, ホース, 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
	HPCS 注入隔離弁	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
原子炉建屋ブローアウトパネル	防止設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし (灰が積もりにくい配置)		

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (2/8)

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	
					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)	低圧代替注水系(常設)(復水移送ポンプ)	復水移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		—	—
	低圧代替注水系(常設)(直流駆動低圧注水ポンプ)	直流駆動低圧注水ポンプ, 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		—	—
	低圧代替注水系(可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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	屋外 R/B 廻り	○	影響なし(適切に除灰)
		常設箇所: 配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽(No. 1), 淡水貯水槽(No. 2)	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系(低圧注水モード)	残留熱除去系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)	残留熱除去系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	低圧炉心スプレイ系	低圧炉心スプレイ系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
原子炉補機冷却水系(原子炉補機冷却海水系を含む)		48 条に記載		—	—	
非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—	
第 48 条(最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)	原子炉補機代替冷却水系	可搬箇所: 熱交換器ユニット, 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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: 残留熱除去系熱交換器, 配管等	防止設備・緩和設備	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 R/B 廻り	○	影響なし(適切に除灰)
		貯留堰, 取水口, 取水路, 海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
	耐圧強化ベント系	配管, 弁等	防止設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	防止設備	屋外	○	影響なし(灰が積もりにくい形状)
	原子炉格納容器フィルタベント系	フィルタ装置等	50 条に記載		—	—
		淡水貯水槽(No. 1), 淡水貯水槽(No. 2)	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)		47 条に記載		—	—
	残留熱除去系(格納容器スプレイ冷却モード)		49 条に記載		—	—
	残留熱除去系(サブプレッションプール水冷却モード)		49 条に記載		—	—
	原子炉補機冷却水系(原子炉補機冷却海水系を含む)	原子炉補機冷却水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	高圧炉心スプレイ補機冷却水系(高圧炉心スプレイ補機冷却海水系を含む)	原子炉補機冷却海水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	屋外	○	影響なし(設計基準対象施設として評価)
高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ, 配管等		(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
高圧炉心スプレイ補機冷却水系(高圧炉心スプレイ補機冷却海水系を含む)	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	屋外	○	影響なし(設計基準対象施設として評価)	
	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)		—	—	
非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—	

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (3/8)

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		
				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)	原子炉格納容器代替スプレィ冷却系(常設)	復水移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		—	—
	原子炉格納容器代替スプレィ冷却系(可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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	屋外 R/B 廻り	○	影響なし(適切に除灰)
		常設箇所: 配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽(No.1), 淡水貯水槽(No.2)	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系(格納容器スプレィ冷却モード)	残留熱除去系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
	残留熱除去系(サブプレッションプール水冷却モード)	残留熱除去系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
原子炉補機冷却水系(原子炉補機冷却海水系を含む)	48 条に記載			—	—	
非常用取水設備	その他の設備に記載			—	—	
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)	代替循環冷却系	代替循環冷却ポンプ, 残留熱除去系熱交換器, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系(可搬箇所: 熱交換器ユニット, 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, ホース等)	48 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所: 残留熱除去系熱交換器, 配管等)	48 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所: 接続口, 配管等)	48 条に記載		—	—
		原子炉補機冷却水ポンプ, 配管等	48 条に記載		—	—
		原子炉補機冷却海水ポンプ, 配管等	48 条に記載		—	—
		貯留堰, 取水口, 取水路, 海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
	原子炉格納容器フィルタベント系	常設箇所: フィルタ装置, 圧力開放板, 配管, 遠隔手動弁操作設備等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		常設箇所: 配管(排気管)	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし(灰が積もりにくい形状)
		可搬箇所: 可搬型窒素ガス供給装置, 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(窒素ガス)	緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	影響なし(一方は建屋内)
		可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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(水補給)	防止設備・緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	影響なし(一方は建屋内)
		淡水貯水槽(No.1), 淡水貯水槽(No.2)	56 条に記載		—	—

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (4/8)

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		
				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注水系 (常設)	復水移送ポンプ, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		—	—
	原子炉格納容器下部注水系 (可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ (タイプ I), ホース延長回収車, 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 R/B 廻り	○	影響なし (適切に除灰)
		常設箇所: 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽 (No. 1), 淡水貯水槽 (No. 2)	56 条に記載		—	—
	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系 (常設)	復水移送ポンプ, 配管等	49 条に記載		—	—
		復水貯蔵タンク	56 条に記載		—	—
	原子炉格納容器代替スプレイ冷却系 (可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ (タイプ I), ホース延長回収車, ホース等	49 条に記載		—	—
		常設箇所: 接続口, 配管等	49 条に記載		—	—
		常設箇所: 配管等	49 条に記載		—	—
		淡水貯水槽 (No. 1), 淡水貯水槽 (No. 2)	56 条に記載		—	—
	代替循環冷却系	代替循環冷却ポンプ, 残留熱除去系熱交換器, 配管等	50 条に記載		—	—
		サブプレッションチェンバ	56 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系 (可搬箇所: 熱交換器ユニット, 大容量送水ポンプ (タイプ I), ホース延長回収車, ホース等)	48 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系 (常設箇所: 残留熱除去系熱交換器, 配管等)	48 条に記載		—	—
		原子炉補機代替冷却水系 (常設箇所: 接続口, 配管等)	48 条に記載		—	—
		原子炉補機冷却水ポンプ, 配管等	48 条に記載		—	—
		原子炉補機冷却海水ポンプ, 配管等	48 条に記載		—	—
		貯留堰, 取水口, 取水路, 海水ポンプ室	その他の設備に記載		—	—
高压代替注水系	45 条に記載		—	—		
ほう酸水注入系	44 条に記載		—	—		
低压代替注水系 (常設) (復水移送ポンプ)	47 条に記載		—	—		
低压代替注水系 (可搬型)	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)	(原子炉格納容器調気系)		(設計基準対象施設)		—	—
	可搬型窒素ガス供給装置	可搬箇所: 可搬型窒素ガス供給装置, 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 R/B 廻り	○	影響なし (一方は建屋内)
		常設箇所: 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉格納容器フィルタベント系	フィルタ装置等	50 条に記載		—	—
		フィルタ装置出口放射線モニタ, フィルタ装置出口水素濃度	58 条に記載		—	—
		淡水貯水槽 (No. 1), 淡水貯水槽 (No. 2)	56 条に記載		—	—
格納容器内水素濃度 (D/W), 格納容器内水素濃度 (S/C), 格納容器内雰囲気水素濃度, 格納容器内雰囲気酸素濃度	緩和設備		R/B	○	建屋内	
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)	静的触媒式水素再結合装置, 静的触媒式水素再結合装置動作監視装置	緩和設備		R/B	○	建屋内
	原子炉建屋原子炉棟	その他の設備に記載		—	—	
	原子炉建屋内水素濃度	緩和設備		R/B	○	建屋内

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (5/8)

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		
					評価	防護方法	
第 54 条(使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備)	燃料プール代替注水系(常設配管)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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 R/B 廻り	○	影響なし(適切に除灰)	
		常設箇所: 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内	
		淡水貯水槽(No. 1), 淡水貯水槽(No. 2)	56 条に記載		—	—	
	燃料プール代替注水系(可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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)	
		可搬箇所: ホース	防止設備	R/B	○	建屋内	
		淡水貯水槽(No. 1), 淡水貯水槽(No. 2)	56 条に記載		—	—	
	燃料プールのスプレイ系(常設配管)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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)	
		可搬箇所: スプレイノズル	緩和設備	R/B	○	建屋内	
		常設箇所: 接続口, 配管等	緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし(適切に除灰)	
		常設箇所: 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内	
	燃料プールのスプレイ系(可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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)	
		可搬箇所: スプレイノズル, ホース	緩和設備	R/B	○	建屋内	
		淡水貯水槽(No. 1), 淡水貯水槽(No. 2)	56 条に記載		—	—	
	大気への放射性物質の拡散抑制					—	—
	使用済燃料プール水位/温度(ヒートサーモ式), 使用済燃料プール水位/温度(ガイドバルブ式), 使用済燃料プール上部空間放射線モニタ(高線量, 低線量), 使用済燃料プール監視カメラ			防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	重大事故等時における使用済燃料プールの除熱	燃料プール冷却浄化系(燃料プール冷却浄化系ポンプ, 熱交換器, 配管等)		防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(可搬箇所: 熱交換器ユニット, 大容量送水ポンプ(タイプ I), ホース延長回収車, 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)
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所: 燃料プール冷却浄化系熱交換器, 配管等)		防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所: 接続口, 配管等)		防止設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし(適切に除灰)
貯留堰, 取水口, 取水路, 海水ポンプ室		その他の設備に記載		—	—		
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)	大気への放射性物質の拡散抑制(大容量送水ポンプ(タイプ II), ホース延長回収車, ホース, 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)	
	航空機燃料火災への泡消火(大容量送水ポンプ(タイプ II), ホース延長回収車, ホース, 泡消火薬剤混合装置, 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)	
	海洋への放射性物質の拡散抑制(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)	
第 56 条(重大事故等の収束に必要な水の供給設備)	復水貯蔵タンク		防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし(荷重評価, 腐食評価)	
	サブプレッションチェンバ		緩和設備	R/B	○	建屋内	
	淡水貯水槽(No. 1), 淡水貯水槽(No. 2)		—(代替淡水源)	屋外(地下)	○	影響なし	
	ほう酸水注入系貯蔵タンク		44 条に記載		—	—	
	水の供給	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプ I), 大容量送水ポンプ(タイプ II), ホース延長回収車, 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	屋外及び屋外(地下)	○	影響なし(一方は地下)
貯留堰, 取水路, 取水口, 海水ポンプ室		その他の設備に記載		—	—		

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (6/8)

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	
					評価	防護方法
第 57 条(電源設備)	常設代替交流電源設備	ガスタービン発電機	防止設備・緩和設備	屋外(緊急用電気品建屋)	○	影響なし(防護壁内)
		ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし(適切に除灰)
	可搬型代替交流電源設備	可搬箇所: 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: 電源車接続口	防止設備・緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	影響なし(一方は建屋内)
		常設箇所: 軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		常設箇所: ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		可搬箇所: タンクローリ	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)
		所内常設蓄電式直流電源設備	125V 蓄電池 2A, 125V 蓄電池 2B, 125V 充電器盤 2A, 125V 充電器盤 2B	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備	125V 代替蓄電池	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		250V 蓄電池	防止設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備	常設箇所: 125V 代替蓄電池, 125V 代替充電器盤	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		常設箇所: 250V 蓄電池, 250V 充電器盤	防止設備	C/B	○	建屋内
		可搬箇所: 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: 電源車接続口	防止設備・緩和設備	R/B 内及び屋外 R/B 廻り	○	影響なし(一方は建屋内)
		常設箇所: 軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		常設箇所: ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		常設箇所: タンクローリ	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	ガスタービン発電機接続盤, 緊急用高圧母線 2F 系, 緊急用高圧母線 2G 系, 緊急用動力変圧器 2G 系, 緊急用低圧母線 2G 系, 緊急用交流電源切替盤 2G 系, 緊急用交流電源切替盤 2C 系, 緊急用交流電源切替盤 2D 系, 非常用高圧母線 2C 系, 非常用高圧母線 2D 系	防止設備・緩和設備	R/B, 緊急用電気品建屋	○	建屋内
	非常用交流電源設備	非常用ディーゼル発電機, 燃料デイトタンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	(設計基準対象施設)	屋外(地下)	○	影響なし
		軽油タンク, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機, 燃料デイトタンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	(設計基準対象施設)	屋外(地下)	○	影響なし
	非常用直流電源設備	125V 蓄電池 2A, 125V 蓄電池 2B, 125V 充電器盤 2A, 125V 充電器盤 2B	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		125V 蓄電池 2H, 125V 充電器盤 2H	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	燃料補給設備	常設箇所: 軽油タンク, ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
可搬箇所: タンクローリ		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)	

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (7/8)

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		
				評価	防護方法	
第 58 条 (計装設備)	重大事故等時の計装 (SA 時計装一式) [原子炉圧力容器内の温度・圧力・水位] [原子炉圧力容器・原子炉格納容器への注水量] [原子炉格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・放射線量率] [未臨界の維持又は監視] [最終ヒートシンクの確保 (代替循環冷却系・原子炉格納容器フィルタベント系・耐圧強化ベント系・残留熱除去系)] [格納容器バイパスの監視] [水源の確保] [原子炉建屋内の水素濃度] [原子炉格納容器内の酸素濃度] [使用済燃料プールの監視]	防止設備・緩和設備・(設計基準対象施設)	R/B, 屋外 (地下)	○	影響なし (建屋内又は地下設置)	
	[発電所内の通信連絡]	防止でも緩和でもない設備	C/B, 緊急時対策建屋	○	建屋内	
	[温度, 圧力, 水位, 注水量の計測・監視]	防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋	○	建屋内	
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, 中央制御室待避所	(重大事故等対処施設)	C/B	○	建屋内
		中央制御室遮蔽, 中央制御室送風機, 中央制御室排風機, 中央制御室再循環送風機, 中央制御室再循環フィルタ装置, ダクト等	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		中央制御室待避所遮蔽, 中央制御室待避所加圧設備 (空気ポンプ, 配管等)	緩和設備	C/B	○	建屋内
		差圧計, 酸素濃度計, 二酸化炭素濃度計, データ表示装置 (待避所)	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
		トランシーバ (固定), 衛星電話 (固定)	62 条に記載		—	—
	照明の確保	可搬型照明 (SA)	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	被ばく線量の低減	非常用ガス処理系 (排風機, 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 (灰が積もりにくい形状)	
原子炉建屋ブローアウト閉止装置		緩和設備	R/B	○	建屋内	
第 60 条 (監視測定設備)	可搬型モニタリングポスト, 代替気象観測設備	緩和設備・防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所 (コンテナ内), 緊急時対策建屋	○	影響なし (建屋内, 適切に除灰)	
	可搬型放射線計測装置 (可搬型ダスト・よう素サンプラ, γ 線サーベイメータ, β 線サーベイメータ, α 線サーベイメータ, 電離箱サーベイメータ)	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋	○	建屋内	
	小型船舶	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰)	
	常設代替交流電源設備	57 条に記載		—	—	

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
—: 他の項目にて整理

表 1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の影響評価 (8/8)

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	
					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)	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所遮蔽, 緊急時対策建屋非常用送風機, 緊急時対策建屋非常用フィルタ装置, 配管等	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所加圧設備 (空気ポンプ, 配管等)	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		差圧計, 酸素濃度計, 二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所可搬型エアモニタ	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		可搬型モニタリングポスト	60 条に記載		—	—
	電源の確保 (緊急時対策所)	ガスタービン発電機, ガスタービン発電設備軽油タンク, ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ, ガスタービン発電機接続盤, 緊急用高圧母線 2F 系	57 条に記載		—	—
		電源車	防止設備・緩和設備	屋外緊急時対策建屋廻り及び可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰)
		緊急時対策所軽油タンク, 緊急時対策所燃料移送系配管等	防止設備・緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所用高圧母線 J 系	防止設備・緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
	必要な情報の把握	安全パラメータ表示システム (SPDS)	62 条に記載		—	—
	通信連絡 (緊急時対策所)	トランシーバ (固定), トランシーバ (携帯), 衛星電話 (固定), 衛星電話 (携帯), 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		—	—
第 62 条 (通信連絡を行うために必要な設備)	所内通信	携行型通話装置	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		トランシーバ (固定), トランシーバ (携帯)	防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋 (屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置。屋外設備は代替設備 (有線系) にて機能維持可能)
		安全パラメータ表示システム (SPDS)	緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋 (屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置。屋外設備は代替設備 (有線系) にて機能維持可能)
	所内外通信	衛星電話 (固定), 衛星電話 (携帯)	防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋 (屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置。屋外設備は灰が積もりにくい形状であるとともに, 除灰により機能維持可能)
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備, データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋 (屋外設備含む)	○	影響なし (建屋内設置。屋外設備は灰が積もりにくい形状であるとともに, 除灰により機能維持可能)
その他の設備	重大事故等時に対処するための流路, 注水先, 注入先, 排出元等	原子炉圧力容器, 原子炉格納容器, 使用済燃料プール	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉建屋原子炉棟	緩和設備	R/B	○	影響なし (設計基準対象施設として評価)
	非常用取水設備	貯留堰, 取水口, 取水路, 海水ポンプ室	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし (設計基準対象施設として評価)

○: 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, 対応する設計基準事故対処設備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る損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理

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、復水貯蔵タンク、ほう酸水貯蔵タンク、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、降下火砕物が河川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。

図1に示すとおり、河川水はまず原水タンクに受け入れられる。原水タンクに受け入れられた水は、前処理装置の除濁槽とろ過器を経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用水は純水装置を経由して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、前処理装置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、ろ過水タンク及び純水タンクにおいて水質管理も行っていることから、河川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、河川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。

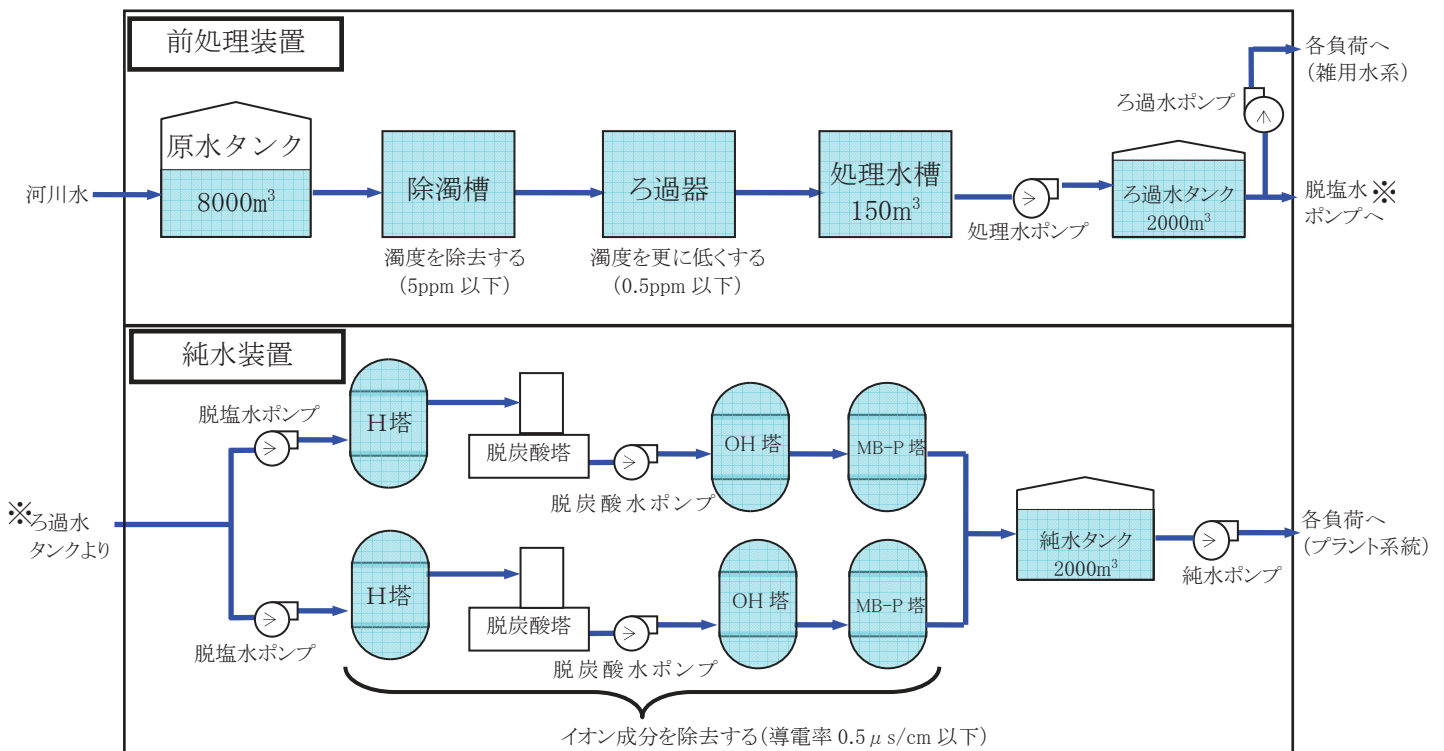


図1 外部から供給される水源の概略系統図

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 84 条の 2 第 5 項	一	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ために必要な次に掲げる事項を定め、これを要員に守らせること。	一
	イ	火山影響等発生時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。	<ul style="list-style-type: none"> ・火山灰の取り込みを抑制するために火山灰フィルタの設置等の対策を行う ・非常用ディーゼル発電機の吸気に係る既設のフィルタに対して、実際の火山灰による閉塞試験結果を踏まえて、機能維持のための対策を行う
	ロ	イ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、高圧代替注水系（HPAC）により対応する
	ハ	ロ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。	原子炉隔離時冷却系（RCIC）を用いた全交流電源喪失時の対応手順により対応する

「実用炉規則第 84 条の 2 第 5 項イ」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、非常用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。

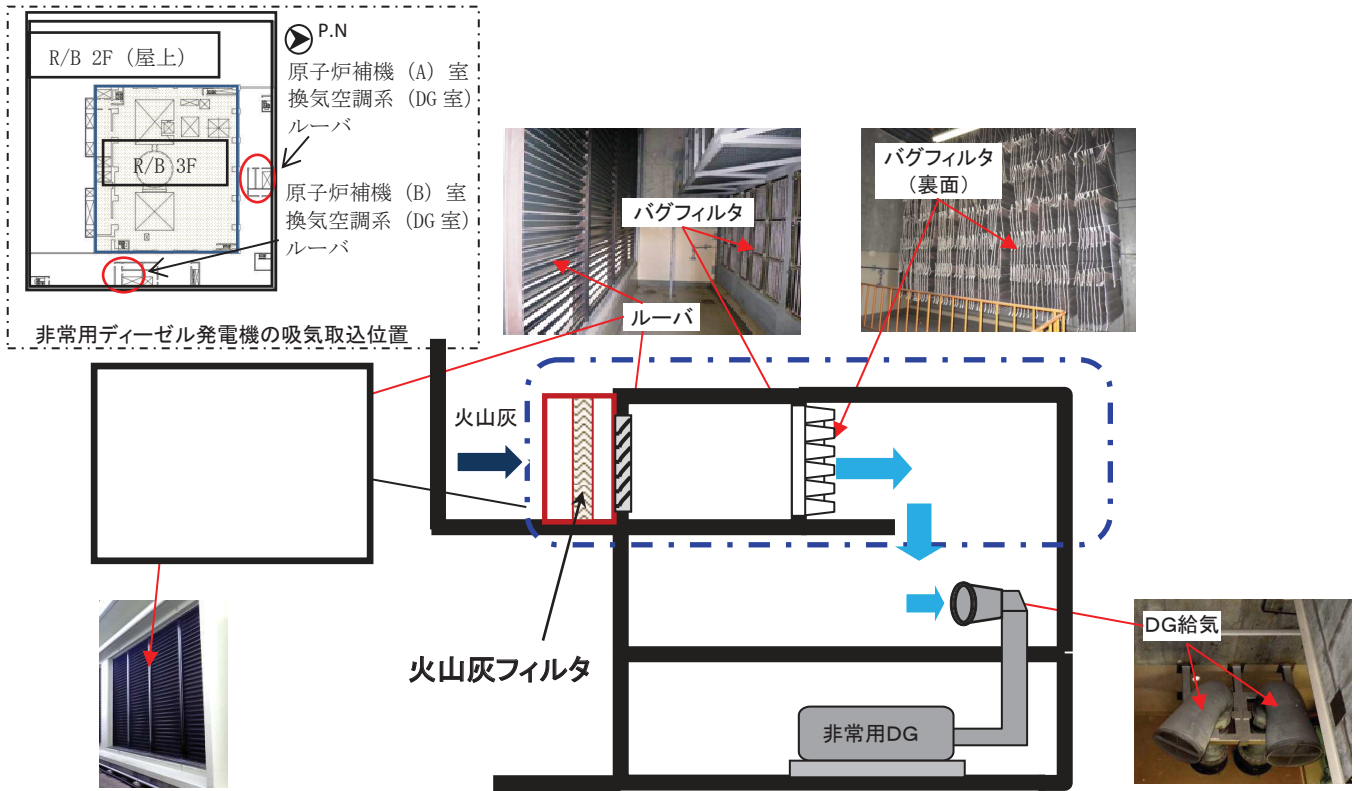


図 1 実用炉規則第 84 条の 2 第 5 項イ（非常用DGの 2 系統維持）対応案

以上

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

女川原子力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（平成 29 年 11 月 29 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

女川原子力発電所では、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毎の堆積速度と終端速度から算出される粒径毎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。女川原子力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

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

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]	15	女川原子力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]	150,000	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	
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]	2.7	(D) 式

表 2 粒径ごとの入力条件及び計算結果

粒径 i φ (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%)	2.9×10 ⁻⁵	14.0	59.0	17.0	7.9	2.2	0.26	0.032	
降灰量 W _i (g/m ²)	0.044	21,000	88,500	25,500	11,850	3,300	390	48	W _T =150,000
堆積速度 v _i (g/(s・m ²))	5.1×10 ⁻⁷	0.24	1.0	0.30	0.14	3.8×10 ⁻²	4.5×10 ⁻³	5.6×10 ⁻⁴	
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)	2.0×10 ⁻⁷	0.14	1.0	0.59	0.39	0.38	0.15	5.6×10 ⁻²	C _T =2.7

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。

降下火砕物による荷重は積雪荷重に対して、発生頻度が相対的に低い荷重が大きく、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降下火砕物による荷重（層厚 15cm）を設定する。積雪は発生頻度が主荷重（降下火砕物）と比べて相対的に高いものの、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。

2. 従荷重として組み合わせる積雪荷重の設定方法

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^{*2}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、年最大積雪深の 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。女川原子力発電所の近隣である石巻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80日（観測期間1962年～2017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0.05となる。設計基準値の積雪量を考慮した場合には、組み合わせる積雪深さは約2.2cm（43cm×0.05）と算出される。

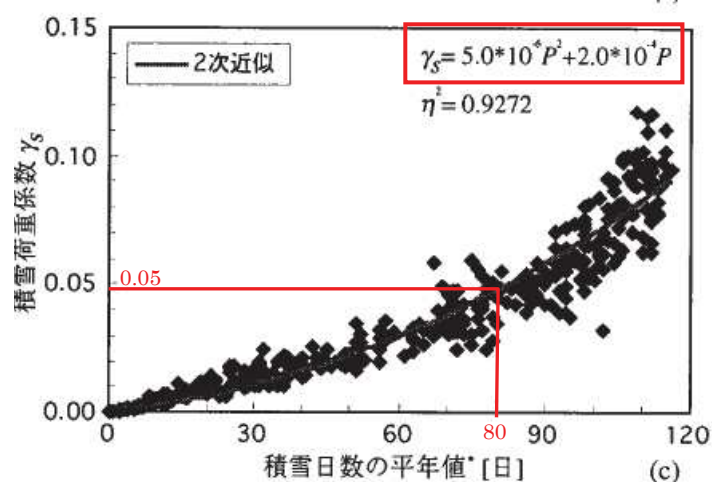


図1 積雪荷重が従となる場合に掛け合わせる荷重係数^{*2}（赤線・赤字は追記）

(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15.1cm（設計基準積雪量43cm×0.35）であることを確認した。

(3) 観測記録により年最大積雪深さ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大積雪深さの平均値を求める方法がある。女川原子力発電所の最寄りの気象観測所である石巻における年最大積雪深さの平均値は気象観測データ（観測期間：1962年～2017年）より17.0cm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大積雪深さの平均値を求めた場合（17.0cm）が最も大きな値となることを確認した。

3. 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/cm³）

に対して、同時期に想定される降雨等による荷重影響として、湿潤状態の降下火砕物の密度 ($1.5\text{g}/\text{cm}^3$) を設定し、更に 17cm の積雪荷重を組み合わせることとしている。

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、女川原子力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深さは、発電所立地の最寄りの気象観測所である石巻地域における年最大積雪深さの平均値 (17.0 cm) を採用する方針とする。

以 上

[参考文献]

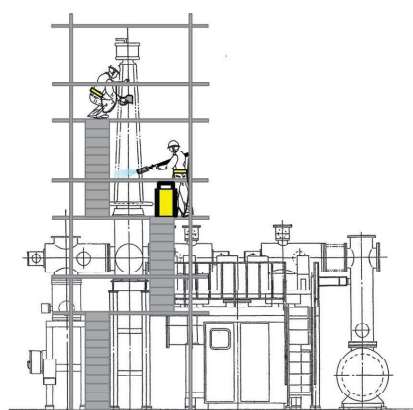
- ※1：建築物荷重指針・同解説（2015）（2章 荷重の種類と組合せ，付5.5 許容応力度設計に用いる組合せ荷重のための荷重係数）
- ※2：高橋 徹：積雪荷重の推移過程モデルに関する一考察（日本建築学会 構造工学論文集 Vol.44B（1998年3月））

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

女川原子力発電所2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日間分の非常用電源設備の燃料を有しており、軽油タンク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軽油タンク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

降灰後に外部電源を受電するため、開閉所の除灰の成立性検討を行った。GIS（ガス絶縁開閉装置）は筐体内に母線が内蔵されており降灰の影響を受けない構造となっているが、外部電源を受電する送電線引込部の碍子（ブッシング）は、降灰の影響を受ける可能性がある。ただし、降灰による汚損碍子は清掃により機能回復が可能であることから、図1のとおり足場を構築し、碍子（ブッシング）の清掃（洗浄、乾拭き）を実施する。検討の結果、開閉所の清掃作業のタイムチャートは図2のとおりである。女川原子力発電所の開閉所（5回線）については、平行作業が可能であることから、外部電源の復旧状況に合わせて清掃作業を実施する。



ウエスによる拭上げ清掃
 <降灰除去作業の例>※1

図1 碍子（ブッシング）清掃のイメージ

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

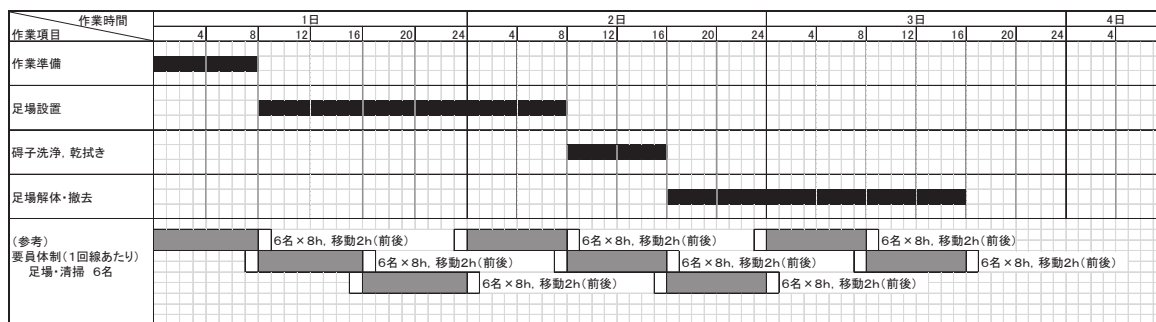


図2 碇子（ブッシング）の清掃・復旧のタイムチャート

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 15cm 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、正門ゲートから地下軽油タンク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3に示す正門ゲートから地下軽油タンクまでの燃料補給ルートに降り積もった灰を当社所有のブルドーザで道路脇へ押土する。なお、正門ゲートから地下軽油タンクまでの燃料補給ルートは2ルートあるが、距離が長いルート①(約 1.7km)で評価を行うこととする。

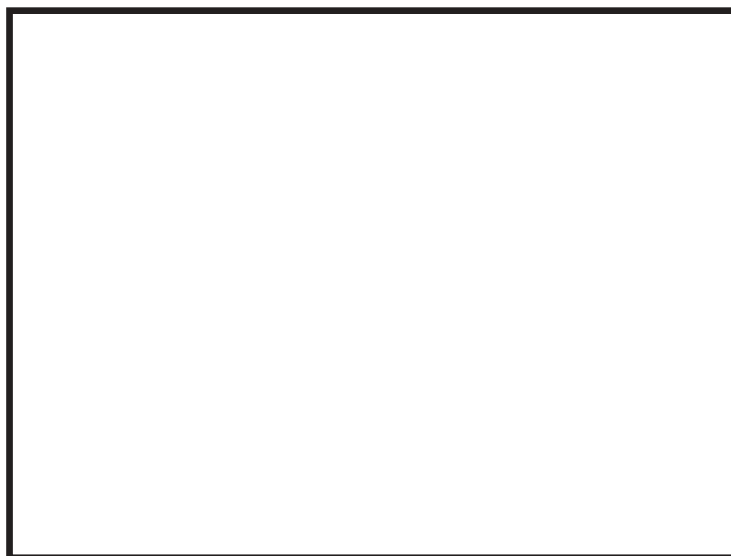


図3 燃料補給ルート

(2) 評価条件

- a. 降下火砕物条件
 - ・堆積量：15cm，密度：1.5g/cm³（湿潤密度）
- b. ブルドーザの仕様
 - ・ブレード幅：約 3.7m
 - ・速度（1速）：前進 3.3km/h，後進 4.4km/h
- c. 除灰距離
 - ・正門ゲートから地下軽油タンクまでの燃料補給ルート：1.7km

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

d. 除灰時間の算出方法

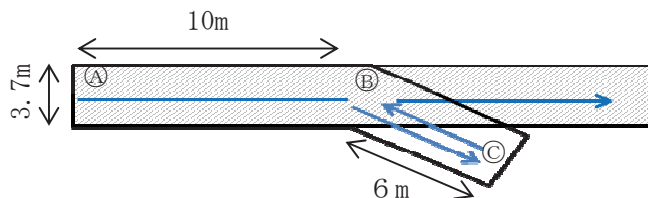
ブルドーザが降下火砕物を道路脇に押し出す作業を1サイクルとして、ブルドーザの除灰能力から、除灰速度を算出し、燃料補給ルートの除灰時間を算出する。

(3) 算出結果

作業内容		備考
①	ブルドーザの1サイクル当たりの最大押し出し可能重量	9.12 (t) 土砂撤去実証試験により確認済み
②	ブルドーザの単位長さ当たりの除灰可能重量	0.83 (t/m) ブレードの形状及び火山灰の条件により算定
③	1サイクルで除灰できる距離	10 (m) ①/②を切捨て
④	1サイクル当たりの除灰時間	0.5 (min) 注1参照
⑤	1サイクル当たりの除灰速度	1.3 (km/h) ③/④を切上げ
⑥	燃料補給ルートの距離	1.7 (km)
⑦	燃料補給ルートの除去時間	80 (min) ⑥/⑤を切上げ

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（前進3.3km/h，後進4.4km/h）で作業すると仮定して
 - A：押し出し（A→B→C）： $(10m+6m) \div 3.3km/h = 0.3 \text{ min}$
 - B：ギア切り替え： 0.1 min
 - C：後進（C→B）： $6m \div 4.4km/h = 0.09 \text{ min}$
- 1サイクル当りの作業時間(A+B+C)= $0.3+0.1+0.09 \div 0.5 \text{ min}$



(4) 燃料補給ルートの除灰成立性検討結果

除灰作業に関する作業のタイムチャートを図4に示す。記載のとおり約5時間で除灰が可能であることを確認した。

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

図4 除灰作業のタイムチャート

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、女川原子力発電所2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。東北地方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 宮城県中・北部のテフラ（火山ガラス）の主成分組成について^{※1}（赤枠は追記）

示標テフラ	試料採取地		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
愛島軽石 (K-MD)	川崎町安達	M	76.94	0.12	14.47	1.01	...	0.61	1.79	1.27	3.88	100.00
		SD	0.53	0.02	0.44	0.03	...	0.06	0.07	0.04	0.22	
肘折軽石 (Hj)	宮崎町台の原	M	77.79	0.16	12.76	1.05	...	0.44	1.09	3.10	3.61	100.00
		SD	0.77	0.05	0.38	0.01	...	0.20	0.11	0.12	0.85	
鳴子潟沼-上原 テフラ(NK-U)	鳴子町上ノ原	M	77.98	0.22	12.28	1.22	...	1.01	1.59	1.47	4.23	100.00
		SD	0.30	0.01	0.12	0.04	...	0.01	0.01	0.10	0.13	
鳴子-柳沢テ フラ(N-Y)	岩出山町安沢	M	78.11	0.17	12.98	1.28	...	0.43	1.52	1.93	3.57	99.99
		SD	0.40	0.03	0.41	0.07	...	0.08	0.05	0.04	0.12	
鳴子-荷坂テ フラ(N-N)	岩出山町安沢	M	78.01	0.12	12.93	1.29	...	37.0	1.28	1.88	4.12	100.00
		SD	0.33	0.01	0.15	0.02	...	0.03	0.03	0.04	0.34	
北原火山灰 (Kt)	一迫町十文字	M	77.61	0.07	13.37	0.61	...	0.32	0.70	3.89	3.43	100.00
		SD	0.32	0.02	0.14	0.03	...	0.05	0.03	0.05	0.33	
一迫軽石 (IcP)	一迫町十文	M	76.99	0.15	13.07	1.93	...	0.53	1.86	1.21	4.26	100.00
		SD	0.41	0.02	0.15	0.05	...	0.07	0.04	0.02	0.40	

東北地方の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成は、SiO₂が約77~78%、Al₂O₃が約12~14%、K₂Oが約1~4%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。東北地域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、カミントン閃石、磁鉄鉱及び黒雲母が含まれていることを確認した。

また、女川原子力発電所の降下火砕物の調査^{※2}では主な鉱物として（斜方・単斜）輝石、角閃石、黒雲母、磁鉄鉱を確認した。

表2 宮城県中・北部のテフラの岩相について※¹ (赤枠・赤字は追記)

示標テフラ	鉱物組成	火山ガラスの形態	屈折率
川崎スコリア (Z-K) 愛島軽石 (K-MD)	opx > cpx cum ; qt	pm	opx (γ) : 1.700-1.704 gl : 1.504-1.507 (1.505-1.506) cum (n ₂) : 1.660-1.665
鳴子潟沼-上原テフラ (NK-U)	opx > cpx = mt	pm	gl : 1.492-1.500 opx (γ) : 1.711-1.715
肘折軽石 (Hj)	opx > ho ; qt	pm	gl : 1.499-1.501 opx (γ) : 1.712-1.714 ho (n ₂) : 1.668-1.671
鳴子-柳沢テフラ (N-Y)	opx > ho, mt (bi, cpx) ; qt	pm > bw	gl : 1.501-1.503 opx (γ) : 1.717-1.722 (1.719) ho (n ₂) : 1.673-1.676
鳴子-荷坂テフラ (N-N)	opx > mt : qt	pm	gl : 1.500-1.502 (1.501) opx (γ) : 1.724-1.728
北原火山灰 (Kt)	poor (mt > opx, cum)	pm	gl : 1.499-1.502
一迫軽石 (IcP)	opx > mt	pm	opx (γ) : 1.728-1.733

鉱物組成の凡例

- opx : 斜方輝石
- ho : 角閃石
- mt : 磁鉄鉱
- qt : 石英
- cum : カミントン閃石
- bi : 黒雲母
- cpx : 単斜輝石

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、女川原子力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。

これは東北地方の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成(SiO₂:約77~78%, Al₂O₃:約12~14%, K₂O:約1~4%程度)と比較しても大きな差異がないことから、女川原子力発電所で想定する火山ガラスのモース硬度も同様に5程度と考えられる。

表3 火山ガラスの主成分組成※³ (赤枠は追記)

Chemical composition (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
72.73	13.69	1.44	0.23	1.82	0.18	3.46	3.42	0.01	0.06	3.16	100.2

表4 火山ガラスの特性^{※3} (赤枠は追記)

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

b. 鉱物結晶片

東北地方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^{※2}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、カミントン閃石、黒雲母、磁鉄鉱である。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 造岩鉱物の特徴及び硬度^{※4} (赤枠は追記)

造岩鉱物名	色調・透明度・光沢など	自形結晶の形	割れ口	モース硬度 [※]	比重
石英	無色透明, 白色半透明, ガラス光沢	複六方錐, 六角柱状	不規則	7	2.65
カリ長石	白色, 淡いピンク~黄色, 半透明, ガラス光沢	四角柱状	直方体の劈開	6	2.57
斜長石	無色透明, 白色半透明, ガラス光沢	四角柱状	直方体の劈開	6-6.5	2.6-2.8
白雲母	無色透明, 真珠光沢	六角板状	一方向に劈開	2.5-3	2.9
黒雲母	黒色不透明, 暗緑~褐色半透明, ガラス光沢	六角板状	一方向に劈開	2.5-3	2.7-3.3
角閃石	黒色不透明, 暗緑~褐色半透明, ガラス光沢	長柱状	60° /120° に斜交する劈開	3	2.8
輝石	黒色不透明, 緑色~褐色半透明, ガラス光沢	長柱状	ほぼ直交する2方向に劈開	5-6	3.2-3.5
かんらん石	緑色透明, 帯黄褐色半透明, ガラス光沢	短柱状	不規則	6.5-7	3.2-4.4
磁鉄鉱	黒色不透明, 亜金属光沢, 強磁性	八面体	不規則	5.5-6	5.2
方解石	無色透明, 白色半透明, ガラス光沢	菱面体, 六角板~柱状, 犬牙状	斜交する三方向に劈開	3	2.7
柘榴石	赤色, 黄褐色, 緑色半透明, ガラス光沢	二十四面体, 十二面体	不規則	6.5-7	3.2-4.2

表6 造岩鉱物の硬度 (抜粋) ^{※5} (赤枠は追記)

和名(英名)	晶系	理想化学組成式	色	条痕	光沢	劈開	硬度
カミントン閃石(cumingtonite)	単	(Mg, Fe) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	褐, 緑	白	ガラス	1110°	6

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

(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、女川原子力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^{※3}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°Cからガラスが転移し、軟化温度は表4に示すように 868~875°Cであることが認められた。これは東北地方の主要なテフラの火山ガラスの主成分組成 (SiO₂: 約 77~78%, Al₂O₃: 約 12~14%, K₂O: 約 1~4%程度) と比較しても大きな差異がないことから、女川原子力発電所で想定する火山ガラスの軟化温度は同様に約 860~880°C程度と考えられる。よって火山ガラスの融解温度は 860°C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 850~1125°C^{※7}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^{※7} (赤枠は追記)

火 山	噴火年	岩石名	温度 (°C)	粘性率 (P)	
三宅島	1940	玄武岩	1000	—	
三原山(伊豆大島)	1950	玄武岩	950~1100	—	
	1951	玄武岩	1125	5.6 × 10 ⁸	Minakami and Sakuma (1953)
	1951	玄武岩	1108	1.8 × 10 ⁸	
	1951	玄武岩	1083	7.1 × 10 ⁸	
	1951	玄武岩	1038	2.3 × 10 ⁸	
1946	安山岩	850~1000	—		
桜 島	1946	安山岩	1090	—	Aramaki and Katsura (1973)
	1970	安山岩	1090	—	
秋田駒ヶ岳	1945	デイサイト	1000~900	10 ⁸ ~10 ¹¹	
昭和神山	1950	玄武岩	1070	4 × 10 ⁸	} Macdonald (1954)
	1950	玄武岩	940	7 × 10 ⁸	
マウナロア(ハワイ)	1952	玄武岩	—	2 × 10 ⁸	} Macdonald and Eaton (1964)
キラウエア(ハワイ)	1955	玄武岩	1100	2 × 10 ⁸	
	1955	玄武岩	1050	2.5 × 10 ⁸	
バリクティン(メキシコ)	1945-46	玄武岩質安山岩	1070	10 ⁸ ~10 ⁹	
エトナ(イタリア)	1966	玄武岩質安山岩	1010~1020	5.1 × 10 ⁸ ~3.8 × 10 ⁸	Tonguy and Biquand (1967) Walker (1967*)
	1966	玄武岩質安山岩	—	0.4 × 10 ⁸ ~1.5 × 10 ⁸	
	1966	玄武岩質安山岩	—	—	
ヘクラ(アイスランド)	1947	安山岩	—	10 ⁸ ~10 ⁹	Einarsson (1949)
ベスピオ(イタリア)	1936	テフライト	—	7.6 × 10 ⁸	Imbb (1959)
トライデント(アラスカ)	1953	デイサイト	—	6.9 × 10 ⁸	Friedman <i>et al.</i> (1963)

以上のことから、女川原子力発電所で想定する降下火砕物の融点は 850°C以上であるとされる。火山灰の融解の影響について、非常用ディーゼル発電機のシリンダから排出される排気ガス温度が約 500°Cであり、シリンダ内の金属表面付近はシリンダ冷却水及びピストン冷却用潤滑油の効果により冷却されていることを踏まえると、火山灰は融解に至らないと考える。

以 上

[参考文献]

- ※1: 八木浩司・早田勉, 宮城県中部及び北部に分布する後期更新世広域テフラとその層位, 地学雑誌, 1989, P48 (別添資料-1)
- ※2: 第 446 回 審査会合資料(女川原子力発電所 2 号炉 火山影響評価について(コメント回答), (補足説明資料)), 2017. 2. 24, P67
- ※3: 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)
- ※4: 青木正博・目代邦康, 増補改訂版 地層の見方がわかるフィールド図鑑, 誠文堂新光社, 2017, P200
- ※5: 理科年表, 国立天文台編 第 91 冊, 平成 30 年, P668
- ※6: 小田匡寛・榎本文勇ほか, 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)
- ※7: 下鶴大輔・荒牧重雄ほか, 火山の事典 第 2 版, 朝倉書店, 2008, P147

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

東北地方のテフラを調査している文献^{*1}において、表 1 に示すようにテフラ (火山ガラス) の主元素組成を示している。本論文の著者である山形大学の八木浩司教授に主元素組成が示す酸化物の影響について確認した結果を以下に示す。

- 火山ガラスの主元素組成を示しているのは、非晶質の火山ガラスの主要元素の割合を把握することでテフラの同定もしくは、マグマ組成を推定するために非晶質の火山ガラスの主成分を分析したものであり、酸化物 (二酸化珪素, 酸化アルミニウム, 酸化カリウム等) の鉱物相が存在していることを示しているものではない。
- 降下火砕物は酸素に飽和しているため、成分分析の際に構成元素を酸化物として表示し、量比を求めているに過ぎない。

表 1 宮城県中・北部のテフラ (火山ガラス) の主成分組成について^{*1} (赤枠は追記)

示標テフラ	試料採取地		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
愛島軽石 (K-MD)	川崎町安達	M	76.94	0.12	14.47	1.01	⋯⋯	0.61	1.79	1.27	3.88	100.00
		SD	0.53	0.02	0.44	0.03	⋯⋯	0.06	0.07	0.04	0.22	
肘折軽石 (Hj)	宮崎町台の原	M	77.79	0.16	12.76	1.05	⋯⋯	0.44	1.09	3.10	3.61	100.00
		SD	0.77	0.05	0.38	0.01	⋯⋯	0.20	0.11	0.12	0.85	
鳴子潟沼-上原 テフラ(NK-U)	鳴子町上ノ原	M	77.98	0.22	12.28	1.22	⋯⋯	1.01	1.59	1.47	4.23	100.00
		SD	0.30	0.01	0.12	0.04	⋯⋯	0.01	0.01	0.10	0.13	
鳴子-柳沢テ フラ (N-Y)	岩出山町安沢	M	78.11	0.17	12.98	1.28	⋯⋯	0.43	1.52	1.93	3.57	99.99
		SD	0.40	0.03	0.41	0.07	⋯⋯	0.08	0.05	0.04	0.12	
鳴子-荷坂テ フラ (N-N)	岩出山町安沢	M	78.01	0.12	12.93	1.29	⋯⋯	37.0	1.28	1.88	4.12	100.00
		SD	0.33	0.01	0.15	0.02	⋯⋯	0.03	0.03	0.04	0.34	
北原火山灰 (Kt)	一迫町十文字	M	77.61	0.07	13.37	0.61	⋯⋯	0.32	0.70	3.89	3.43	100.00
		SD	0.32	0.02	0.14	0.03	⋯⋯	0.05	0.03	0.05	0.33	
一迫軽石 (IcP)	一迫町十文	M	76.99	0.15	13.07	1.93	⋯⋯	0.53	1.86	1.21	4.26	100.00
		SD	0.41	0.02	0.15	0.05	⋯⋯	0.07	0.04	0.02	0.40	

また、文献^{*2}においても、マグマによる火成岩をつくる珪酸塩鉱物 (表 2 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 3 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2 火成岩をつくる珪酸塩鉱物の代表例^{※2}

鉱物族名	鉱物名	化学組成
シリカ族	石英	SiO ₂
	クリストパル石	SiO ₂
長石族	斜長石	Ca ₁₋₆ Na ₀₋₁ Al ₂₋₁ Si ₂₋₃ O ₈
	カリ長石	(K, Na)AlSi ₃ O ₈
準長石族	ネフェリン	NaAlSiO ₄
雲母族	黒雲母	K(Mg, Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
	白雲母	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
角閃石族	普通角閃石	NaCa ₂ (Mg, Fe ²⁺ , Al) ₅ (Si, Al) ₈ O 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	アルマンディン	Fe ²⁺ ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂
かんらん石族	かんらん石	(Mg, Fe ²⁺) ₂ SiO ₄

表3 マグマ（火山岩）の代表的な化学組成（単位は重量%）^{※2}

	船形山 玄武岩	桜島 安山岩	昭和新山 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	3.09	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. 東北地方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^{※3}の、東北地方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、カミントン閃石、緑簾石、カンラン石、黒雲母、黒曜石、アルカリ長石であり、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-5参照)。

また、女川原子力発電所の降下火砕物の調査^{※4}では主な鉱物として(斜方・単斜)輝石、角閃石、黒雲母、磁鉄鉱を確認しており、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(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。
- 東北地方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]

- ※1：八木浩司・早田勉, 宮城県中部及び北部に分布する後期更新世広域テフラとその層位, 地学雑誌, 1989, P48 (別添資料-1)
- ※2：谷口宏充, マグマ科学への招待, 裳華房, 2001, P28-30 (別添資料-4)
- ※3：町田洋・新井房夫, 新編 火山灰アトラス[日本列島とその周辺], 東京大学出版会, 2011, P144-153 (別添資料-5)
- ※4：第 446 回 審査会合資料(女川原子力発電所 2 号炉 火山影響評価について(コメント回答), (補足説明資料)), 2017. 2. 24, P67

宮城県中部および北部に分布する 後期更新世広域テフラとその層位

八木 浩司* 早田 勉**

A stratigraphical study on the Late Pleistocene widespread tephtras occurring
in central and northern part of Miyagi Prefecture

Hiroshi YAGI* and Tsutomu SODA**

Abstract

Widespread Tephra is a valuable time marker for tephrochronology and archaeology. Several fine ash fall deposit are distributed in central and northern part of Miyagi Pref.. The authors have correlated them to widespread tephtras by means of following methods. They are lithological description of tephtras, measurements of refractive indices of glass shards and heavy minerals, and analyses of major elements chemical composition of glass shards using a microprobe analyzer. As a results, four late Pleistocene widespr ead tephtras are discovered in this study area. They are AT, Aso-4, On-PmI and Toya. The authors described the stratigraphic positions of those widespread tephtras in detail. And furthermore, they mentioned the significance that four late Pleistocene widespread tephtras were discovered in this study area. The results are summarized as follows.

1) In central part of Miyagi Pref., the stratigrafic sequence of AT ash, Kawasaki scoria layer, Aso-4 ash and Medeshima pumice layer occur in ascending order is confirmed. Kawasaki scoria and Medeshima Pumice are valuable marker tephtras in that region.

In northern part of Miyagi Pref., 10 tephtras or tephtra formations and their stratigraphic positions are recognized. They are, in ascending order, Hijiori pumice layer, Narugo・Katanuma-Uehara tephtra, AT ash, Narugo-Yanagisawa tephtra layer, Aso-4, Narugo-Nisaka tephtra layer, Kitahara ash layer, On-PmI, Toya ash and Ichihasama pumice layer. Consequently, the late Pleistocene tephtra stratigraphy in Miyagi Prefecture is linked with those in central and southwestern part of Japan.

2) The stratigraphic relation between On-PmI and Toya ash is revealed for the first time to implicate the occurrence of marine terrace developed in ca 100 ka in a tectonically active region.

* 防衛大学校・地球科学教室 Department of Geoscience, National Defense Academy

** パリノ・サーヴェイ (株) 研究所 Institute of Palynosurvey Co., Ltd.

I. はじめに

近年、後期更新世の広域テフラに関する知見が集積されてきた(町田ほか 1985, 1987ほか多数)。広域テフラは、多くの放射年代資料に加えて、本邦沿岸諸地域に発達する同地形面としての海成面及びその構成層との層序関係をもとに、汎世界的な海面変動に対応する時間スケールで噴出時期が与えられている。このため、信頼性の高い噴出時期が明らかとなった広域テフラとの層序関係から従来年代不詳のローカルな示標テフラについても、その噴出時期を推定することが可能となってきた。

宮城県内においても蔵王、鳴子、鬼首、栗駒の各火山周辺部で複数の後期更新世の示標テフラが認められてきた(表1)。それらの示標テフラの多くは、地形発達史的関心のみならず、最近宮城県内で発見の相次ぐ前期旧石器の編年学的関心から放射年代が得られている(板垣ほか 1981; 市川 1983, 1986, 1987; 興水 1983, 1986, 1987ほか多数)。しかしそれらの年代値は、ばらつきが大きいことから、信頼性に不安があった。このため宮城県に分布する示標テフラと広域テフラとの層序関係を明らかにし、それら示標テフラの層序を全国的な第四紀層序の枠組みに組み込むことが必要と考えられていた。

筆者らは、宮城県中部の仙台西部地域と北部の鬼首周辺地域(図1)においてローカルな示標テフラを

表1 宮城県中・北部の示標テフラとそれらの噴出年代

宮城県中部		宮城県北部	
テフラ	年代値	テフラ	年代値
		肘折軽石 (Hj)	9.7-10.7ka* (宇井ほか, 1973)
		鳴子潟沼-上原 (NK-U)	26ka* (庄子ほか, 1983)
始良 Tn 火山 (AT)	21-22ka*(町田・新井, 1983) 25ka*(松本ほか, 1987)	始良 Tn 火山 灰 (AT)	21-22ka*(町田・新井, 1983) 25ka*(松本ほか, 1987)
川崎スリコア (Z-K)	26-31ka*(板垣ほか, 1981) ca 30ka*(ARAI <i>et al.</i> , 1986)	鳴子-柳沢テフラ層 (N-Y)	40.6ka, 41.8ka, 43.5ka, 43.9ka**(市川, 1983) 40.3ka, 42.6ka, 44.3ka, 63.4ka*** (興水, 1983) 80.8ka*(中井, 1988)
阿蘇4火山灰 (Aso-4)	70ka**** (町田ほか, 1985)	阿蘇4火山灰 (Aso-4)	70ka**** (町田ほか, 1985)
		鳴子-荷坂テフラ層 (N-N)	72.6ka, 72.9ka**(市川, 1983) 41.4ka*(OMOTO, 1983), 50.1ka*(中井, 1988) 45.0ka**(市川, 1986) 64.0ka*** (興水, 1988)
		北原火山灰 (Kt)	
		御岳第一軽石 (On-Pm I)	80ka**** (町田ほか, 1985)
愛島軽石 (K-MD)	64ka**(市川, 1987) 54-83ka***** (佐藤, 1987) 80ka*** (興水, 1987)	洞爺火山灰 (Toya)	90-100ka**** (町田ほか, 1987)
		一迫軽石 (IcP)	124.3ka, 122.4ka**(市川, 1986) 146ka, 108ka*** (興水, 1986, 1988)

*: ^{14}C 年代 **: TL 年代 ***: FT 年代 ****: 層序年代 *****: ESR 年代

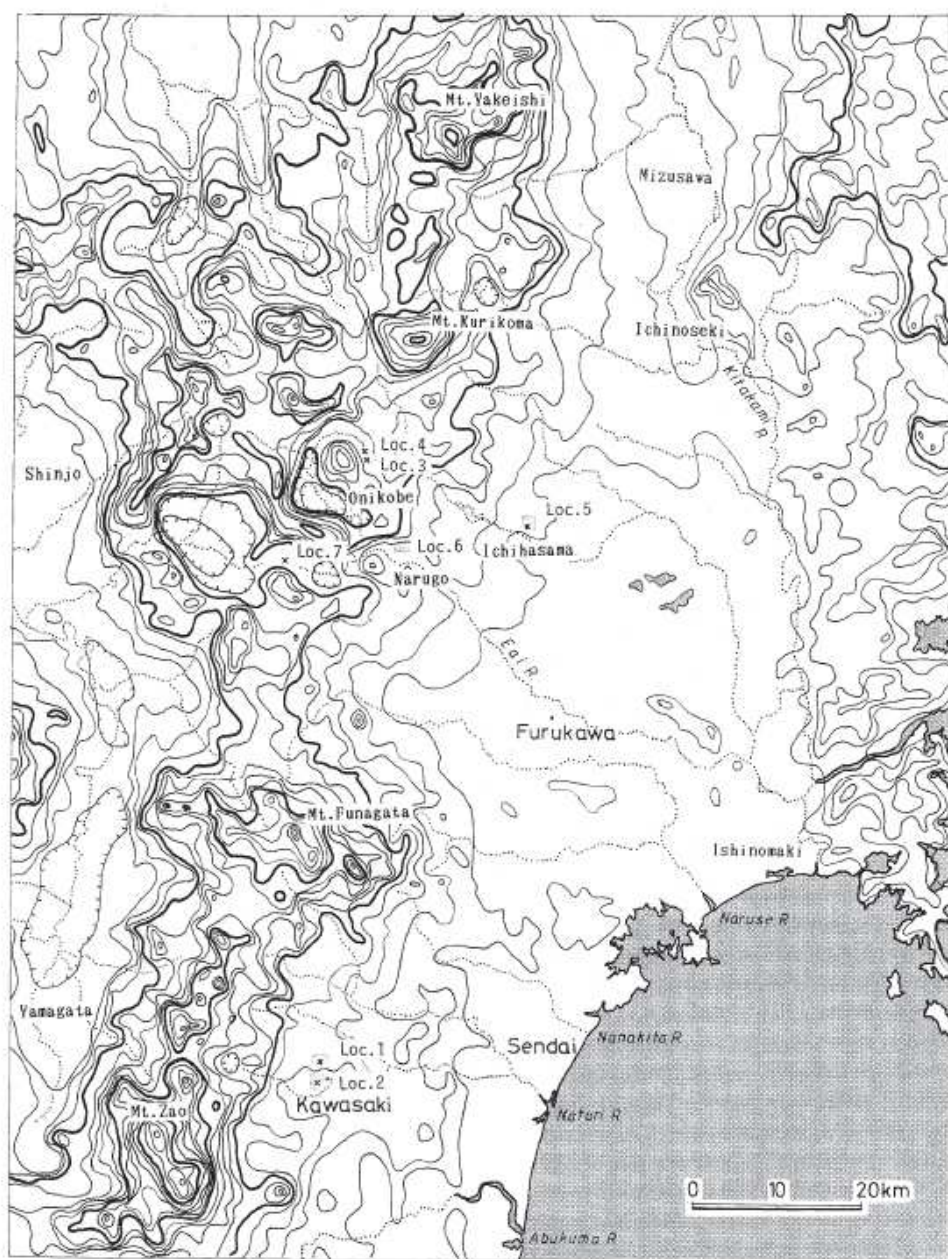


図1 宮城県中・北部及びその周辺地域の地形概観
2 km 以下の埋谷切峰面図等高線間隔は 100m

挟む地層中に、従来報告のなかった4枚の広域テフラを発見した。小論ではまずそれら広域テフラの対比の根拠とローカルな示標テフラとの層序関係を報告する。次に広域テフラの層位からみた第四紀編年上の意義についても言及する。

II. 宮城県中・北部における後期更新世の示標テフラと放射年代値

宮城県中部の仙台付近においては後期更新世の示標テフラとして、上位より川崎スコリア層、愛島（めでしま）軽石層が知られている（表1）。

川崎スコリア層は、蔵王火山起源の固結した暗褐色火山砂層である（板垣 1980）。その上下層準の ^{14}C

年代が2万6千年 B.P. および3万1千年 B.P. であることから(板垣ほか 1981), 約3万年 B.P. の降下年代が推定されている (ARAI *et al.* 1986)。

愛島軽石層は, 川崎町内に給源火口が位置する 安達火山から噴出した降下軽石で, カミングトン閃石を含む(板垣 1980, 蟹沢 1985)。愛島軽石層は, 仙台付近の台ノ原段丘より上位の段丘を覆い, 青葉山B

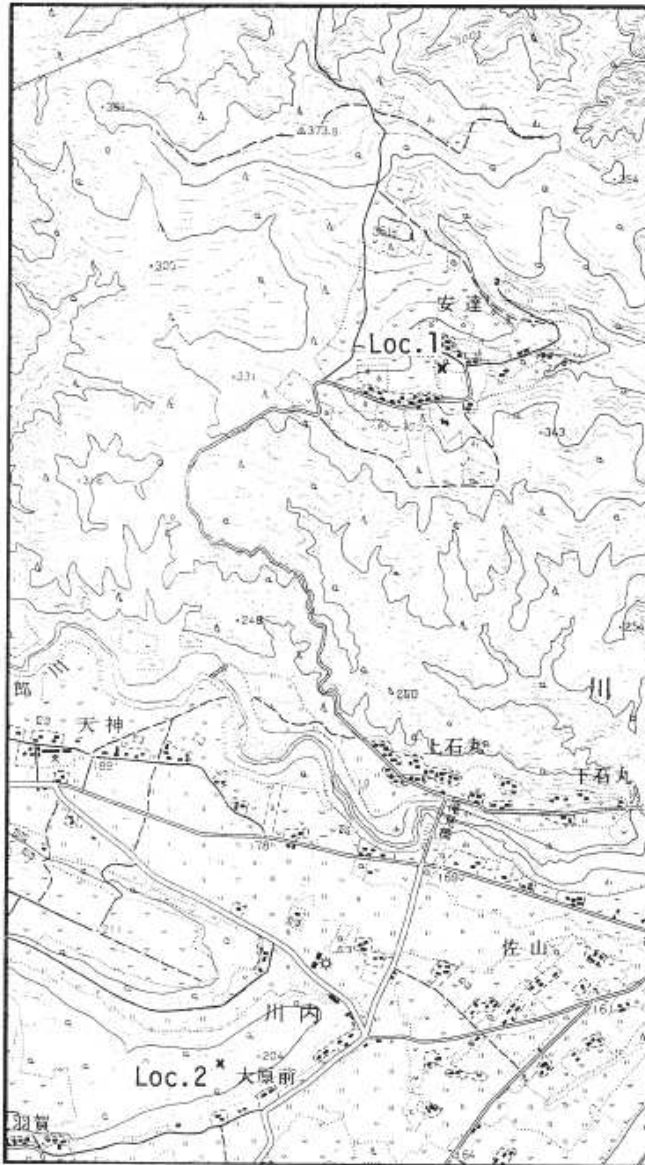


図2 宮城県中部の広域テフラ産出地点 (Loc. 1, 2) と周辺の地形

使用した地形図は, 国土院発行 1/25,000「陸前川崎」図幅 (NJ-54-21-7-2)

Loc. 1 は, 愛島軽石の給源と考えられている安達火山の中心付近に位置する。安達火山は, 仙台付近の最高位礫層である本砂金礫層 (中川ほか, 1960) の載る丘陵内に発達した軽石丘である。

Loc. 2 は, 川崎町北に発達する川内段丘 (中川ほか, 1960) 上に位置する。

遺跡において愛島軽石下位の層準から前期旧石器の出土が報告されている (須藤ほか 1985)。その年代は, 熱ルミネッセンス年代で6万4千年 B.P. (市川 1987), ESR年代で5万4千年 B.P. ~ 8万3千年 B.P. (佐藤 1987), フィッション・トラック年代で8万年 B.P. (奥水 1987) の噴出年代が得られているが(表1), 統一的な見解はなかった。

鳴子・鬼首周辺の宮城県北部においては, 後期更新世の示標テフラとして上位より肘折軽石層, 鳴子瀉沼一上原テフラ層, 鳴子一柳沢テフラ層, 鳴子一荷坂テフラ層, 北原火山灰層, 一迫軽石層 (早田 1984) が知られている (表1)。

肘折軽石層は, 山形県肘折カルデラ起源とする降下軽石 (米地・菊池 1966) で, ^{14}C 年代から約1万年 B.P. の降下とされている (宇井ほか 1973)。

鳴子瀉沼一上原テフラ層は, 鳴子火山瀉沼起源の灰白色細粒火山灰 (早田 1989) で, ^{14}C 年代から2万6千年 B.P. 以前に降下したとされてきた (庄子ほか 1983)。

鳴子一柳沢テフラ層と鳴子一荷坂テフラ層は, 鳴子カルデラ起源で火砕流堆積物および降下火山灰層・軽石層のユニットから構成される (早田 1984)。火砕流の堆積面は江合川流域に広い台地を形成する。馬場壇A遺跡において鳴子一柳沢テフラ層の上面や鳴子一柳沢テフラ層と鳴子一荷坂テフラ層に挟まれた層準に前期旧石器が出土している (東北歴史資料館・石器文化談話会 1986)。これら2つのテフラ層に対して ^{14}C 年代, 熱ルミネッセンス年代, フィッション・トラック年代からそれぞれ年代値が求められてきた(表1)。しかし鳴子一柳沢テフラ層で4万年 B.P. ~ 6万3千年 B.P. (市川 1983, 奥水 1983, 中井 1988), 鳴子一荷坂テフラ層で4万1千年 B.P. ~

7万3千年 B.P.(Omoto 1983, 市川 1983, 中井 1988) と同一テフラに対して得られた年代値に大きな幅があった。

北原火山灰層と一迫軽石層は、給源火山がともに不明であるものの宮城県北西部一帯で認めることができる灰色の細粒火山灰および降下軽石層である(早田 1988)。馬場壇A遺跡において北原火山灰層と一迫軽石層に挟まれた層準および一迫軽石層下位に前期旧石器が出土している(東北歴史資料館・石器文化談話会 1986)。一迫軽石層の熱ルミネッセンス年代、フィッシュ・トラック年代は、10万8千年 B.P. ~14万6千年 B.P. の間の値を示している(市川 1986, 奥水 1986, 1988)。

III. 宮城県中・北部に認められる細粒ガラス質火山灰

現地調査に於いては、広域テフラの可能性のある細粒ガラス質火山灰について岩相とローカルな示標テフラとの層序関係を記載した。以下地域ごとに述べる。

宮城県中部

仙台西方約 15km にある川崎町安達の露頭 Loc. 1 (図2) においては、蔵王火山起源の川崎スコリア層と安達火山を給源とする愛島軽石層に挟まれた褐色風化火山灰土中に層厚 4 cm の橙色ガラス質細粒火山灰(Kw 1) がパッチ状に認められる(図3)。川崎町川内の Loc. 2 (図2) においては、川崎スコリア層上位の褐色火山灰土中に層厚 2 cm の黄色ガラス質細粒火山灰(Kw 2) がパッチ状に認められる(図3)。

宮城県北部

鬼首の江合川最上流部(図4)には、中～細粒砂層から粘土層で構成される未固結の細粒堆積物が認められる。この細粒堆積物は、従来、鬼首湖成層(加藤・島田 1953, 小元 1964, Yamada 1972)と呼ばれてきた細粒堆積物を不整合で覆っている。この細粒堆積物を切る Loc. 3 において上下 2.5m の堆積物中に、4枚のガラス質火山灰層(上位より Onk 1-1 ~ 1-4) が挟まっている(図5)。Onk 1-1 は層厚 5 cm の桃白色火山灰層である。Onk 1-2 は層厚 4 cm の灰白色火山灰層で、下部に火山豆石が認められる。火

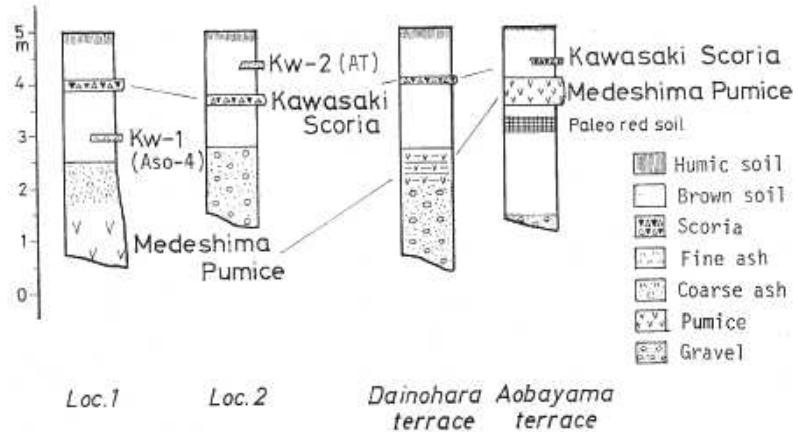


図3 宮城県中部のテフラ柱状図
台ノ原段丘および青葉山段丘の柱状図は、それぞれ仙台市鹿野と仙台市青葉山B遺跡において観察

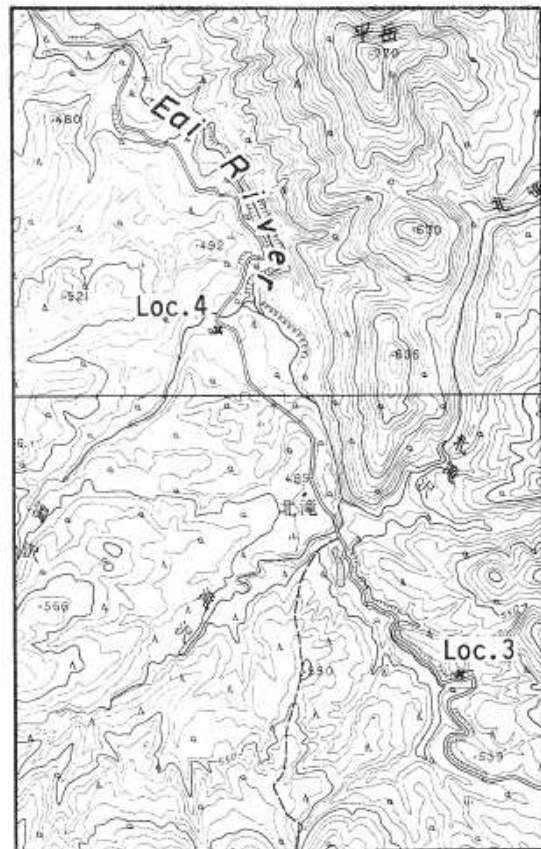


図4 鬼首における広域テフラ産出地点 (Loc. 3, 4) と周辺の地形
使用した地形図は、国土地理院発行1/25,000 「軍沢」図幅 (NJ-54-20-7-2) および「鬼首」図幅 (NJ-54-20-8-1)

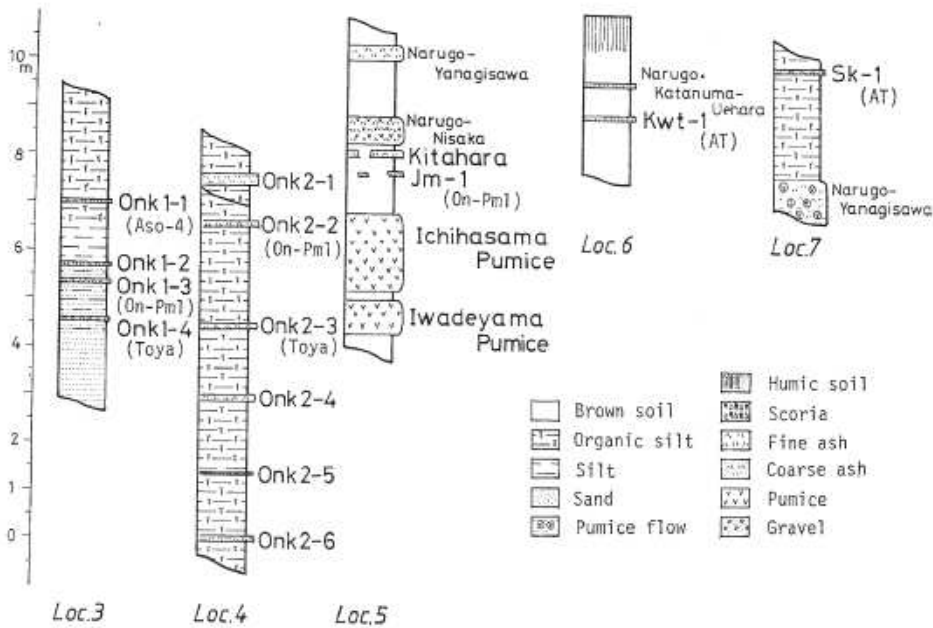


図5 宮城県北部のテフラ柱状図

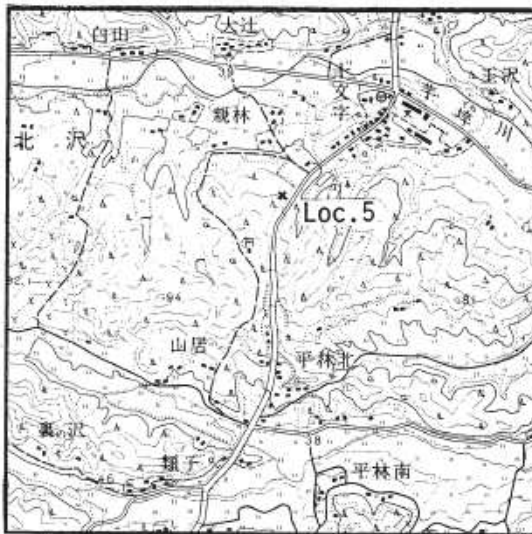


図6 一迫町十文字における広域テフラ産出地点 (Loc. 5) と周辺の地形

使用した地形図は、国土地理院発行 1/25,000 「岩ヶ崎」図幅 (NJ-54-20-4-1)

チ状に認められる (図5, 図6)。

鳴子町・川渡の東北大学付属農場北 (Loc. 6) では鳴子瀉沼一上原テフラの下位に細粒ガラス質火山灰 (Kt-1) が認められる (図5, 図7)。なお、鳴子瀉沼一上原テフラの挟まれる褐色火山灰土は黒ボク土に覆われるが、その黒ボク土直下に、約1万年 B.P. に降下した肘折軽石の降灰層準あることが知られている (庄子ほか 1983)。

鳴子の西7 km の位置にある宮城・山形県境付近の最上町堺田 (Loc. 7 : 図5, 図8) では、柳沢火砕

山豆石の最大長径は8 mm である。Onk 1-3は層厚4 cm の白色火山灰層, Onk 1-4は層厚8 cm の白色火山灰層で、ともに上部に二次堆積層をのせる。この二次堆積層には周辺に厚く分布する池月テフラ層, 花山火砕流堆積物 (早田 1988) 起源の火山ガラスを混じえる。

Loc. 3から1.5km 下流側の Loc. 4では、有機質な泥質堆積物中に6枚のガラス質細粒火山灰層 (上位より Onk 2-1~Onk 2-6) が認められる (図5)。Onk 2-1は層厚22cm の淡黄灰色の細粒砂状火山灰層で、本火山灰層を含む堆積物は、地滑り移動ブロックとして下位の層準を覆う。Onk 2-2は層厚3 cm の青灰色火山灰層である。Onk 2-3は層厚10cm の白色火山灰層である。Onk 2-4, Onk 2-5およびOnk 2-6はそれぞれ層厚1~2 cm の灰白色火山灰層である。

鬼首から東へ約10km 離れた一迫町十文字付近の Loc. 5では北原火山灰層と一迫軽石層に挟まれた褐色火山灰土中に細粒ガラス質火山灰 (Jm-1) がパッ

流堆積物を不整合に覆う泥炭層中に、層厚 3 cm の白色細粒 ガラス 質火山灰層 (Sk-1) が認められる。

IV. 細粒ガラス質火山灰の広域テフラへの対比

広域テフラは、珪長質マグマに由来する巨大火砕流やプリニー式噴火などの多量の本質物質の噴火に起源を持ち、遠隔地にまで達する細粒の火山ガラスを主体とする(町田・新井 1983)。このため広域テフラの対比・同定に際して、火山ガラスの形態的特徴の記載、屈折率測定及び主成分分析は有効な手法となる。本報告ではこれらの手法を用いて、採取した細粒ガラス質火山灰の対比・同定を行った。なお、火山ガラスの屈折率は群馬大学の新井房夫先生にお願いした。火山ガラスの主成分分析では、東北大学理学部青木研究室のエネルギー分散型EPMA(日立X560S・Kevex-Quantex 7000)を使用させていただいた。このEPMAは、標準試料分析や多くの鉱物試料に対するトータル・ストイキオメトリの点検から分析値の信頼性・再現性が確認されている(東北大学理学部岩鉱教室藤巻和宏博士談)。

主成分分析に供した火山ガラスは、火山灰を超音波洗浄器で水洗いし、風化物を除去したのち粒径 0.088-0.125mm のものについて実体顕微鏡下で直接分離した。分離した火山ガラスは、エポキシ樹脂で固定・研磨・炭素被膜の蒸着の後、加速電圧 20 KV、ビーム電流 2×10^{-10} A、ビーム径約 $2 \mu\text{m}$ で 1 試料につき 10 粒子ずつ分析した。1 粒子あたりの計測時間は 400~500 秒である。

上述の細粒ガラス質火山灰について行った岩相記載、屈折率測定、主成分分析の測定・分析結果を表 2、表 3 に示した。主成分組成の各分析値は、10 粒子の平均値ですべて無水に換算したものにその標準偏差とともに記してある。一部の試料を除いて以下の理由から MnO を除いた分析結果を示した。なぜなら、分析に供した火山ガラス中の MnO の含有率は低く (0.1% 以下)、その変異係数 (山田・庄司 1983) も大きいことから MnO が対比の鍵となりに

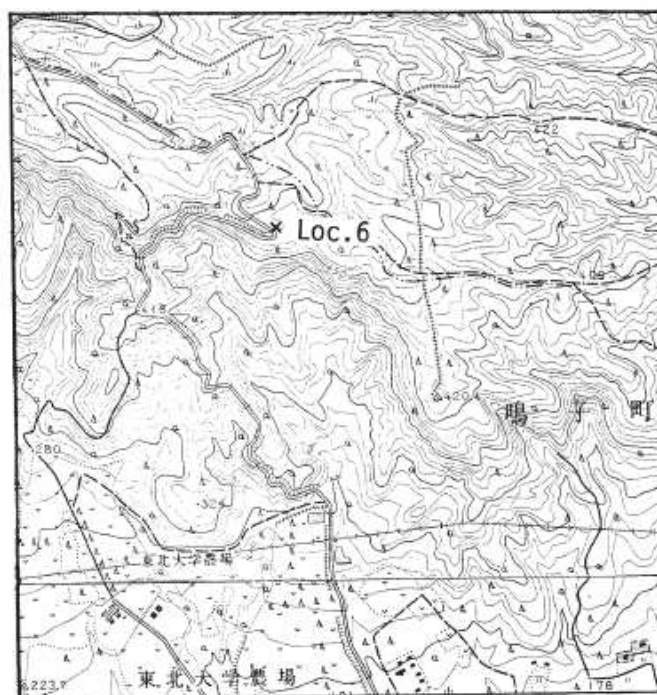


図7 鳴子町川度における広域テフラの産出地点 (Loc. 6) と周辺の地形

使用した地形図は、国土地理院発行 1/25,000 「花山湖」図幅 (NJ-54-20-4-1) および「川度」図幅 (NJ-54-20-4-2) Loc. 6 は、小元 (1966) の三条面上に位置する。

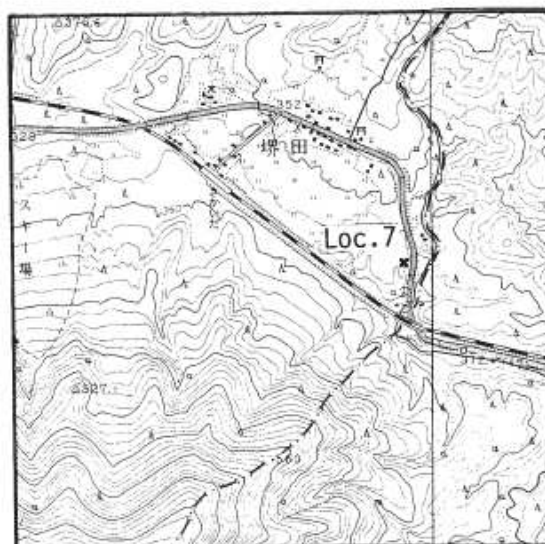


図8 宮城・山形県境・塚田における広域テフラの産出地点 (Loc. 7) と周辺の地形

使用した地形図は、国土地理院発行 1/25,000 「鳴子」図幅 (NJ-54-20-8-2) および「羽前赤倉」図幅 (NJ-54-20-8-4)

表 2 細粒ガラス質火山灰の岩相記載

	露頭位置	テフラ	鉱物組成	火山ガラスの特徴	屈折率
中部	Loc. 1 (川崎町安達)	Kw-1	vitric (ho, mt, opx)	bw 含有色ガラス	gl : 1.507-1.510
	Loc. 2 (川崎町川内)	Kw-2	vitric	bw > pm	gl : 1.499-1.501
北部	Loc. 3 (鳴子町鬼首)	Onk1-1	vitric (ho, opx, au)	bw 含有色ガラス	gl : 1.509-1.512
		Onk1-2	vitric (opx)	pm	gl : 1.500-1.502
		Onk1-3	vitric (bi > ho, opx)	pm	gl : 1.500-1.503
		Onk1-4	vitric	pm > bw	gl : 1.496-1.498
	Loc. 4 (鳴子町鬼首)	Onk2-1	vitric (opx, ho, bi)	pm	gl : 1.502-1.505
		Onk2-2	vitric (bi > ho, opx)	pm	gl : 1.500-1.503
		Onk2-3	vitric	pm < bw	gl : 1.496-1.498
		Onk2-4	vitric	pm	gl : 1.527-1.530
		Onk2-5	qt, pl (opx)	pm	gl : 1.505-1.508
		Onk2-6	qt, pl (opx)	pm	gl : 1.505-1.508
	Loc. 5 (一迫町十文字)	Jm-1	vitric (opx, bi)	pm	gl : 1.502-1.504
	Loc. 6 (鳴子町川度)	Kwt-1	vitric (opx, au, mt)	bw > pm	gl : 1.499-1.501 (1.500)
	Loc. 7 (最上町堺田)	Sk-1	vitric	bw > pm	gl : 1.499-1.501 (1.500)

くいからである。さらに、エネルギー分散型 EPMA の特性として、含有率が 0.1% 以下と低い成分について精度の高い測定には計測時間を長く取る必要があり、限られた分析機器借用時間内での効率を考慮したからである。

これらの細粒ガラス質火山灰を対比するため、宮城県中・北部の示標テフラおよび後期更新世の広域テフラ¹⁾の岩相記載と主成分組成を表に示した(表 4, 5, 6, 7)。テフラの岩相記載は、新井・町田(1980)、町田ほか(1984)、町田(1986)、Arai *et al.* (1986) に従った。主成分組成は筆者らのオリジナルなデータで、上記の方法で分析した。表に示した各テフラの主成分組成は、一部のものを除いてそれぞれ固有の組成を示す(表 5, 7)。各成分とも組成が類似する鳴子-柳沢テフラ層と鳴子-荷坂テフラ層および恵庭-a 軽石と支忽降下軽石-1 の 2 組についても、各テフラの鉱物組成や鉱物の屈折率を比較すれば同定可能である(表 4, 6)。このようにテフラの同定に際して、岩相と主成分組成を組み合わせることが有効と考え作業を進めた。その結果、始良 Tn 火山灰(AT)、阿蘇 4 火山灰(Aso-4)、御岳第 1 軽石(On-Pm1)、洞爺火山灰(Toya)に対比されるテフラを認めることができた。以下各広域テフラに対比される細粒ガラス質火山灰(試料名)と対比の根拠を述べる。

始良 Tn 火山灰(AT)

Kw-2, Kwt-1, Sk-1 は、屈折率が 1.499-1.501 の薄いバブルウォール型火山ガラスからなる。主成分組成は SiO₂ が 77.5~78.0%, K₂O+Na₂O が 7% と高く、TiO₂ が 0.09~0.11%, Al₂O₃ が 12.91~13.16% と低い。このためこれらの火山灰は始良 Tn 火山灰(AT) に対比される。

阿蘇 4 火山灰(Aso-4)

Kw-1 および Onk 1-1 は、ともに有色のバブルウォール型火山ガラスを含み、火山ガラスの屈折率は

表 3 細粒火山灰 (火山ガラス) の主成分組成

テフラ		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
Kw-1	M	72.70	0.35	15.62	1.44	0.04	0.54	1.09	4.76	3.46	100.00
	SD	0.22	0.02	0.17	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.32	
Kw-2	M	77.27	0.09	12.87	1.05	……	0.47	1.09	3.42	3.75	100.00
	SD	0.31	0.01	0.12	0.04	……	0.01	0.01	0.13	0.10	
Onk1-1	M	71.78	0.37	15.50	1.46	0.06	0.55	1.05	4.89	4.34	100.00
	SD	0.18	0.02	0.14	0.03	0.02	0.02	0.03	0.09	0.18	
Onk1-2	M	78.36	0.08	13.17	1.12	……	0.31	1.04	1.96	3.96	100.00
	SD	0.22	0.01	0.08	0.05	……	0.06	0.13	0.09	0.22	
Onk1-3	M	75.44	0.18	13.91	1.09	……	0.57	1.32	3.82	3.67	100.00
	SD	0.80	0.02	0.44	0.06	……	0.12	0.10	0.14	0.34	
Onk1-4	M	78.26	0.07	13.43	0.79	……	0.28	0.40	2.97	3.79	99.99
	SD	0.53	0.03	0.06	0.04	……	0.01	0.01	0.10	0.61	
Onk2-1	M	75.84	0.05	14.45	0.45	……	0.38	0.66	4.12	4.06	100.01
	SD	0.29	0.02	0.12	0.04	……	0.05	0.03	0.08	0.36	
Onk2-2	M	75.14	0.12	14.32	0.89	……	0.46	1.42	3.66	3.98	99.99
	SD	0.45	0.02	0.30	0.05	……	0.02	0.28	0.14	0.13	
Onk2-3	M	78.17	0.06	13.55	0.84	……	0.33	0.39	2.97	3.70	100.01
	SD	0.50	0.01	0.08	0.04	……	0.05	0.02	0.11	0.47	
Onk2-4	M	70.17	0.56	15.43	3.83	……	1.41	3.74	1.02	3.84	100.00
	SD	0.60	0.03	0.19	0.13	……	0.14	0.11	0.05	0.56	
Onk2-5	M	76.50	0.16	13.59	1.96	……	0.64	2.00	1.25	3.91	100.01
	SD	0.85	0.02	0.29	0.63	……	0.29	0.36	0.08	0.20	
Onk2-6	M	76.78	0.15	14.03	1.70	……	0.50	2.05	1.17	3.61	99.99
	SD	0.29	0.02	0.03	0.15	……	0.06	0.07	0.05	0.51	
Jm-1	M	75.54	0.20	13.95	1.11	……	0.57	1.36	3.78	3.49	100.00
	SD	0.17	0.02	0.22	0.02	……	0.05	0.03	0.07	0.32	
Kwt-1	M	77.24	0.10	12.91	1.13	……	0.36	1.02	3.58	3.66	100.00
	SD	0.29	0.02	0.11	0.08	……	0.04	0.03	0.09	0.28	
SK-1	M	78.26	0.11	13.12	1.22	0.03	0.34	1.12	3.32	2.47	99.99
	SD	0.34	0.02	0.13	0.04	0.01	0.05	0.02	0.21	0.23	

1 試料あたり10粒子の平均値と標準偏差 M: 平均値 SD: 標準偏差

1.509-1.512 と非常に高い。主成分組成は、SiO₂ が72%前後と低い。これに対し TiO₂ が0.35~0.37%、Al₂O₃ が15.5~15.62%、K₂O+Na₂O が9%以上と高い。特に K₂O が4.8%前後と分析試料中最も高い。以上の特徴から、これらは阿蘇4火山灰 (Aso-4) に対比される。

御岳第1軽石 (On-Pml)

Onk1-3, Onk2-2, Jm-1は、黒雲母、角閃石および繊維状軽石型火山ガラスを含む火山灰である。火山ガラスの屈折率は1.502-1.504である。主成分組成は、SiO₂ が75%強、MgO と CaO がそれぞれ0.5%および1.4%前後と中間的な値を示すことに対し、Al₂O₃ が14%前後、K₂O+Na₂O が7~7.5%前後と高めである。以上の特徴から、これらは御岳第1軽石 (On-Pml) に対比される。

洞爺火山灰 (Toya)

Onk1-4, Onk2-3は、屈折率1.496-1.498の繊維束状の軽石型および少量のバブルウォール型火山

表 4 宮城県中・北部の示標テフラの岩相記載

示標テフラ	鉱物組成	火山ガラスの形態	屈折率
川崎スコリア (Z-K) 愛島軽石 (K-MD)	opx > cpx cum ; qt	pm	opx (γ) : 1.700-1.704 gl : 1.504-1.507 (1.505-1.506) cum (n_2) : 1.660-1.665
鳴子潟沼-上原テフラ (NK-U)	opx > cpx = mt	pm	gl : 1.492-1.500 opx (γ) : 1.711-1.715
肘折軽石 (Hj)	opx > ho ; qt	pm	gl : 1.499-1.501 opx (γ) : 1.712-1.714 ho (n_2) : 1.668-1.671
鳴子-柳沢テフラ (N-Y)	opx > ho, mt (bi, cpx) ; qt	pm > bw	gl : 1.501-1.503 opx (γ) : 1.717-1.722 (1.719) ho (n_2) : 1.673-1.676
鳴子-荷坂テフラ (N-N)	opx > mt : qt	pm	gl : 1.500-1.502 (1.501) opx (γ) : 1.724-1.728
北原火山灰 (Kt)	poor (mt > opx, cum)	pm	gl : 1.499-1.502
一迫軽石 (IcP)	opx > mt	pm	opx (γ) : 1.728-1.733

ARAI *et al.* (1986) による

表 5 宮城県中・北部の示標テフラ (火山ガラス) 主成分組成

示標テフラ	試料採取地		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
愛島軽石 (K-MD)	川崎町安達	M	76.94	0.12	14.47	1.01	....	0.61	1.79	1.27	3.88	100.00
		SD	0.53	0.02	0.44	0.03	....	0.06	0.07	0.04	0.22	
肘折軽石 (Hj)	宮崎町台の原	M	77.79	0.16	12.76	1.05	....	0.44	1.09	3.10	3.61	100.00
		SD	0.77	0.05	0.38	0.01	....	0.20	0.11	0.12	0.85	
鳴子潟沼-上原テフラ (NK-U)	鳴子町上ノ原	M	77.98	0.22	12.28	1.22	....	1.01	1.59	1.47	4.23	100.00
		SD	0.30	0.01	0.12	0.04	....	0.01	0.01	0.10	0.13	
鳴子-柳沢テフラ (N-Y)	岩出山町安沢	M	78.11	0.17	12.98	1.28	....	0.43	1.52	1.93	3.57	99.99
		SD	0.40	0.03	0.41	0.07	....	0.08	0.05	0.04	0.12	
鳴子-荷坂テフラ (N-N)	岩出山町安沢	M	78.01	0.12	12.93	1.29	....	37.0	1.28	1.88	4.12	100.00
		SD	0.33	0.01	0.15	0.02	....	0.03	0.03	0.04	0.34	
北原火山灰 (Kt)	一迫町十文字	M	77.61	0.07	13.37	0.61	....	0.32	0.70	3.89	3.43	100.00
		SD	0.32	0.02	0.14	0.03	....	0.05	0.03	0.05	0.33	
一迫軽石 (IcP)	一迫町十文	M	76.99	0.15	13.07	1.93	....	0.53	1.86	1.21	4.26	100.00
		SD	0.41	0.02	0.15	0.05	....	0.07	0.04	0.02	0.40	

1 試料あたり10粒子の平均値と標準偏差 M: 平均値 SD: 標準偏差

ガラスを含む。主成分組成は、SiO₂ が78%と高く、TiO₂ が0.06%、MgO が0.2%、FeO と CaO が1%以下と他の火山灰に比べ低い。2.9%程度の K₂O に比べ Na₂O が3.7%強と高い。以上の特徴からこれらは洞爺火山灰 (Toya) に対比される。

なお、Onk 1-2 は火山豆石を含むことから給源が近いローカルなテフラと予想された。火山ガラスの主成分組成では、SiO₂ が78%と高く、K₂O が2%以下と低いことから鳴子-柳沢テフラ層あるいは鳴子-荷

表 6 広域テフラの岩相記載

広域テフラ	鉱物組成	火山ガラスの形態	屈折率
十和田 a 火山灰 (To-a)	pl; opx; cpx	pm >> bw	gl: 1.496-1.504 opx (γ): 1.706-1.708
十和田-中振火山灰 (To-Cu)	opx > cpx	pm	gl: 1.501-1.512 opx: 1.705-1.708 (1.707)
鬼界-アカホヤ火山灰 (K-Ah)	pl; opx, cpx, (ho, qt)	bw > pm	gl: 1.508-1.514 opx (γ): 1.709-1.712
恵庭-a 軽石 (En-a)	opx, cpx	pm	gl: 1.496-1.500 opx: 1.710-1.715 (1.713)
始良-Tn 火山灰 (AT)	pl; opi, cpx, (ho, qu)	bw > pm	gl: 1.498-1.501 opx (γ): 1.728-1.734
支忽降下軽石 1 (Spfa1)	opx > cpx, ho (ol)	pm	gl: 1.501-1.505 opx: 1.729-1.735 (1.715-1.724) ho: 1.688-1.691
大山-倉吉軽石 (DKP)	pl; ho, opx, bi	pm	opx (γ): 1.702-1.708
阿蘇 4 火山灰 (Aso-4)	pl; ho, opx, cpx	bw > pm	gl: 1.506-1.514 opx (γ): 1.699-1.701 ho (n_2): 1.685-1.691
鬼界-葛原火山灰 (K-Tz)	pl, qt; opx, cpx	bw > pm	gl: 1.496-1.500 opx (γ): 1.705-1.709
御岳第 1 軽石 (On-Pm I)	ho, bi, (opx) (Rhyoritic)	pm	gl: 1.501-1.503 opx (γ): 1.706-1.711 (1.708) ho (n_2): 1.681-1.690
阿多火山灰 (Ata)	pl; opx, cpx	bw > pm	gl: 1.508-1.513 opx (γ): 1.704-1.708
洞爺火山灰 (Toya)	pl, qt; opx	pm > bw	gl: 1.494-1.497 opx (γ): 1.756-1.761
阿蘇 3 火山灰 (Aso-3)	pl, cpx, opx	pm, bw	gl: 1.516-1.518

新井・町田 (1980), 町田ほか (1984), 町田 (1986) および ARAI *et al.* (1986) による

坂テフラ層の可能性が考えられた。しかし Onk 1-2 は、角閃石を含まないことおよび斜方輝石の屈折率から鳴子-荷坂テフラ層に対比された。Onk 2-1, Onk 2-4 に対比されるテフラは見いだせなかった。Onk 2-5, 6 は、化学組成からいずれも一迫軽石層に一致するが、上位の Onk 2-5 は再堆積物質と考えられる。

V. 宮城県中・北部に認められる広域テフラの層位と第四紀後期編年上の意義

以上のように後期更新世の広域テフラに対比された各細粒ガラス質火山灰について、その産出層位をまとめれば以下のようなになる (図 9)。

始良 Tn 火山灰 (AT) は、宮城県中部で川崎スコリア層の上位に、同北部で鳴子潟沼-上原テフラ層の下位²⁾、鳴子-柳沢テフラ層の上位に挟在する (図 9)。

阿蘇 4 火山灰 (Aso-4) は、宮城県中部で川崎スコリア層の下位、愛島軽石層の上位に挟まれ³⁾、同北部では鳴子-柳沢テフラ層の下位、鳴子-荷坂テフラ層の上位に認められる (図 9)。鳴子-荷坂テフラ層の

表 7 広域テフラ（火山ガラス）の主成分組成

広域テフラ	試料採取地		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
十和田 a 火山灰 (To-a)	十和田湖町 睡蓮沼	M	75.94	0.33	13.45	1.80	……	0.62	2.14	1.41	4.30	100.01
		SD	0.25	0.03	0.05	0.04	……	0.04	0.06	0.02	0.30	
十和田-中振火 山灰 (To-Cu)	十和田湖町 宇樽部	M	74.98	0.40	14.11	2.31	……	0.90	2.79	1.32	3.40	100.01
		SD	0.43	0.03	0.15	0.13	……	0.08	0.14	0.04	0.44	
鬼界-アカホヤ 火山灰 (K-Ah)	西之表市 島間	M	74.88	0.51	12.98	2.46	……	0.49	2.04	2.77	3.87	99.99
		SD	0.25	0.02	0.16	0.06	……	0.02	0.10	0.03	0.22	
恵庭-a 軽石 (En-a)	日高町三岡	M	77.65	0.11	13.06	1.38	……	0.43	1.41	2.54	3.31	99.99
		SD	0.25	0.02	0.15	0.02	……	0.07	0.03	0.07	0.26	
始良-Tn 火山灰 (AT)	入戸火砕流	M	77.40	0.10	12.98	1.20	0.05	0.34	1.12	3.43	3.38	100.00
		SD	0.30	0.02	0.14	0.03	0.02	0.04	0.02	0.08	0.23	
支忽降下軽石 (Spfa 1)	門別町富川	M	77.52	0.15	13.08	1.38	……	0.36	1.41	2.57	3.53	100.00
		SD	0.29	0.02	0.09	0.02	……	0.03	0.03	0.06	0.28	
阿蘇 4 火山灰 (Aso-4)	竹田市戸上	M	71.71	0.38	15.51	1.44	0.05	0.54	1.04	5.02	4.32	100.00
		SD	0.16	0.02	0.15	0.02	0.02	0.03	0.14	0.07	0.18	
鬼界-葛原 火山灰 (K-Tz)	国分市	M	79.37	0.17	12.82	0.96	……	0.50	1.04	3.03	2.11	100.00
		SD	0.26	0.03	0.11	0.03	……	0.04	0.05	0.04	0.30	
御岳第 1 軽石 (On-Pm I)	小山町生土	M	75.34	0.13	14.61	0.91	……	0.52	1.56	3.46	3.48	100.01
		SD	0.90	0.02	0.22	0.03	……	0.10	0.03	0.15	0.79	
阿多火山灰 (Ata)	国分市	M	73.96	0.40	13.84	2.06	……	0.70	1.83	3.16	4.09	99.99
		SD	0.18	0.03	0.12	0.06	……	0.10	0.06	0.20	0.05	
洞爺火山灰 (Toya)	江差町砂川	M	78.10	0.07	13.47	0.89	0.08	0.22	0.37	2.95	3.84	99.99
		SD	0.24	0.02	0.10	0.22	0.03	0.07	0.03	0.18	0.28	
阿蘇 3 火山灰 (Aso-3)	竹田市 竹田高校	M	69.88	0.49	15.72	2.04	……	0.77	1.66	5.23	4.22	100.01
		SD	0.19	0.02	0.13	0.10	……	0.10	0.06	0.04	0.13	

1 試料あたり10粒子の平均値と標準偏差 M: 平均値 SD: 標準偏差

直下には北原火山灰層があるが、さらにその下位に御岳第 1 軽石 (On-PmI) が認められる⁴⁾ (図 9)。

洞爺火山灰 (Toya) は、御岳第 1 軽石 (On-PmI) の下位、一迫軽石層の上位⁵⁾に認められる (図 9)。

このように本研究において、宮城県に分布する示標テフラと広域テフラとの層序関係を明らかにした結果、宮城県の示標テフラの層序およびそれに基づく旧石器産出層位 (東北歴史資料館・石器文化談話会 1986) を全国的な第四紀層序の枠組みに組み込むことができた。特に鬼首において、On-PmI と Toya との間に明確な上下関係を確認できたことは、東北日本北部の重要な示標テフラである Toya の層位を、南関東における後期更新世広域テフラ層序に組み込んだ点で意義がある。同時にこの成果は、これまで Aso-4 および Toya と海成面・段丘構成層との層位関係から組み立てられてきた東北日本北部における後期更新世海成面編年 (宮内 1988) をより確かなものとする。すなわち東北地方北部沿岸の垂直隆起量の大きな地域において、最終間氷期極相期海成段丘 (12.5 万年 B.P. 頃形成) の下位に発達する海成面 (たとえば能代平野の畑谷 II 面, 八戸付近の多賀台面) は、Toya に風成で覆われ、その下位の海成面が Aso-4 で風成で覆われることから 10 万年前頃の離水と考えられていた (八木・宮内 1986, 宮内 1988)。南関東において既に明らかにされているとおり On-PmI は、8 万年前頃離水した小原台面構成層の最上部に挟まれる (町田・鈴木 1971, 町田ほか 1985)。従って On-PmI の下位に Toya があることは、隆起地域において Toya を風成でのせる最も下位の海成面が、12.5 万年 B.P. (下末吉海準) 以降 8 万年 B.P. (小原台

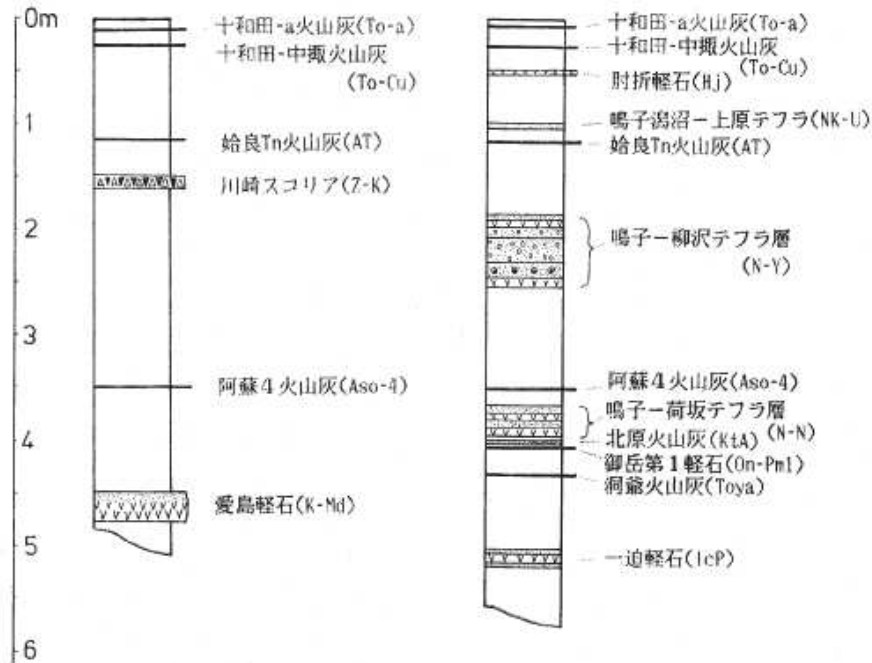


図9 宮城県中・北部のテフラ総合柱状図

海進) 以前に離水したことをより確実にする。

VI. まとめ

本研究で明らかになった事項を要約すれば次のようになる。

1. 宮城県中・北部には始良 Tn 火山灰 (AT), 阿蘇4火山灰 (Aso-4), 御岳第1軽石 (On-PmI), 洞爺火山灰 (Toya) の4枚の後期更新世広域テフラが, 周辺火山起源の示標テフラに挟まれて存在する。特に鬼首では後期更新世の広域テフラである Aso-4, On-PmI, Toya がわずか1.5mの堆積物中に認められる。現時点で鬼首は, On-PmI および Toya の分布のほぼ北限と南限になるが, 各テフラの層厚からみてより遠い地点にまで分布すると予想される。

2. 宮城県中部の後期更新世テフラ層序は, 上位より順に始良 Tn 火山灰 (AT), 川崎スコリア層, 阿蘇4火山灰 (Aso-4), 愛島軽石層である。同北部では, 上位より鳴子瀉沼—上原テフラ層, 始良 Tn 火山灰 (AT), 鳴子—柳沢テフラ層, 阿蘇4火山灰 (Aso-4), 鳴子—荷坂テフラ層, 北原火山灰層, 御岳第1軽石 (On-PmI), 洞爺火山灰 (Toya), 一迫軽石層の順で認められる。この結果, 宮城県中・北部におけるテフラ層序が全国的な第四紀後期のテフラ層序に組み込まれた。特に鬼首において, 御岳第1軽石 (On-PmI) と洞爺火山灰 (Toya) との間に明確な上下関係を確認できたことは, Toya の層位を, 南関東における後期更新世広域テフラ層序に組み込んだ点で意義がある。またこれより東北地方北部沿岸の垂直隆起量の大きな地域における12.5万年 B.P. から8万年 B.P. の間に発達した海成面の存在が支持される。

謝 辞

小論の作成に際し, 東北大学理学部岩鉱教室の青木謙一郎教授には EPMA の使用をお許しいただいた。また同教室藤巻和宏博士には EPMA の使用にあたり直接御指導いただいた。群馬大学教育学部の新井房夫教授には, 火山ガラスの屈折率を測定していただいた。小論は, 筆者の1人である早田の東京都立大学大学院在学中の研究に基づくところが大きく, その際町田 洋教授にはご指導いただいた。現地調査にあたって, 宮城県立鶯沢工業高校の梅津 謙教諭には快く宿泊の便宜をはかっていただいた。地質調査

所の奥村晃史博士には、誠に有益なご批判ご討論をいただいた。以上の皆様にここに記して感謝の意を表します。

最後に1989年3月に東北大学理学部を退官された設楽 寛先生に小論を捧げます。

注

- 1) 今回発見した広域テフラ以外に、対比の可能性があるテフラとして分析したもの全てについてその結果を示した。
- 2) AT の上位にある鳴子瀧沼一上原テフラ層は、第一近似的に2万年頃の噴出と考えられる。
- 3) Aso-4 の下位にある愛島軽石層は、第一近似的に8~9万年前の噴出と考えられる。
- 3) Aso-4 と On-Pm I との間の層準に認められる鳴子一荷坂テフラ層と北原火山層は、第一近似的にそれぞれ7~8万年前の噴出と考えられる。
- 4) 一迫軽石層はその上位に Toya が認められ、馬場壇A遺跡においてその下位に赤色土壌が発達している(山田ほか 1986)。従って一迫軽石層の噴出年代は、第一近似的に10~11万年前頃と考えられる。
- 5) 一迫軽石層の上下の層準で発見された旧石器の年代観は、最終間氷期頃にまで遡ることになる。
- 6) 直接的に10万年 B.P. 頃の離水とする資料はないが、サンゴ礁地域で明らかにされた後期更新世海成段丘編年にあてはめるならその時期の海成段丘に対比される。
- 7) その後の調査の結果、On-Pm I の分布の北端は岩手県胆沢扇状地であることが明らかとなった(早田 1989)。

文 献

- 新井房夫・町田 洋(1980):日本のテフラ・カタログI—西南日本~東北地方の第四紀後期示標テフラの岩石記載的研究. 軽石学雑誌, 6, 65-76.
- ARAI, F., MACHIDA, H., OKUMURA, K., MIYAUCHI, T., SODA, T. and YAMAGATA, K. (1986): Catalogue for late Quaternary marker-tephras in Japan II - Tephras occurring in northeast Honshu and Hokkaido-. *Geogr. Rep. Tokyo Metropol. Univ.*, 21, 223-250.
- 市川米太(1983):座散乱木遺跡とその周辺遺跡の熱ルミネッセンス年代. 石器文化談話会編「座散乱木遺跡Ⅲ」, 95-96.
- (1986):馬場壇A遺跡関連の TL 年代. 東北歴史資料館・石器文化談話会編「馬場壇A遺跡I—前期旧石器時代の研究—」, 東北歴史資料館資料集, 14, 131-132.
- (1987):青葉山遺跡B地点の TL 年代. 東北大学埋蔵文化財調査年報, 2, 127-128.
- 板垣直俊(1980):仙台周辺の2つの示標テフラについて. 東北地理, 32, 46.
- ・豊島正幸・寺戸恒夫(1981):仙台およびその周辺地帯に分布する洪積世末期のスコリア層. 東北地理, 33, 48-53.
- 蟹沢聰史(1985):仙台市及び周辺に分布する愛島軽石とその深成岩質岩片について—噴出源の推定と極端に乏しいトーナル岩の存在—. 岩鉱会誌, 80, 352-362.
- 加藤磐雄・島田昱郎(1953):栗駒火山西山麓緑色凝灰岩地域の地質及び特に三途川・首鬼湖成層について. 岩鉱会誌, 39, 190-194.
- 奥水達司(1983):座散乱木遺跡とその周辺のフィッシュン・トラック年代. 石器文化談話会編「座散乱木遺跡Ⅲ」, 97-99.
- (1986):馬場壇A遺跡の火山灰のフィッシュン・トラック年代. 東北歴史資料館・石器文化談話会編「馬場壇A遺跡I—前期旧石器時代の研究—」, 東北歴史資料館資料集, 14, 133-138.
- (1987):愛島軽石層のフィッシュン・トラック年代. 東北大学埋蔵文化財調査年報, 2, 132-133.
- (1988):馬場壇A遺跡およびその周辺のフィッシュン・トラック年代. 東北歴史資料館・石器文化談話会編「馬場壇A遺跡II—前期旧石器時代の研究—」, 東北歴史資料館資料集, 23, 55-64.
- 町田 洋(1986):地史を解説する上の鍵層となるテフラ層. 相模原市地形・地質調査会編「相模原の地形・地質調査報告書」, 第3報, 4-7.
- ・新井房夫(1983):広域テフラと考古学. 第四紀研究, 22, 133-148.
- ・鈴木正男(1971):火山灰の絶対年代と第四紀後期の編年—フィッシュン・トラック法による試み. 科学, 41, 263-270.
- ・新井房夫・百瀬 貢(1985):阿蘇4火山灰—分布の広域性と後期更新世示標層としての意

- 義. 火山, 第2集, **30**, 129-145.
- ・——・宮内崇裕・奥村晃史 (1987): 北日本を広く覆う洞爺火山灰. 第四紀研究, **26**, 129-145.
- ・——・小田静夫・遠藤邦彦・杉原重夫 (1984): テフラと日本考古学—考古学研究と関係するテフラのカタログ—. 渡辺直経編「古文化財に関する保存科学と人文・自然科学」, **86**, 5-928.
- 松本英二・前田保夫・竹村忠二・西田史朗 (1987): 始良 Tn (AT) の ^{14}C 年代. 第四紀研究, **26**, 79-83.
- 宮内崇裕 (1988): 東北地方北部における後期更新世海成面の対比と編年. 地理評, **61**, 404-422.
- 中井信之 (1988): 放射性炭素年代測定結果の報告. 東北歴史資料館・石器文化談話会編「馬場壇A遺跡Ⅱ——前旧石器時代の研究——」, 東北歴史資料館資料集, **23**, 52.
- 小元久仁夫 (1964): 宮城県鬼首盆地の地形発達史, 東北地理, **16**, 61-70.
- (1966): 宮城県鳴子盆地の地形発達史, 地理評, **39**, 521-537.
- OMOTO (1983): Radiocarbon dating using a low-background liquid scintillation counting system. *Sci. Rep. Tohoku Univ., 7th ser.*, **33**, 23-43.
- 佐藤高晴 (1987): 青葉山遺跡B地点の火山灰の ESR 年代, 東北大学埋蔵文化財調査年報, **2**, 129-130.
- 早田 勉 (1984): 鳴子火山から噴出した第四紀後期のテフラ. 火山, 第2集, **29**, 338.
- (1988): 旧石器時代の示標テフラ. 日本第四紀学会講演要旨集, **18**, 14-17.
- (1989): テフロクロロジーによる 前期旧石器時代 遺物包含層の検討—仙台平野北部の遺跡を中心に. 第四紀研究, (投稿中).
- 庄子貞雄・山田一郎・高橋 正 (1983): 座散乱木遺跡を中心とした遺跡土壌の土壌学的研究. 石器文化談話会編「座散乱木遺跡Ⅲ」, 80-94.
- 須藤 隆・梶原 洋・佐川正敏 (1985): 青葉山B遺跡の調査成果. 日本考古学協会第51回総会研究発表要旨, 13-14.
- 東北歴史資料館・石器文化談話会 (1986): 馬場壇A遺跡と層序. 東北歴史資料館・石器文化談話会編「馬場壇A遺跡Ⅰ——前期旧石器時代の研究——」, 東北歴史資料館資料集, **14**, 1-25.
- 宇井忠英・杉村 新・芝橋敬一 (1973): 肘折火砕流堆積物の ^{14}C 年代. 火山, 第2集, **8**, 171-172.
- 八木浩司・宮内崇裕 (1986): 能代平野北部における洞爺火山灰の発見とその編年学上の意味. 東北地理, **38**, 236-237.
- YAMADA, E. (1972): Study on the stratigraphy of Onikobe area, Miyagi Prefecture, Japan - with special reference to the development of the Onikobe Basin-. *Geol. Surv. Japan Bull.*, **23**, 217-231.
- 山田一郎・庄子貞雄 (1983): 火山ガラスの性質ならびに火山帯とテフラの性質との関係について. 日本土壌肥科学雑誌, **54**, 311-318.
- ・——・阿部 隆 (1986): 馬場壇A遺跡を中心とする旧石器時代遺跡土壌の土壌学的検討. 東北歴史資料館・石器文化談話会編「馬場壇A遺跡Ⅰ——前期旧石器時代の研究——」, 東北歴史資料館資料集, **14**, 118-122.
- 米地文夫・菊池強一 (1966): 尾花沢軽石層について. 東北地理, **18**, 23-28.

(1989年5月16日受付, 1989年10月16日受理)

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. Rible 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) 宗宮直行, 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 alumino-silicate.

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, 鹿児島県垂水市新城のシラス原鉱をボールミルで約 20 時間粉碎し -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パッチ 2 kg をボールミルで 30 分間混合したものを高アルミナ坩堝に入れ, 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 ⁴⁾	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, 48 h
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.

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

σ : 曲げ強度 (kg/cm^2), l : 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. 試料は珽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% 弗酸水溶液で約 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, ピ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³⁾.

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 ₂ O	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	3.16	100.2	78.55	21.45

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

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が、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。

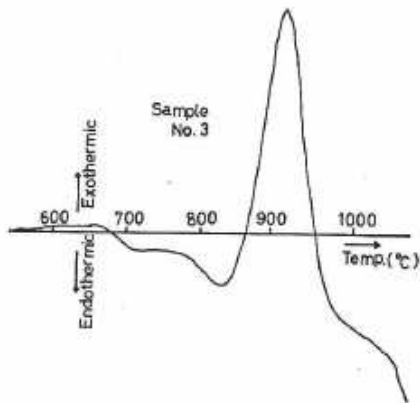


Fig. 1. Differential thermal analysis of the "Shirasu" glass.

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

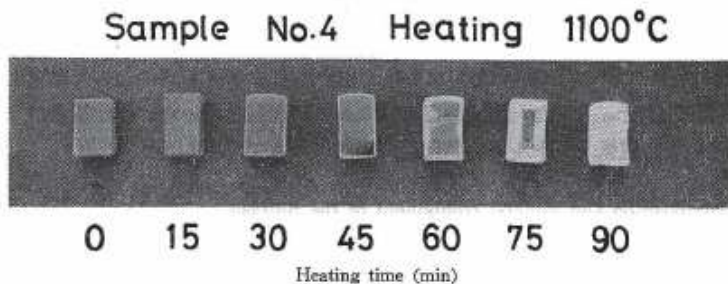


Fig. 2. Crystallization process from outside to inside of "Shirasu" glass.

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。これ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在していた。

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 ($2\text{CaO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2\text{SiO}_2$)、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

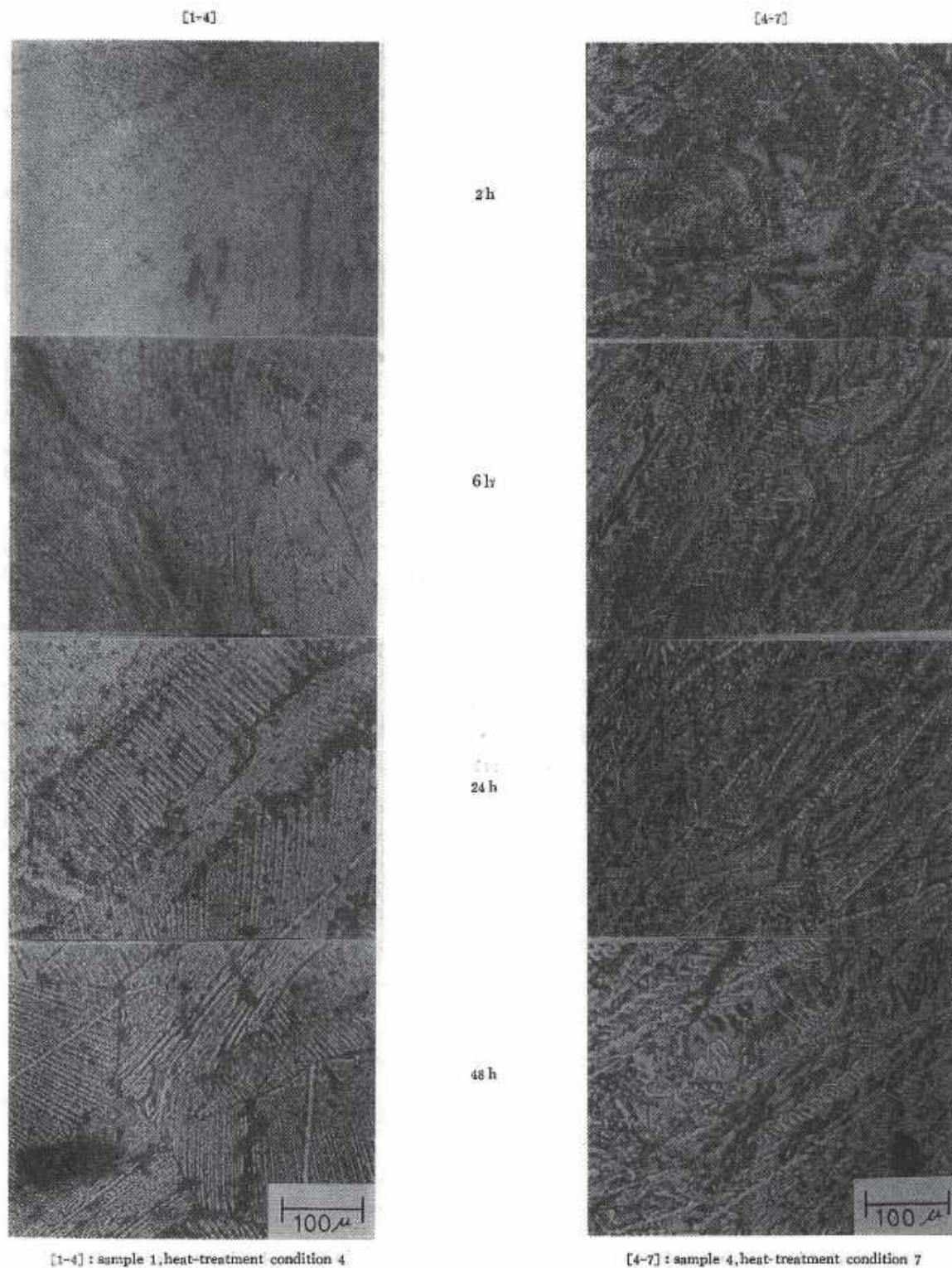


Fig. 3. Photo-micrographs of crystallized glasses.

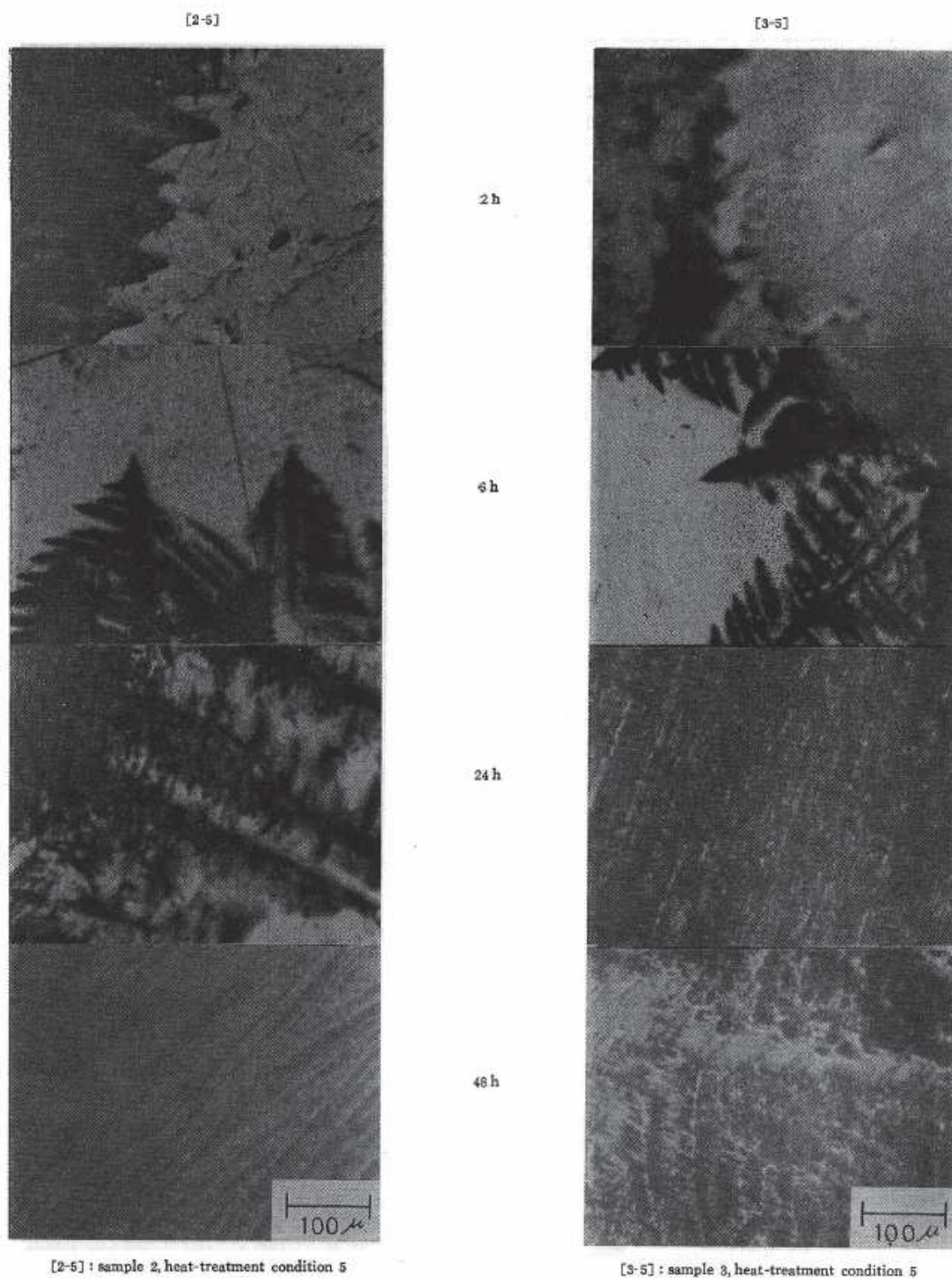


Fig. 4. Photo-micrographs of crystallized glasses

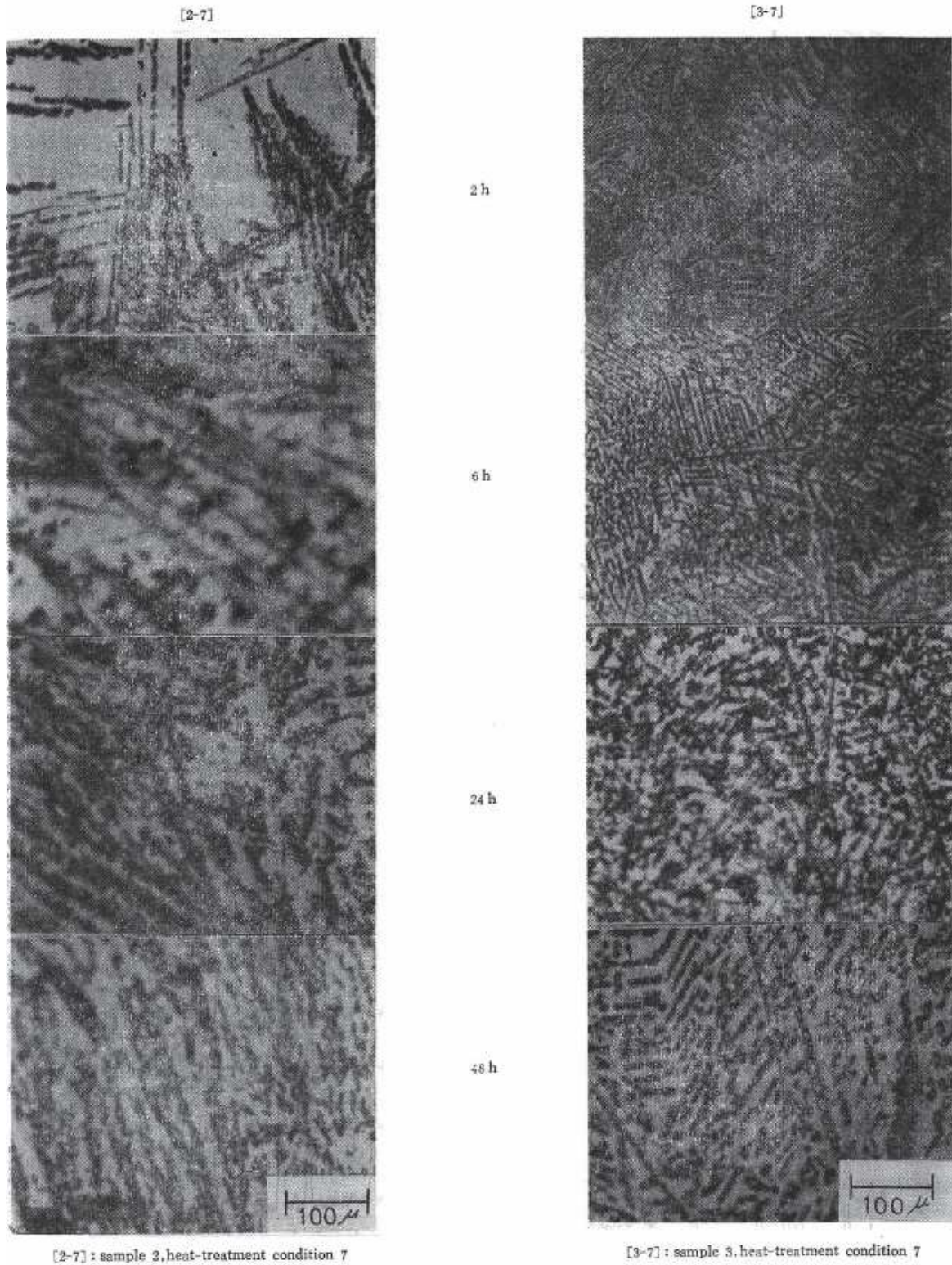
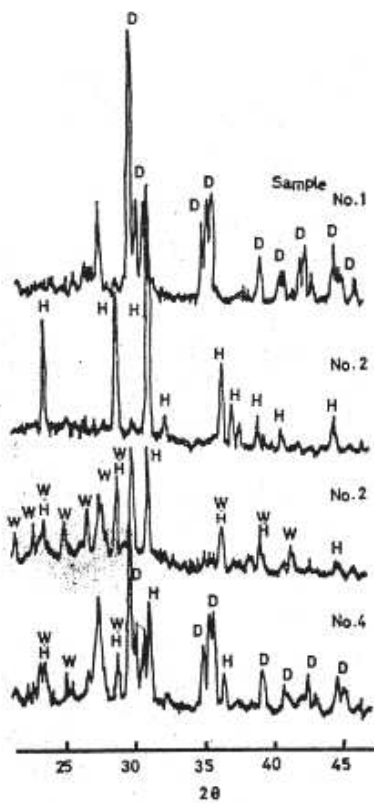
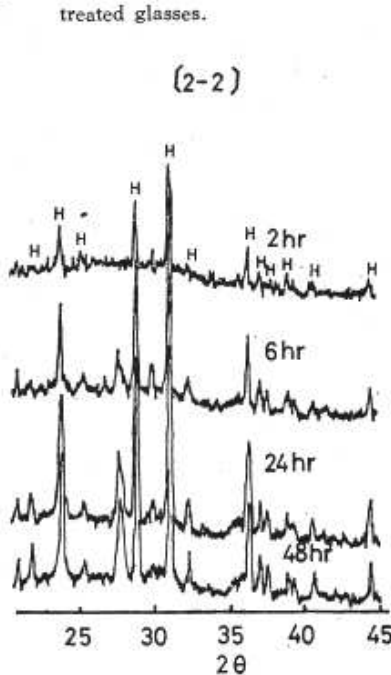


Fig. 5. Photo-micrographs of crystallized glasses.



Heat treatment condition No. 8
Crystalline phases
D: diopside, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
W: β -wollastonite, $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$
H: hardystonite, $2\text{CaO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2\text{SiO}_2$

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



[2-2] Heat treatment condition No. 2

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.

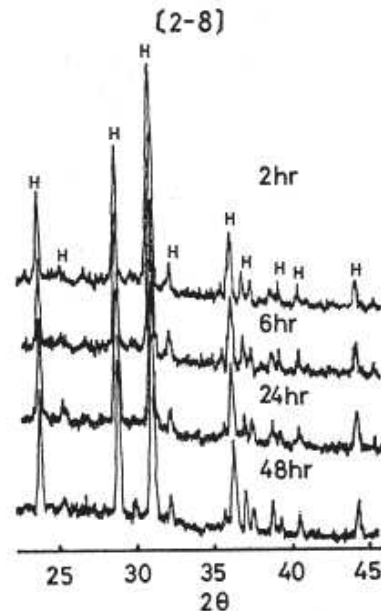
3.5 曲げ強度

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 は一般的に低強度で, 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, 曲げ強度は一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

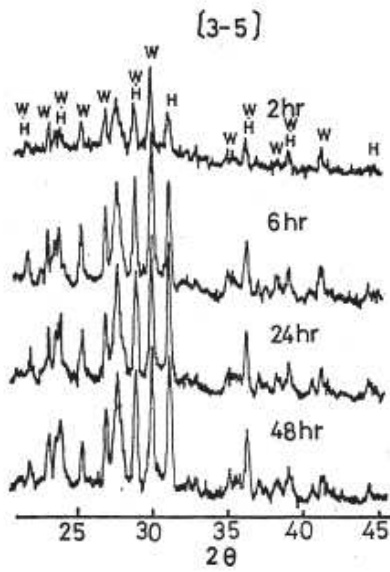
以下, 結晶化ガラスの曲げ強度について考察する.

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

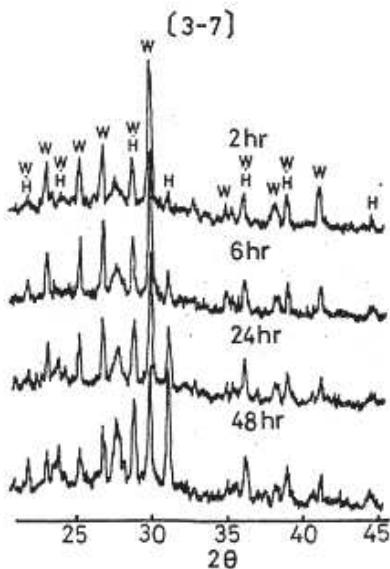


[2-8] Heat treatment condition No. 8

Crystalline phases
H: hardystonite, $2\text{CaO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2\text{SiO}_2$



[3-5] Heat treatment condition No. 5



[3-7] Heat treatment condition No. 7

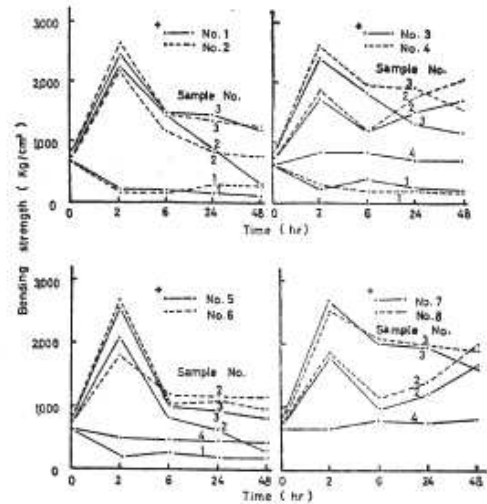
Crystalline phases
 W: β -wollastonite, β -CaO · SiO₂
 H: hardystonite, 2CaO · ZnO · 2SiO₂

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 (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



⁺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⁷⁾。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同様であろう。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⁸⁾。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剝離、空洞化および変形な

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

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る。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剝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) 諫山幸男, 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 重朗, 野元聖一郎, 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 済夫, 和田正道, 田代 仁, 窯協 69 [2] 55-68 (1961).

(9/29/1975 受付)

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 _{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.63	海砂
		A _{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.64	
		A _{0.42} _{0.25}	0.42~0.25	2.64	
B 砂	栃木県・栗野	B _{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.67	珪質ホルンフェルスの砂
		B _{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.67	
		B _{0.42} _{0.25}	0.42~0.25	2.68	
C 砂	福島県・相馬	C _{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.65	砂岩の砂
		C _{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.65	
D 砂	不 明	D _{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.67	—
		D _{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.67	
E 砂	埼玉県・小栗野	E _{1.19} _{0.84}	1.2~0.84	2.70	河川砂 (荒川上流)
		E _{0.84} _{0.42}	0.84~0.42	2.71	
		E _{0.42} _{0.25}	0.42~0.25	2.71	
F _{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 _{0.42} _{0.25} 砂	山口県・豊浦	0.42~0.25	2.64	豊浦標準砂	
H _{1.19} _{0.84} 砂	栃木県・関谷	1.2~0.84	2.67	河川砂	
I _{1.19} _{0.84} 砂	愛知県(矢作川)	1.2~0.84	2.65	河川砂	
J _{0.42} _{0.25} 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
 *** 奥村組

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、 $A_{0.84}^{1.19}$ 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した砂の試料では、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⁾ や骨材研究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、測定が極めてはん雑であり、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 $\left(\frac{b_i}{a_i}\right)$ 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^{2), 3)}、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かと判断している。

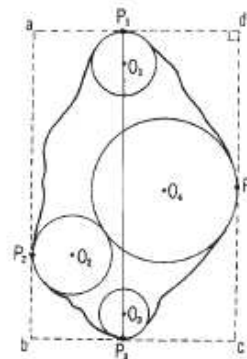
修正円摩度……Waddell⁵⁾ は粒子内に、直交する三軸を考え、その長軸と中間軸とを含む平面に粒子を投影し、次式によって円摩度 R_i' を求めた。

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

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

$$R_i = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{2r_i^2}{l_i^2} + \frac{2r_i^4}{l_i^4} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{2r_i^1}{l_i^2} + \frac{2r_i^3}{l_i^2} \right) \right\} \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{r_i^2 + r_i^4}{l_i^2} + \frac{r_i^1 + r_i^3}{l_i^2} \right)$$

で定義する。



P_1, P_2, P_3, P_4 : 砂粒子の任意断面
 $P_1, P_3 = ab = l_i^2$, (見掛けの長軸)
 $ad = bc = l_i^2$, (見掛けの短軸)
 $P_1O_1 = r_1^1, P_2O_2 = r_2^2,$
 $P_3O_3 = r_3^3, P_4O_4 = r_4^4,$

図-1 修正円摩度測定

図-1 に示したように、 $r_1^1, r_2^2, r_3^3, r_4^4$ 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_i^1, l_i^2 をそれぞれ ab, bc の長さとする。 $\frac{2r_i^2}{l_i^2}, \frac{2r_i^4}{l_i^4}, \frac{2r_i^1}{l_i^2}, \frac{2r_i^3}{l_i^2}$ が小さい程、点 P_2, P_3, P_1, 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、 $\frac{2r_i^2}{l_i^2} = \frac{2r_i^4}{l_i^4} = \frac{2r_i^1}{l_i^2} = \frac{2r_i^3}{l_i^2} = 1$ となり、 $R_i = 1$ である。 $\frac{2r_i^2}{l_i^2} > 1$ の場合は、 P_2 の先端部分を凸部として認めず、 R_i を

$$R_i = \frac{1}{2} \left(\frac{2r_i^4}{l_i^4} + \frac{r_i^1 + r_i^3}{l_i^2} \right) \text{ で求める。}$$

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

$$\bar{R} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^M (r_i^2 + r_i^4 + r_i^1 + r_i^3)}{M} \\ \text{(ただし、Mは測定個数)}$$

表-2 砂粒子の基本的性質

試料名	細長比 \bar{n}	修正円摩度 \bar{R}	鉱物組成 (個数%)									構成粒子の風化と破砕性	
			Q	Q _{ag}	Q _c	F _e	R.F.	M	P.A.	O.			
A	A ^{1.19} _{0.84}	0.675	0.14	29.0	29.5		35.0			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。
	A ^{0.84} _{0.42}	0.618	0.15	36.7	21.4		33.8			4.3		3.8	
	A ^{0.42} _{0.25}	—	0.24	49.3	8.4		27.1			6.0		9.1	
B	B ^{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、きわめて破砕性のいろいろしい粒子である。
	B ^{0.84} _{0.42}	0.700	0.24	70.5	26.0	0.5				0.5		2.5	
	B ^{0.42} _{0.25}	0.706	0.28	84.5	12.5					1.0		2.0	
C	C ^{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。
	C ^{0.84} _{0.42}	0.671	0.30	78.0	10.5	1.0	10.5						
D	D ^{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。
	D ^{0.84} _{0.42}	0.668	0.21	11.9	7.2	53.2	3.4	23.0				1.3	
E	E ^{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量に含まれており、A砂、B砂ほどではないが、粒子の破砕性はかなり大きい。
	E ^{0.84} _{0.42}	0.569	0.20	2.3	6.4	30.6		59.8				0.9	
	E ^{0.42} _{0.25}	0.626	0.25	7.5	5.3	25.4	0.4	58.3				3.1	
F ^{1.19} _{0.84}	0.652	0.22	3.1	10.7	48.0	1.8	29.8					6.7	破砕性は小さい。
G ^{0.42} _{0.25}	0.606	0.25	72.5	1.5	1.0	21.5			0.5			3.0	風化程度の弱い石英・長石の単結晶からなり、破砕性はきわめて小さい。
H ^{1.19} _{0.84}	0.641	0.20	11.0	2.5	2.5	2.5	81.0					0.6	多孔質粒子からなり、破砕性はかなり大きい。
I ^{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 ^{0.42} _{0.25}	0.679	0.22	49.3			8.4	12.4	0.4	14.7	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{n} , \bar{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、かっ鉄鉱などである。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。Horn⁷⁾, Rowe⁸⁾ 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。

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):石英の微晶粒子か非結晶の SiO₂ からなるもの、不純物も含む。

長石類(記号:Fe):加里長石と斜長石とを含む。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⁹⁾および高側圧三軸圧縮試験¹⁰⁾

下線部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

結果によると、砂粒子の破碎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碎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セン断試験

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、表面のあらかさ、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})……Kolbuszewski¹¹⁾ 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碎(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碎が少ない、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 直接セン断試験

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

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_s (度)	ϕ'_s (度)	ϕ_c (度)	ϕ'_c (度)	C_1 (kg/cm ²)	C'_1 (kg/cm ²)	相対密度 (%)	
A 砂	A _{0.84} ^{1.19}	1.126	0.678	0.448	56.5	56.5	44.0	44.0	0.10	0.05	90
	A _{0.42} ^{0.84}	1.235	0.785	0.450	55.6	54.0	46.0	47.0	0.20	0.14	95
	A _{0.25} ^{0.42}	1.314	0.816	0.498	47.5	47.5	—	—	0.25	0.21	88
B 砂	B _{0.84} ^{1.19}	1.126	0.705	0.421	62.0	62.0	46.5	46.5	-0.20	-0.4	98
	B _{0.42} ^{0.84}	1.124	0.695	0.429	53.0	51.0	38.6	39.0	0.16	0.12	96
	B _{0.25} ^{0.42}	1.132	0.714	0.418	—	—	—	—	—	—	—
C 砂	C _{0.84} ^{1.19}	0.859	0.539	0.320	45.5	43.5	—	—	0.13	0.10	86
	C _{0.42} ^{0.84}	0.951	0.610	0.341	50.6	49.0	—	—	0.16	0.12	100
D 砂	D _{0.84} ^{1.19}	1.057	0.691	0.366	54.0	52.5	—	—	0.05	0.04	100
	D _{0.42} ^{0.84}	1.132	0.740	0.392	52.5	51.5	—	—	0.12	0.08	100
E 砂	E _{0.84} ^{1.19}	1.111	0.766	0.345	48.5	48.5	—	—	0.17	0.15	96
	E _{0.42} ^{0.84}	1.147	0.787	0.360	52.2	51.5	—	—	0.14	0.05	96
	E _{0.25} ^{0.42}	1.204	0.891	0.313	47.5	47.5	39.6	39.6	0.13	0.10	95
F _{0.84} ^{1.19} 砂	1.085	0.725	0.360	52.2	51.5			0.10	0.08	100	
G _{0.25} ^{0.42} 砂	0.986	0.666	0.320	47.3	47.0			0.17	0.13	100	
H _{0.84} ^{1.19} 砂	1.359	0.938	0.421	53.0	53.0			0.30	0.20	100	
I _{0.84} ^{1.19} 砂	1.113	0.785	0.327	49.7	49.0	—	—	0.10	0.10	95	
J _{0.25} ^{0.42} 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_{0.84}^{1.19}-砂、B_{0.42}^{0.84}-砂、C_{0.42}^{0.84}-砂、G_{0.25}^{0.42}-砂、H_{0.84}^{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せるもの(C_{0.42}^{0.84}-砂、G_{0.25}^{0.42}-砂、H_{0.84}^{1.19}-砂)と、けっして一直線では回歸できないもの(A_{0.84}^{1.19}-砂、B_{0.42}^{0.84}-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、 $\tau_f = C_2 + \sigma \tan \phi_2$ 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、 $C_1 = C_2$, $\phi_1 = \phi_2$ である。このような σ - τ_f 関係の非直線性は粒子の破碎と密接に関係すると考えられているが¹⁰⁾、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、 $\tau_f' = \tau_f - \sigma \times \left(\frac{dH}{de}\right)$ (ただし、 de : 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 $\tau_f' = C_2' + \sigma \tan \phi_2'$ とで回歸される。各試料で求めた $\phi_1, \phi_2, \phi_1', \phi_2', C_1, C_1'$ 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っきりせず、今後の議論では触れないことにする。

5. 最大・最小間ゲ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

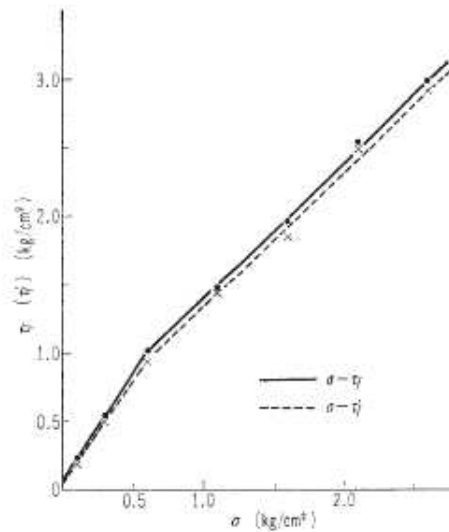


図-2 A_{0.84}^{1.19} 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

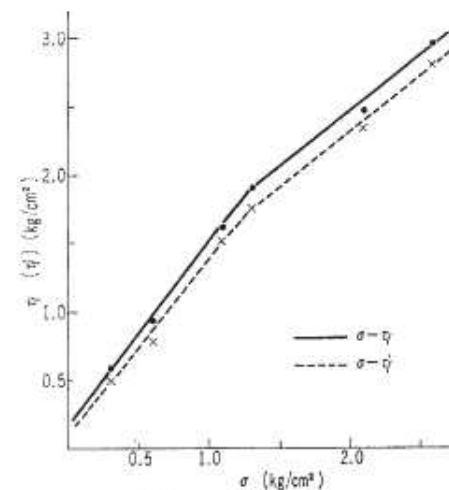


図-3 B_{0.42}^{0.84} 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

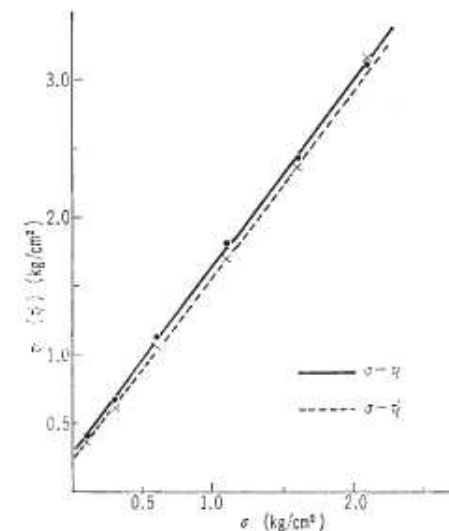


図-4 C_{0.42}^{0.84} 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

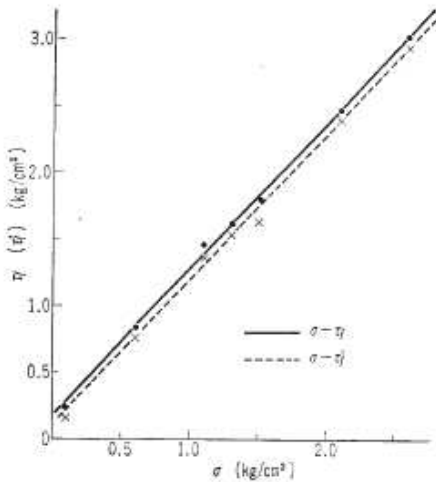


図-5 $G_{0.42}^{0.42}$ 砂の $\sigma-\tau$ と $\sigma-\tau'$ 関係図

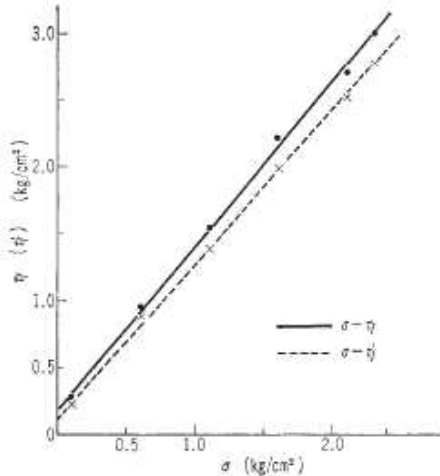


図-6 $H_{0.84}^{1.19}$ 砂の $\sigma-\tau$ と $\sigma-\tau'$ 関係図

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_w) はせん断抵抗に重要な役割を占めるが、 ϕ_w 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_w は、表面の滑らかな試料の ϕ_w と異なり⁷⁾、またチャート、ケツ岩などの岩片の ϕ_w 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_w 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_w 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_1, ϕ_1' との視察、および、図-7 と図-8 の (イ) によっても明らかなように、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

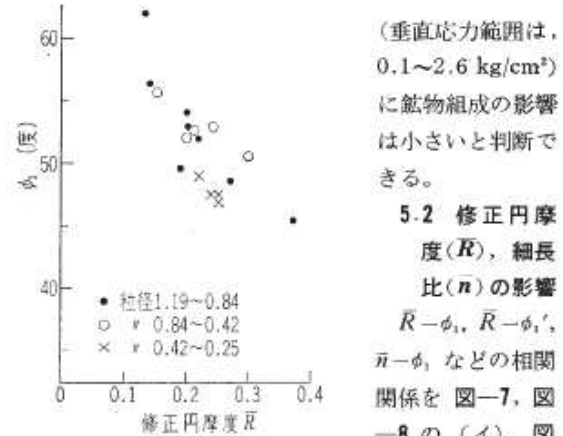


図-7 ϕ_1 と修正円摩度 \bar{R} との関係

(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

$\bar{R}-\phi_1, \bar{R}-\phi_1', \bar{n}-\phi_1$ 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_1, ϕ_1' はとも修正円摩度、すなわち粒子表面のあらさとかかなりの相関関係を示すが、 $\bar{n}-\phi_1$ 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_w の測定によると⁸⁾、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_w 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 の測点からもと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 $\tau_f' = C_1' + \sigma \tan \phi_1'$ と $\tau_f' = C_2' + \sigma \tan \phi_2'$ 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_2' との関係を 図-8 (ロ) に示す。図-8 の (ロ) によると、 $\bar{R}-\phi_2'$ 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とき、そのせん断破壊にともなって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 $\sigma-\tau_f'$ 関係において直線を示すもの、つまり $\phi_2' = \phi_1'$ であり、L グループは $\sigma-\tau_f'$ 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

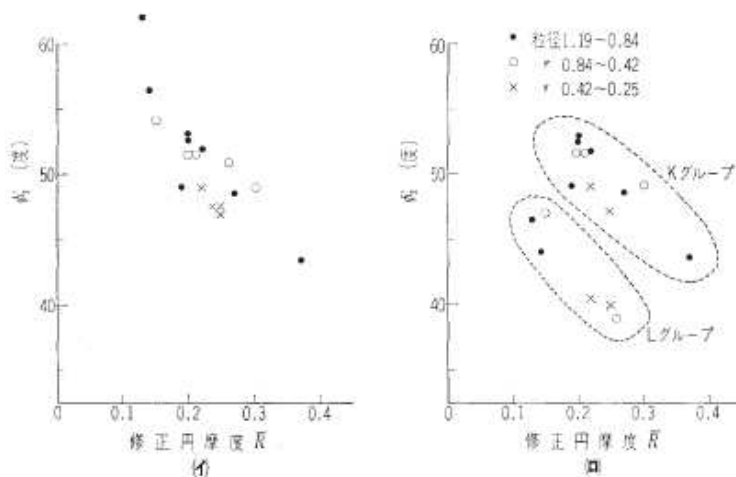


図-8 ϕ_1, ϕ_1' と修正円摩度 \bar{R} との関係図

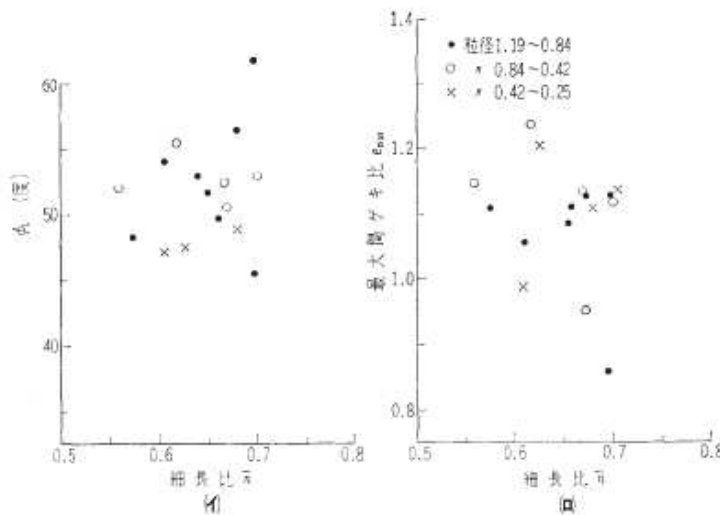


図-9 ϕ_1 , 最大間ゲキ比と細長比との関係図

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 $\bar{R}-\phi_1'$ にかかな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 $\bar{R}-\phi_2'$ 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。

セン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, 粒径の影響ははきりしない。

$\bar{R}-e_{max}, \bar{R}-e_{min}, \bar{n}-e_{max}$ などの関係を図-11, 図-9, (ロ) に示す。ただし, $H_{0.84}^{1.0}$ -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

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。 $\bar{n}-e_{max}$ 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セン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セン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, セン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。セン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セン断抵抗への関与は明らかでないが, Rowe⁶⁾, Lee¹²⁾ 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_n がセン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。

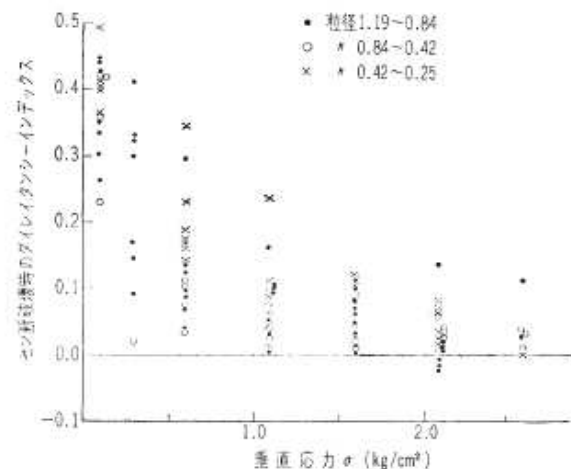


図-10 垂直応力とダイレイタンスーインデックスとの関係図

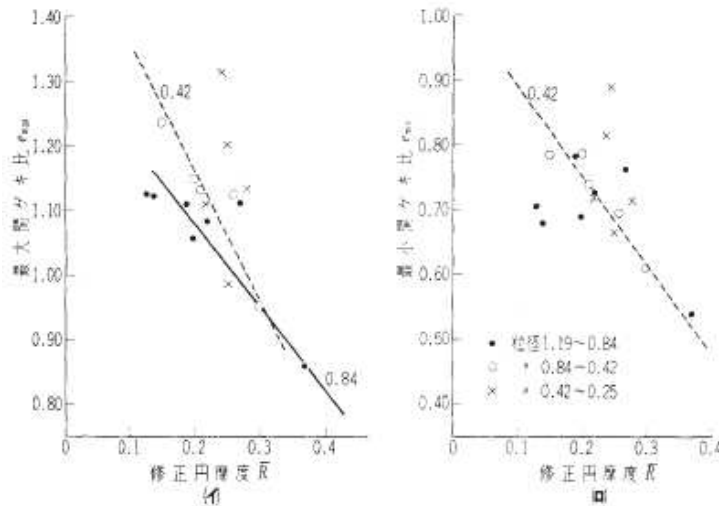


図-11 最大間ゲキ比、最小間ゲキ比と修正円率との関係図

6. 結 論

1) Waddell の円率度を修正定義した 修正円率度, $\bar{R} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{r_i^2 + r_i^4}{l_i^4} + \frac{r_i^3 + r_i^5}{l_i^5} \right)$ 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_1, ϕ_1') におよぼす修正円率度 \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_2, ϕ_2') の修正円率度への依存性は小さく, 砂粒子の破碎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, 修正円率度と最大・最小間ゲキ比はある程度の相関関係を持つが, 細長比とは無相関である。

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わった 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) 三笠正人: 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. Krumbein: Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles, Jour. Sedi. Petrol, II, No. 2
- 6) 杵沢 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 章, 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)

※ ※ ※

参考文献：谷口宏充, マグマ科学への招待, 裳華房, 2001, P24-31

2.2 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もとですし、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珪素を主成分とする物質—珪酸塩—です。マグマ誕生の場所

である上部マントルや下部地殻もやはり珪酸塩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、私たちにとって重要なマグマのほとんどは溶融した珪酸塩です。

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硫黄山で最大数千トン/日の溶融硫黄が流出し、合計20万トンに達しました。アフリカ東部の大地溝帯と呼ばれる地域には炭酸塩 [(Na, Ca, Mg, Fe)CO₃] 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ールドニョレンガイ火山でナトリウムに富む炭酸塩からなる溶岩が流出しました。また南米チリのラコ火山には、ほとんど磁鉄鉱だけからなる溶岩も知られています。したがって地球の内部には、硫黄や炭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。このような例外を除くと、やはりマグマの大部分は珪酸塩です。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）は抜け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出てしまった抜け殻ではありますが、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固結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 2.2 火成岩の分類表
(都城・久城¹⁾に基づく分類を改変)

有色鉱物の体積 %	70	40	20		組織	粒度
火山岩	超塩基	玄武岩	安山岩	デイサイト	流紋岩	斑状 細粒
半深成岩	性岩	粗粒玄武岩	閃緑斑岩	花こう閃緑斑岩	花こう斑岩	中粒
深成岩		はんれい岩	閃緑岩	花こう閃緑岩	花こう岩	等粒状 粗粒
長石の種類	斜	斜	斜<力	斜>力	斜<力	(斜:斜長石, カ:カリ長石)
主な有色 鉱物	かんらん石, 輝石, 角閃石	かんらん石, 輝石, (角閃石)	輝石, 角閃石, (黒雲母)	輝石, 角閃石, 黒雲母	角閃石, 黒雲母, (輝石)	
主な無色 鉱物	斜長石 (カリ長石)	斜長石, (カリ長石)	斜長石, (カリ長石, 石英)	斜長石, カリ長石, 石英	斜長石, カリ長石, 石英	

場合のほうが多い)とによって表2.2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「斑状」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、際立った大きさの鉱物(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。鉱物の粒度にも明確な定義はありませんが、細粒とはガラス質か、あるいは肉眼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1~5mmくらい)、そして粗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。

火山岩とは地表ないし地下浅部でマグマが急激に冷却固結することによって形成された岩石で、一般には斑状組織をし、石基に

火山ガラスを有します。半深成岩は一般には地下浅部で固結した岩石で、火山ガラスを有しません。それに対し、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、等粒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。地下深い場所では周囲に囲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。また斑状組織の場合、石基はマグマが最終的な冷却場所に到達したとき液体状態であった部分で、それに対し、斑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、斑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3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種類の岩石名が生まれます。表の左端に書かれている超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18億年以上昔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面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。デ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・3 火成岩をつくる珪酸塩鉱物の代表例

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	Ca _{1-x} Na _x Al ₂₋₁ Si ₂₋₃ O ₈
	カリ長石	(K, Na)AlSi ₃ O ₈
準長石族	ネフェリン	NaAlSi ₃ O ₈
雲母族	黒雲母	K(Mg, Fe) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
	白雲母	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
角閃石族	普通角閃石	NaCa ₂ (Mg, Fe ²⁺ , Al) ₅ (Si, Al) ₈ O 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⁺ ₃ Al ₂ Si ₂ O ₁₂
かんらん石族	かんらん石	(Mg, Fe ²⁺) ₂ SiO ₄

すい問題点があるため、現在ではデ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、デ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鉱物（結晶）になりきれず、一部分な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

そのため、鉱物に基づく分類は適切とは限らず、正確には化学組成に基づいた分類が使用されています。化学組成に基づく厳密で複雑な分類はいろいろあるのですが、最も簡単な分類は二酸化珪素含有量に基づくものです。すなわち玄武岩ではSiO₂が45~53重量%, 安山岩は53~63%, デイサイトは63~70%, そして流紋岩ではSiO₂>70重量%となっています。ただし、岩石の化学組成は本来連続的であって、このように分類するのはあくまでも便宜的なものであるため、研究者によって多少異なることに注意してください。

表2・4に、マグマの代表的な化学組成を示します。一般にマグマ(火山岩)の化学組成はSiO₂からH₂Oまでの12種類の酸化物

表 2・4 マグマ(火山岩)の代表的な化学組成⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾
(単位は重量%)

	船形山 玄武岩	桜島 安山岩	昭和新山 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	3.09	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

の組み合わせで表現します。もちろん他の種類の酸化物も入っているのですが、量的には少ないため、ここでは無視します。表2・2の火成岩の鉱物組み合わせと表2・3の鉱物の化学組成を見ればわかると思いますが、表2・4のように火山岩の組成を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ありません。また液体(マグマ)でも各々の酸化物がそのまま入り混じってはいません。後にくわしく述べるように、マグマ中でこれら酸化物は解離し、新たな組み合わせをつくり、複雑なイオンの混合物となっています。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す。さらに各酸化物のうちH₂Oは、110°C以下で試料中から抜け出る“マイナスの水”と、それ以上で放出される“プラスの水”との2種類に区分されています。マイナスの水は分析のとき試料粒子間に付着していた水で、プラスの水が本当に岩石中に入っていた水、というふうに分けられています。また水は揮発性成分ですから、量的にはマグマ過程のさまざまな段階で簡単に変化してしまいます。

話は横道にそれますが、マグマの化学組成がこのように多様である原因を探ることはたいへん重要な研究テーマとされています。いくつかの機構が考えられますが、最も確実なものに結晶晶出分化作用があります。これはオリジナルなマグマの中で、冷却にもとないそのマグマよりもSiO₂量の少ない鉱物が生まれ、取り去られ、その結果、残りの液体部分にはSiO₂が富み多様性が生まれる、という考えです。

さて、表2・4でもう一つ注意しておきたいことがあります。それは4価、5価の物質の酸化物(SiO₂, P₂O₅など)の総量が玄武岩から流紋岩になるにしたがって増加するのに対し、1価および2価の金属酸化物(MgO, Na₂Oなど)の総量、および一般に3価の金属酸化物の総量はともに減少することです。このことは後にマグマの物性や構造とその化学組成との関係を考えるうえにおいてとても大切になります。

枠囲み部、下線部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

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，P144-153

会津・福島・仙台（1 / 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]
十和田 a	To-a	AD 915		afa				表 3.4-4 参照。
榛名ニツ岳伊香保	Hr-FP	6 世紀		afa				表 3.3-5 参照。
沼沢湖 ^{1,16)}	Nm-N	5	C*, A	pfl, pfa, pfi	E > 70 km 図 3.4-1	4	4-5	沼沢湖カルデラのテフラはこれより下位に数層ある。 [浅間二口 As-Ft] ¹²⁾ 表 3.3-5 参照。
浅間板鼻黄色	As-YP			afa				本文・表 3.1-3 参照。
始良 Tn	AT	28~30		afa(vitric)				[A1] ³⁾ ローム中。
安達太良二本松 ¹²⁾	Ad-N1			pfa	ESE > 15 km	2-3	4	
蔵王川崎 ⁴⁾	Za-Kw	>30	C, ST	sfa	ENE > 40 km 図 3.4-3	3	4	
安達太良二本松 ²²⁾	Ad-N2			pfa	ESE > 15 km	2-3	4	[A1] ³⁾ ローム中。
磐梯葉山 ^{15,13,22)}	Bn-H1	30~50	ST	pfa, pfi				[HP1] ⁵⁾ , [HP1b] ²⁴⁾
大山倉吉 ¹¹⁾	DKP	>55		afa(crystal)				本文・表 3.2-1 参照。
沼沢金山 ¹⁴⁾	Nm-Kn	>50~55	ST, FT	pfa, pfi, afa	ENE > 90 km	4	4-5	[水沼 pfi] ¹⁵⁾ , [早戸] ²⁰⁾
安達太良二本松 ³²⁾	Ad-N3			pfa	E > 15 km	3	4	[A1] ³⁾ ローム中。
赤城追貝 ^{13,14)}	Ag-Ok			pfa				表 3.3-5 参照。
磐梯葉山 ^{25,13,22)}	Bn-H2	70~80	ST	pfa, pfi				[HP2] ⁵⁾ , [HP2a] ²⁴⁾
御岳奈川 ¹³⁾	On-Ng			afa				表 3.3-1 参照。
阿蘇 4	Aso-4	85~90		afa				本文・表 3.1-5 参照。

記号	主な鉱物
To-a	(opx, cpx)
Hr-FP	ho, opx; ep
Nm-N	opx, ho; qt
As-Y	(opx, cpx)
AT	
Ad-N1	opx, cpx
Za-Kw	opx, cpx
Ad-N2	opx, cpx
Bn-H1	opx, cpx
DKP	opx, ho, (bi)
Nm-Kn	ho, cum, (opx, bi); (qt)
Ad-N3	opx, cpx
Ag-Ok	
Bn-H2	opx, cpx
On-Ng	
Aso-4	(ho, opx)

会津・福島・仙台（2 / 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]
安達太良松川 ²⁾	Ad-Mt			sfa, pfa	NE > 15 km	3	4	[A2] ³⁾ ローム中。
安達愛島 ^{6,7)}	Ac-Md	90-100	ST	pfa	E > 20 km 図 3.4-5	4	5	Aso-4 の下位 ⁸⁾ ，海岸平野下最終間氷期の地層中 ⁹⁾ ，仙台的台 / 原段丘 (MIS 5c) をおおう ¹⁰⁾ 。
沼沢芝原 ^{16,21)}	Nm-Sb	90~130	FT ¹⁹⁾	pfa, afa	ESE > 80 km			[Td-3] ¹⁷⁾
安達太良岳 ^{2,20)}	Ad-Dk	120	ST	pfa	E > 20 km 図 3.4-1	3	4	[A2] ³⁾ ローム中。
沼沢田頭 ^{18,21)}	Nm-Tg	130	FT ^{13,19)} , OI ²⁵⁾	pfa, pfi	E			[横森 YkA ^{2,11)} , Td-2] ¹⁷⁾

記号	主な鉱物
Ad-Mt	opx, cpx
Ac-Md	cum; qt
Nm-Sb	ho, bi, cum; qt
Ad-Dk	opx, cpx
Nm-Tg	bi, (ho, cum, opx); qt

肘折・鳴子・鬼首

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]
肘折尾花沢 ^{4,2)}	Hj-O	11~12	C*	pfa, pfi	E(S) > 110 km 図 3.4-2	3	5	[尾花沢] ³⁾ ，[肘折] ^{2,4)} ，縄文早期と縄文草創期・細石器文化層の境 ⁹⁾ 。
鳴子湯沼上原 ¹⁾	Nr-KU	10~20	C, ST	pfa・afa(pp)	E > 15 km	2	4	[湯沼 c] ⁴⁾
始良 Tn	AT	28~30	C	afa				本文・表 3.1-3 参照。
鳴子柳沢 ¹⁾	Nr-Y	41~63 ^{6,7,15)}	TL, FT	pfi, afa, pfi(pp)	E 60 km 図 3.4-3	3-4	5-6	[安沢下部] ⁸⁾ を含む。 [柳沢凝灰岩] ⁹⁾
阿蘇 4 ¹⁰⁾	Aso-4	85~90		afa				本文・表 3.1-5 参照。
鳴子荷坂 ^{1,8)}	Nr-N	90	ST	pfa, afa, pfi, afa	ESE 60 km 図 3.4-4	4	5-6	[荷坂凝灰岩] ⁹⁾
北原 ^{1,12)}	Kth	90~100	ST	pfa, afa	ENE > 100 km 図 3.4-4	3-4	4?	肘折カルデラ起源か。 [成層，湯沢] ¹⁷⁾ ，新庄 ¹⁶⁾
御岳第 ^{1,10)}	On-Pm1	95~100		afa				本文・表 3.3-3 参照。
三瓶木次	SK	105		afa				本文・表 3.2-1 参照。
洞爺 ^{1,10)}	Toya	112~115		afa				本文・表 3.5-2 参照。
鳴子一迫 ¹⁾	Nr-It	108~ 146 ^{6,11,13)} 110~120 ¹⁵⁾	TL, FT ST	pfa	E > 50 km 図 3.4-5	4	5	[中里] ¹⁴⁾ ，ローム層中。

記号	主な鉱物
Hj-O	opx, ho; qt
Nr-KU	opx, cpx
AT	
Nr-Y	opx, ho, (bi, cpx, ol); qt, ob
Aso-4	ho, opx, cpx
Nr-N	opx; qt, ob
Kth	(opx, ho, cum, bi)
On-Pm1	
SK	bi; qt
Toya	
Nr-It	opx

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

岩手・秋田 (1 / 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]
東岩手新期(群)		約5 ka						水蒸気噴火から新活動期に入り ¹⁾ , 少なくとも9層の sfa を噴出。そのうち To-a をおいて最上部に AD 1290~1400 の辰志田スコリア層, AD 1686 の刈屋スコリア層 [岩手 a 統] が識別される ²⁾ 。
十和田 a	To-a	AD 915		pfa, afa				表 3.4-4 参照
十和田中群	To-Cu	6		pfa				表 3.4-4 参照
秋田新期(群)		完新世						テフラは8層 ³⁾ , その中で最大の裾切 pfa ³⁾ は 8~9 ka のテフラで盛岡北部まで分布する ⁴⁾ 。
秋田駒物沢 ^{4, 6, 10)}	Ak-Y	11.0~11.9	C ⁸⁾	pfl, pfa	E 65 km 図 3.4-3	3	4-5	pfl [生保内] ⁴⁾ , 縄文草創期とポイント文化層に関係, [分] ¹⁰⁾ の一部, [Ak-12] ¹⁰⁾ , 弱いインボリューション。
秋田駒小岩井 ^{5, 11, 10)}	Ak-K	12~13.5	C ⁸⁾	sfa, pfa, afa	E 90 km 図 3.4-3	3	4	弱いインボリューションあり ⁴⁾ , [分] ¹⁰⁾ の一部, [Ak-13] ¹⁰⁾ 。
十和田八戸 ¹¹⁾	To-H	15		pfl				本文 2.4 節 [2]・表 3.4-4 参照。盛岡付近で Ak-Y と Ak-K の下位にある pfl ¹¹⁾ 。
岩手滝沢(群) ^{3, 12)}		およそ 33 ka と 15 ka との間 (AT をはさむ)						の数枚の sfa。その中2層の sfa (上位から [滝沢第1], [滝沢第2]) は岩手東麓に分布, いずれも強いインボリューションが見られることや, 火山灰土中の風成塵量, 植物柱状体組成・含量が寒冷期 (MIS 2) のテフラであることを示唆 ^{3, 12)} 。
始良 Tn	AT	28~30		sfa				本文・表 3.1-3 参照
十和田大不動	To-Of	≥32		pfl				本文 2.4 節 [3]・表 3.1-4 参照
西岩手僧清・生田 ^{1, 4, 12, 13)}	Iw-Y, Od	35~50 ¹³⁾	C	sfa, pfa, sfa, afa, ps (多数のユニット)	E NE > 30 km 図 3.4-4	3	4	pfa [雪浦], pfl [鎌ヶ森] ¹²⁾ , sfa, afa [生出黒色], 西岩手火山起源, インボリューション顕著, [洗民] ¹³⁾ の一部, やや長期の活動産物か ¹²⁾ 。
焼石山形 ¹⁴⁾	Yk-Y	>41 ¹⁶⁾	ST	pfa	E(S) > 50 km 図 3.4-3	3	4-5	[村崎野] ¹⁴⁾ , [田沢] ¹⁶⁾ , [黒沢尻] ¹⁴⁾ の一部。
焼石村崎野 ¹⁵⁾	Yk-M	50~60 ¹⁶⁾		pfa	E N > 100 km 図 3.4-3	3	4-5	[村崎野] ¹⁴⁾ , [北上] ¹⁵⁾ , [黒沢尻] ¹⁴⁾ の一部, インボリューション顕著 ¹⁶⁾ , 西岩手テフラ群との関係不明, 下位に低 n ₂ の ho をもつ火山灰土 (Nm-Knらしい) あり。
西岩手加賀内(群)	Iw-K1, Iw-K2, Iw-K3	Kw と Iw-Y, Od 間にある3層の sfa は上位から加賀内第1, 同第2, 同第3と呼ばれる。どれも岩手山東麓に分布。堆積構造, 層序, 産成態, 植物柱状体から推定すると, Iw-K2 以上は寒冷期 (MIS 4~3) に噴出 ^{17, 18)} 。						
十和田川口 ¹⁹⁾	Kw	80?	ST	pfa	十和田から SES > 80 km. 図 3.4-4	3-4	4-5	給源十和田, [十和田オコシ 2] ^{19, 20)} , [洗民] ¹⁰⁾ 群の最下部。
浄法寺 ⁹⁾	Jh			pfa		3-4		給源十和田? [十和田オコシ 1 7] ¹⁹⁾

記号	主な鉱物
To-a	opx, cpx
To-Cu	opx, cpx
Ak-Y	opx, cpx, (ol)
Ak-K	opx, cpx, (ol)
To-H	opx, cpx, ho
AT	
To-Of	opx, cpx
Iw-Y, Od	opx, cpx
Yk-Y	opx, ho, (cpx); qt
Yk-M	opx, cpx
Iw-K1, Iw-K2, Iw-K3	
Kw	opx, cpx, ol
Jh	opx, cpx, ol

岩手・秋田 (2 / 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]
阿蘇 4 ¹⁶⁾	Aso-4	85~90		afa (vitric)				本文・表 3.1-5 参照, [葉の木谷地第 1] ¹⁷⁾ , 男鹿市安田では漂着軽石あり ¹⁸⁾ 。
北原 ^{18, 20)}	Kth			afa				表 3.4-2 参照。
御岳第 1 ^{19, 21)}	On-Pm1	95~100		afa				本文・表 3.3-3 参照。
三瓶木次 ¹⁸⁾	SK	105		afa				本文・表 3.2-1 参照。
洞爺 ^{19, 21)}	Toya	112~115		afa				本文・表 3.5-2 参照, [葉の木谷地第 2] ¹⁷⁾ , [ピンクタフ] ^{18, 20)} , [田沢] ¹⁹⁾ 。

記号	主な鉱物
Aso-4	(ho, opx, cpx)
Kth	bi, (cum); qt
On-Pm1	(opx, ho, bi)
SK	bi
Toya	(opx, cpx, ho)

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

青森 (1 / 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]
白頭山苔小牧 ^{1,2)}	B-Tm	10世紀	C, A	afa	E > 1500 km 図 2.4-1	5-6	6	本文・表 3.6-2 参照。
十和田 a ^{1,3-5)}	To-a	AD 915	H, C, A	pfa, afa, pfl	S > 300 km E > 80 km 図 3.4-2	4	5	[大湯] ⁶⁾ , [毛馬内] ⁷⁾ 。
十和田 b ⁸⁾	To-b	ca. 2	C*	pfa	E > 40 km			
十和田中掘 ^{8,9)}	To-Cu	6	C* ^{8,18)} , ST	pfa	SE > 200 km, 東北地方一帯 ¹⁶⁾ , 図 3.4-2	4	5	[安家] ¹⁹⁾ , [高瀬] ¹⁰⁾ , [吾妻] ²⁰⁾
十和田南部 ^{8,10)}	To-Nb	8.6	C*	pfa	ESE > 80 km 図 3.4-2	3	5	
十和田二の倉(群) ⁸⁾	To-Nk	10~13	C*	複数の sfa, afa	ESE > 40 km			[N.A.] ⁸⁾
十和田八戸 ^{8,11)}	To-H	15	OF ¹¹⁾ , C	pfl, afa	pfl: conc. 50 km 図 2.4-2	3-4	6	本文 2.4 [2] 参照。
	To-HP			pfa, afa	E > 350 km 図 2.4-2	4		
十和田ビスケット ^{2,12)}	To-BP2	ca. 20 MIS 2	ST	pfa	ENE > 65 km	3	5	インボリューション発達。
始良 Tn	AT	28~30						本文・表 3.1-3 参照。
十和田大不動 ^{5,10,12,13)}	To-Of	≥32 MIS 3	C, ST	pfl, afa	pfl: conc. 50 km 図 2.4-3	3	6	本文 2.4 [3] 参照。 [ビスケット 1 (BP ₁)] ⁸⁾ インボリューション発達。
	To-BP1			pfa	E(N) > 800 km 図 2.4-3	4		

記号	主な鉱物
B-Tm	vitric; af, (cpx)
To-a	opx, cpx; ob
To-b	opx, cpx
To-Cu	opx, cpx
To-Nb	opx, cpx
To-Nk	opx, cpx, (ol)
To-H	opx, cpx, ho; (qt)
To-HP	opx, cpx, ho; (qt)
To-BP2	opx, cpx
AT	
To-Of	opx, cpx
To-BP1	

青森 (2 / 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]
十和田合同 ^{12,13)}	To-G	MIS 4? ²²⁾		pfa, sfa, afa	E > 65 km 図 3.4-3	3	5	インボリューション発達。
十和田キビダング	To-Kb	同上		pfa				
十和田奥瀬 ^{12,13)}	To-Os	同一噴火 輪廻	MIS 5a? ST	pfl	奥入瀬川沿い	2	5?	
十和田レッド ^{12,13)}	To-Rd			pfa	NE > 60 km 図 3.4-3	3	5	奥入瀬川沿い河成段丘 (MIS 5a?) 上。
十和田 SP ^{14,13)}	To-SP	MIS 5a? ²²⁾	ST	pfa, pfl	ENE > 50 km 図 3.4-4	3	4	
十和田オコシ ^{2,12,13)}	To-Ok _g	同上		pfa	E(S) > 70 km 図 3.4-4	3-4	4-5	[OP _g] ¹²⁾ 岩手の [Kw] に つづく ²³⁾ 。
十和田 QP ^{12,13)}	To-QP	同上		pfa	ESE > 30 km 図 3.4-4	3	4	
深浦	Fk			pfa		?	?	Aso-4 や十和田テフラ 群との層位関係不明。給 源不明。
十和田 T1 ^{7,12,13)}	To-T17			pfa	E(S) > 40 km	3	4	
阿蘇 ^{4,16)}	Aso-4	85~90		afa				本文・表 3.1-5 参照。
十和田アオシ ^{12,13)}	To-AP	MIS 5c	ST	pfa	E(S) > 60 km 図 3.4-5	3	5	根城河成段丘礫層 (MIS 5c) 直上。
十和田カステラ ^{12,13)}	To-CP			pfa	E(S) > 70 km 図 3.4-5	3-4	5	
洞爺 ¹⁷⁾	Toya	112~115		afa				[黄色シルト質浮石 YP] ¹⁴⁾ , [白タフ (WT)] ¹⁵⁾ 本文・表 3.5-2 参照。
ザラメ ^{2,12,13)}	ZP2			pfa	E > 50 km 図 3.4-5	3	4	給源十和田か。
ザラメ ^{1,12,13)}	ZP1			pfa	ENE > 50 km	3	4	高館海成段丘砂礫層 (MIS 5e) とこれより一段低い 多質台段丘礫層をおお う。給源十和田か。

記号	主な鉱物
To-G	opx, cpx
To-Kb	opx, cpx
To-Os	opx, cpx
To-Rd	opx, cpx; ob
To-SP	cpx, opx
To-Ok	opx, opx
To-QP	opx, cpx, ol
Fk	ho, cpx, bi, (ol)
To-T17	opx, cpx, ol
Aso-4	(ho)
To-AP	opx, cpx
To-CP	opx, cpx
Toya	(opx)
ZP2	ol, opx, cpx
ZP1	opx, cpx, ol

枠囲み部は本資料における抜粋又は参照箇所を示す

鉱物組成の凡例*

- ・ opx : 斜方輝石
- ・ ho : 角閃石
- ・ ol : カンラン石
- ・ af : アルカリ長石
- ・ qt : 石英
- ・ cum : カミントン閃石
- ・ bi : 黒雲母
- ・ cpx : 単斜輝石
- ・ ep : 緑簾石
- ・ ob : 黒曜石

※: 青枠囲みは追記

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，女川原子力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，津波もしくは津波の随伴，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，女川原子力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。

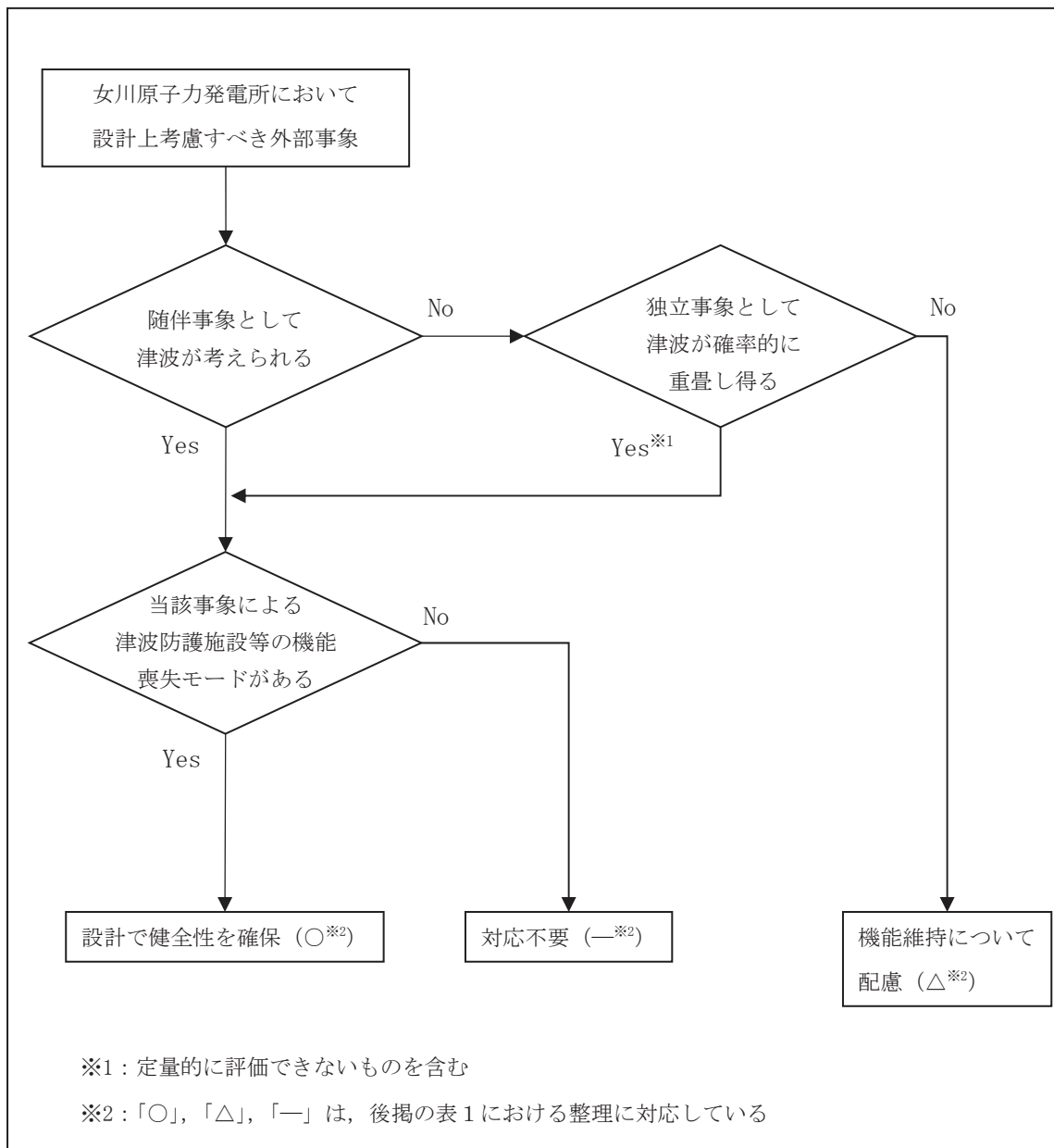


図1 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

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，津波との随伴も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，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 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ (/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 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ (/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：約1万2千年前の肘折尾花沢噴火を考慮

□	: 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 (1 / 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	津波との重畳を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設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
地震	○	—	○	あり 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 S_s 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, 津波と余震の組合せも考慮する。
風 (台風)	—	○	○	あり 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	—	—	—	なし 以下のとおり, 重畳の頻度は無視し得る。 ・ 設計竜巻の確率: 約 1.9×10^{-6} /年 ・ 基準津波の年超過確率 : $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒ 重畳確率: 約 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ /年 年超過確率が 1×10^{-7} /年未満であり, 有意ではない。	△	防潮堤・防潮壁の設計においては, 自動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	—	○	○	あり 凍害により止水目地が損傷した場合, 安全施設への津波の到達, 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	—	○	○	なし 降雨による海水面の上昇の影響は無視し得る。	—	—

○	：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	—	—	—	なし 以下のとおり，重量の頻度は無視し得る。 ・想定する火山の確率：約 1.2×10^{-4} /年** ・基準津波の年超過確率 ： $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒ 重畳確率：約 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ /年 年超過確率が 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宜除去が可能な設計とする。
生物学的事象	—	—	—	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離隔距離が確保されるため，熱影響を受けることはない。	—	—

※ 約1万2千年前の肘折尾花沢噴火を考慮

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		計8台（津波用×2，自然現象用×6）	計6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*及び放射能測定車**でも同様な測定が可能 <small>※重大事故等対処施設として配備。</small>

以上

女川原子力発電所 2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）

安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならぬ。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあるとして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ないものでなければならぬ。

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

女川原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出

・更新世に活動を行った8火山
・更新世に活動を行っていないが将来の活動可能性が否定できない3火山

女川原子力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

降下火砕物
層厚：15cm
密度：1.5g/cm³
粒径：2mm以下

影響を及ぼし得る火山事象

安全施設（クラス1, 2, 3）

- 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
 - ・津波及び静振
 - ・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

その他の施設

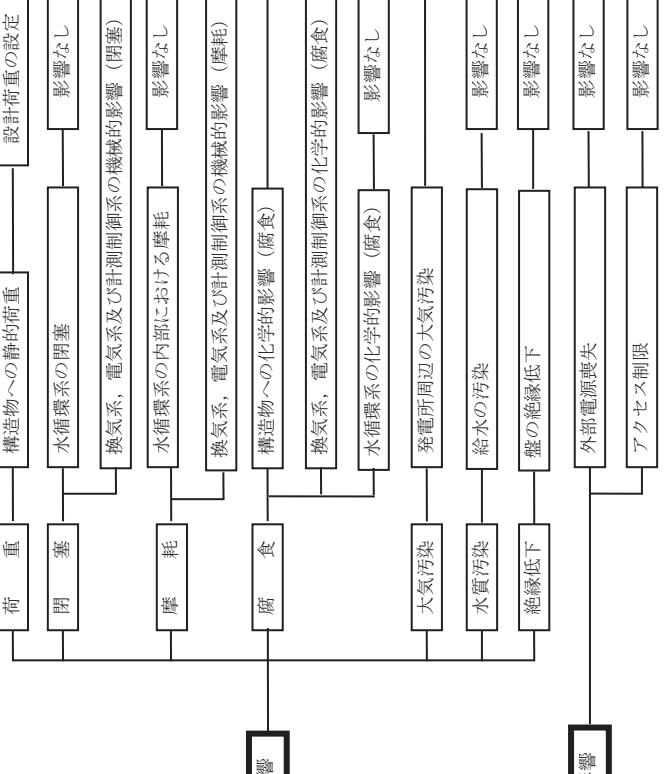
評価対象施設等

- ・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れとなる施設
- ・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

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。

降下火砕物による影響の選定
・直接的影響
・間接的影響

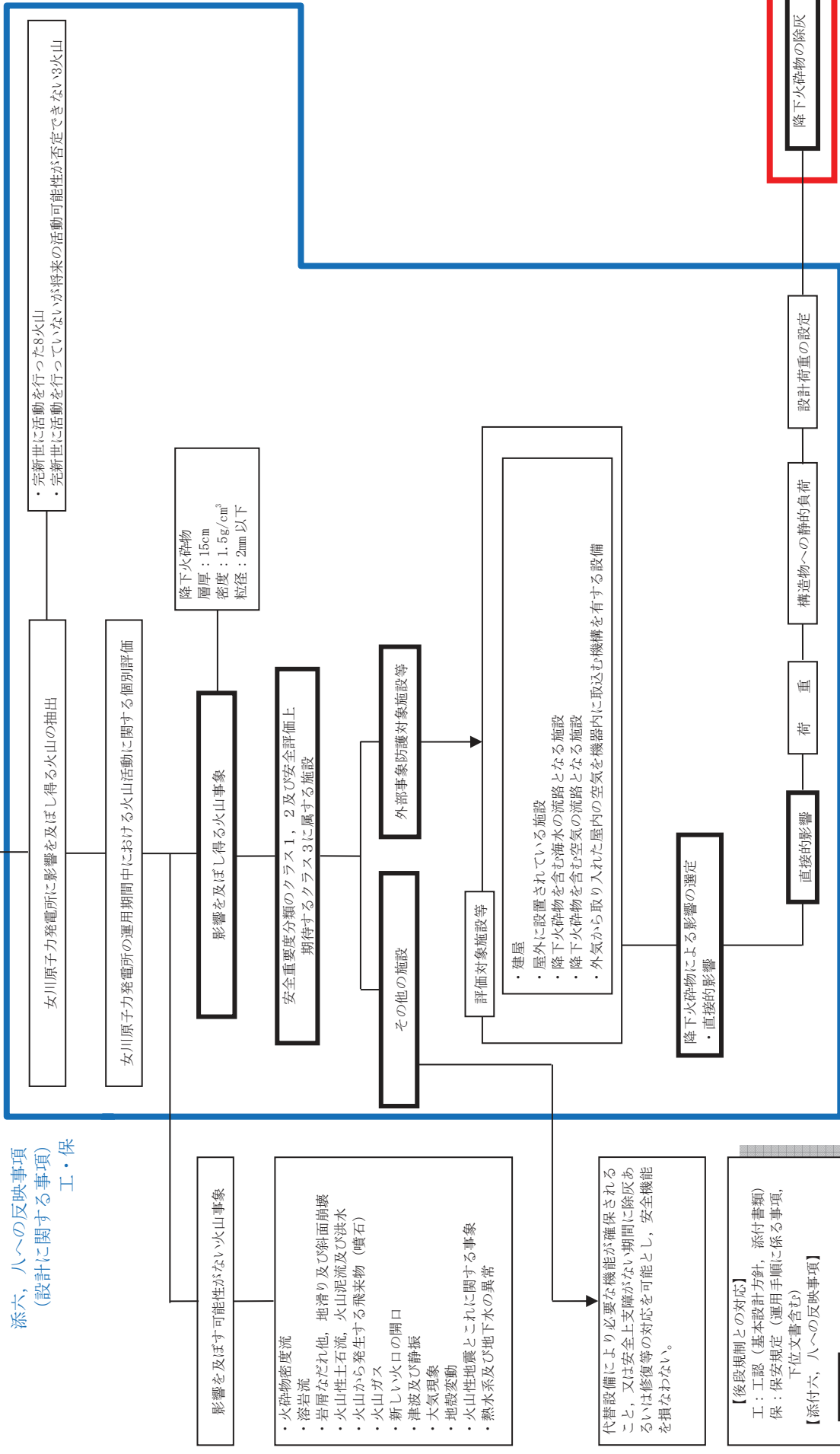


添六、八への反映事項
(手順等に関する事項)

【後設規制との対応】
工：工設（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
□：当該条文に該当しない
○：他条文での反映事項

・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無ければならない。

添六、八への反映事項
(設計に関する事項)
工・保



・完新世に活動を行った8火山
・完新世に活動を行っていないが将来の活動可能性が否定できない3火山

降下火砕物
層厚：15cm
密度：1.5g/cm³
粒径：2mm以下

安全重要度分類のクラス1, 2及び安全評価上期待するクラス3に属する施設

外部事象防護対象施設等

評価対象施設等

- ・建物
- ・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

工・保

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
- ・岩屑なたれ他、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
- ・津波及び静振
- ・大気現象
- ・地殻変動
- ・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
□：当該条文に該当しない
(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
<p>第6条 外部からの衝撃による 損傷の防止</p>	<p>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</p>	<p>運用・手順</p>	<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られないこと、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。
		<p>体制</p>	<p>(担当箇所による保守・点検の体制) (降灰時の体制)</p> <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
		<p>保守・点検</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・手順、保守・点検に関する教育
		<p>教育・訓練</p>	<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バグフィルタ、状況に応じて外気取入ダンパの閉止、非常用換気空調設備の停止又は再循環運転により、建屋内への降下火砕物の侵入を防止する。
	<p>外気取入ダンパの閉止、 換気空調系の停止、再循 環運転</p>	<p>運用・手順</p>	<p>(降灰時の体制)</p>
		<p>体制</p>	<p>-</p>
		<p>保守・点検</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・手順に関する教育
		<p>教育・訓練</p>	

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	バグフィルタ取替・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、非常用換気空調設備の外気取入口のバグフィルタについて、バグ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、バグフィルタの巡視点検を行い、必要に応じ取替・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