

柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉

竜巻影響評価における  
フジタモデルの適用について

## 目次

### 別添 2-2

1. はじめに
2. 各風速場モデルの概要
  - 2.1. フジタモデル
  - 2.2. ランキン渦モデル
  - 2.3. 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)
3. 各風速場モデルの比較
4. 米国におけるフジタモデルの取扱い
  - 4.1. フジタモデルの利用実績
  - 4.2. NRC ガイドでの取扱い
5. 飛来物評価における不確定性の考慮
  - 5.1. 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮
  - 5.2. 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮
  - 5.3. 飛来物評価法のまとめ
6. 実際の飛散状況に対する検証
  - 6.1. フジタスケールとの比較
  - 6.2. 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例
  - 6.3. 佐呂間竜巻での車両飛散事例
7. 飛散以外の挙動に対する考慮
8. まとめ
9. 参考文献

別紙 1 「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

## 1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」<sup>(1)</sup>（以下、「評価ガイド」と略す）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル<sup>(2)(3)</sup>」、原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている「LES(Large-eddy simulation)」の数値解析<sup>(4)</sup>があるが、当社の竜巻影響評価においては、地面に置かれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルにより、評価対象施設の影響評価・防護対策を実施するため、竜巻風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデル DBT-77(DBT: Design Basis Tornado)<sup>(5)</sup>を選定した。

図 1 に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また、図 2 に竜巻影響評価の基本フローと、フジタモデルを適用する箇所を示す。

次節以降にてフジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

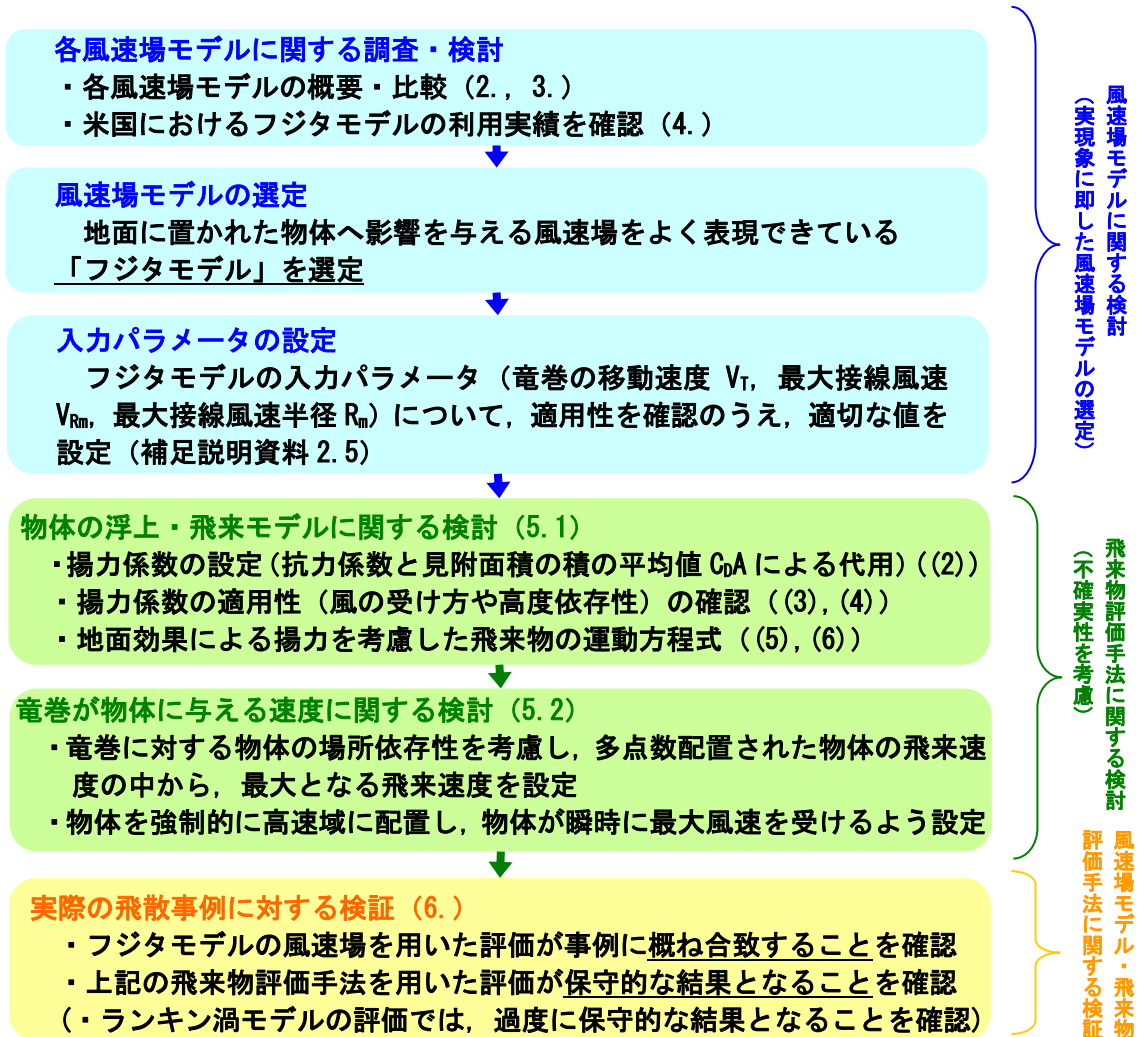


図 1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー  
(括弧内の数字は、本資料の節番号もしくは補足説明資料番号)

フジタモデル関連箇所

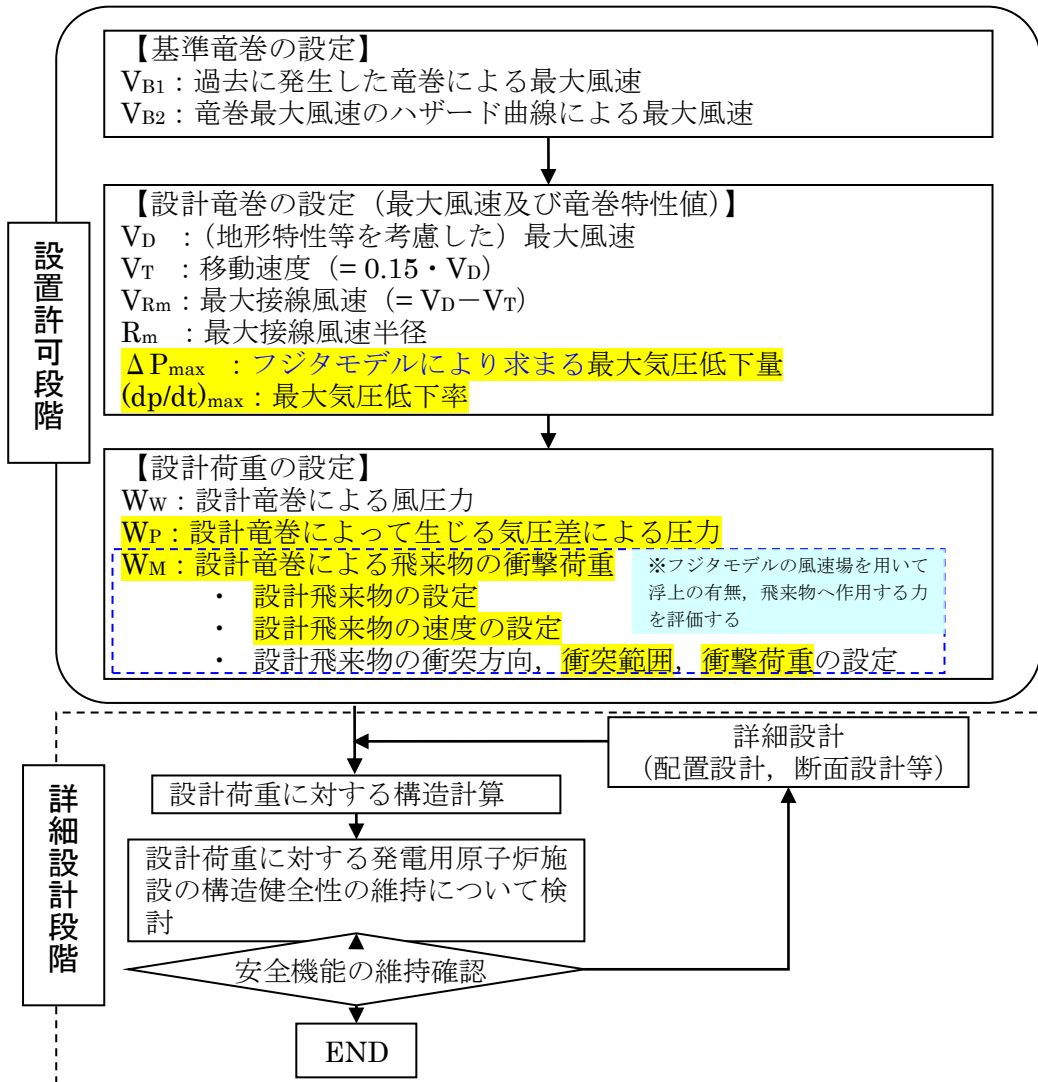


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

## 2. 各風速場モデルの概要

### 2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国 NRC が実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974 年 8 月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻 (図 3) の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査、被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図を基に作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している。(図 4)

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ、および外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



図 3 Ash Valley 竜巻 (1974. 8. 30) のビデオ画像

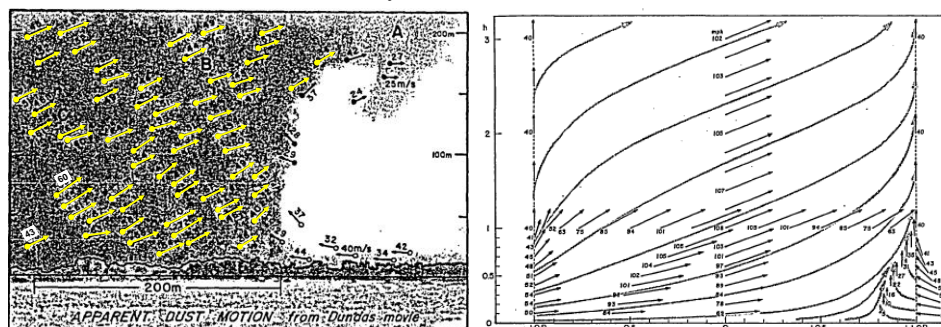


図 4 分析によって作成した風速ベクトル (左)、ベクトル図より作成したフジタモデル流線 (右)

フジタモデルの風速場は図 5 に示すように半径方向に 3つの領域 (内部コア, 外部コア, 最外領域) で構成され, 内部コアと外部コアの接線 (周) 方向風速  $V_{\theta}$  は半径に比例し, その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速  $V_z$  や半径方向風速  $V_r$  は存在しないが, 外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ  $H$  までを流入層としてモデル化しており, 竜巻中心方向に向かう半径方向風速  $V_r$  があり, この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し, 各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。フジタモデルは, 流体の連続式を満たす形で定式化されており, 力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book<sup>(5)</sup>のChaper6 に下記の通り記載されている。(Chapter6 では、フジタモデル DBT-78 (詳細は補足説明資料 2.5 参照) は引用されていない。)

無次元座標  $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速  $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq v) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-v^2} \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right) & (v < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-v^2} A(16z^6 - 7z^8) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

$k_0, k, v, \eta, A, B$  は定数

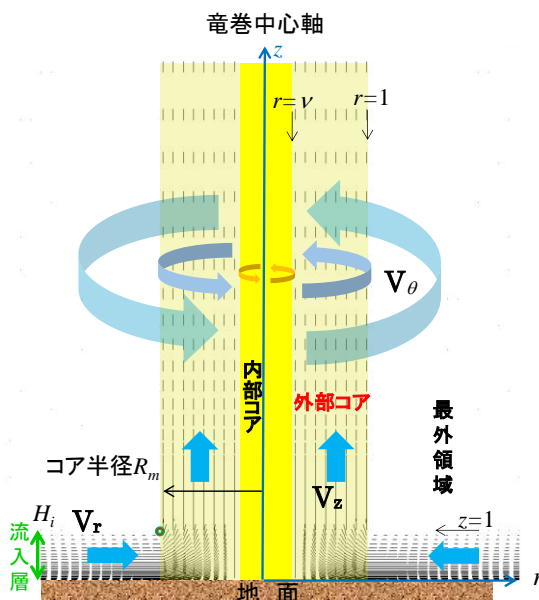


図5 フジタモデルの概要

連続の式:  $c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$   
 フジタモデルでは  $c = 0$  となり連続の式を満たす。

$V_\theta$	接線(周)方向風速
$V_r$	半径方向風速(中心方向が正)
$V_z$	上昇風速
$V_m$	最大接線風速
$R_m$	外部コア半径

内部コアの半径  $R_v$  と外部コアの半径  $R_m$  の比  $v = R_v/R_m$  については、Fujita<sup>(5)</sup> が以下の経験式を提案しているのので、これを用いた。

$$v = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \tag{1}$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita<sup>(5)</sup> は、流入層高さ  $H_i$  を竜巻中心の低圧部の大きさ(外部コア半径)  $R_m$  に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いた。

$$H_i = \eta R_m \tag{2}$$

ここで、 $\eta$  は 1 以下の正の値であり、Fujita Work Book<sup>(5)</sup> の (6.4) 式より  $\eta = 0.55(1-v^2)$  で定義される。

上記式において、外部コア半径  $R_m = 30(\text{m})$  の場合、 $\eta = 0.501$  ( $H_i = 15(\text{m})$ ) となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書<sup>(4)</sup> の図 2.2.3.10 における流入層高さ と竜巻半径の比 ( $\eta = 0.4$  程度) や、Kosiba<sup>(6)</sup> により示されている流入層高さ ( $H_i = 10 \sim 14(\text{m})$  以下) と概ね同じである。

なお、その他の定数についても、Fujita<sup>(5)</sup> の提案している値として、 $k_0 = 1/6$ ,  $k = 0.03$ ,  $A = 0.75$ ,  $B = 0.217$  を用いた。

## 2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル<sup>(3)</sup>は、竜巻中心に向かう半径方向風速  $V_r$  と上昇風速  $V_z$  を特別に付加している(図6)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、図7に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

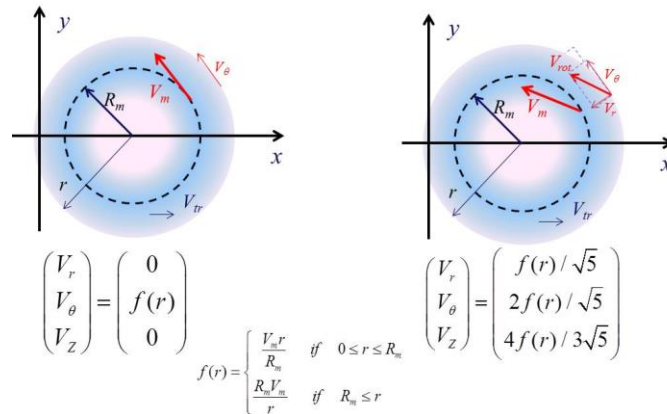


図6 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

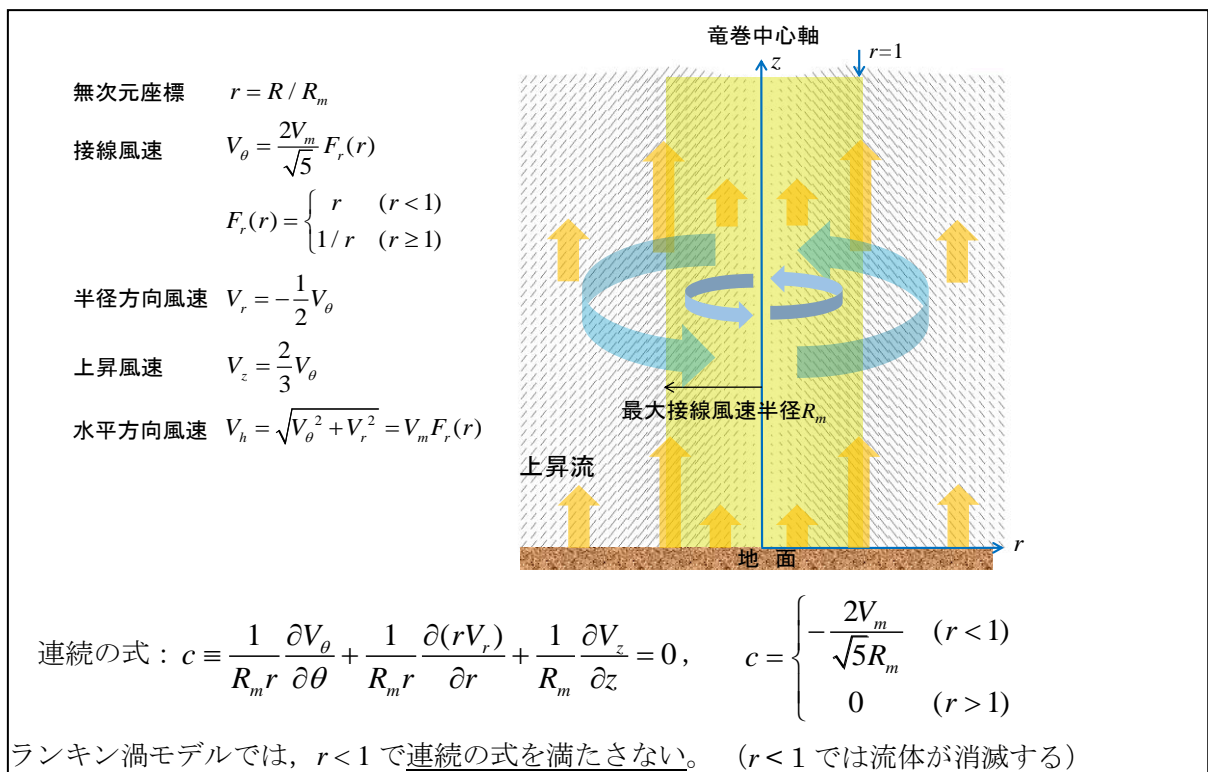


図7 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

### 2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、評価ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。図 8 に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式 (運動量保存式および質量保存式) は、流体が非圧縮性であると仮定する場合、以下ようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $U_i$  および  $P$  は、 $i$  方向の流速ベクトルおよび圧力を表し、 $\nu$  は動粘性係数を、 $f_i$  は  $i$  方向の外力加速度を表す。また、 $x_i$  は  $i$  方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数  $\nu_s$  は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (5)$$

ここで、 $h$  は解像スケール (メッシュ幅相当)、 $C_s$  は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル  $S_{ij}$  は  $S_{ij} = 0.5(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$  で定義される。

以上の通り、LES は風速の時間的な変動 (乱流) を考慮できる点が特長となっている。

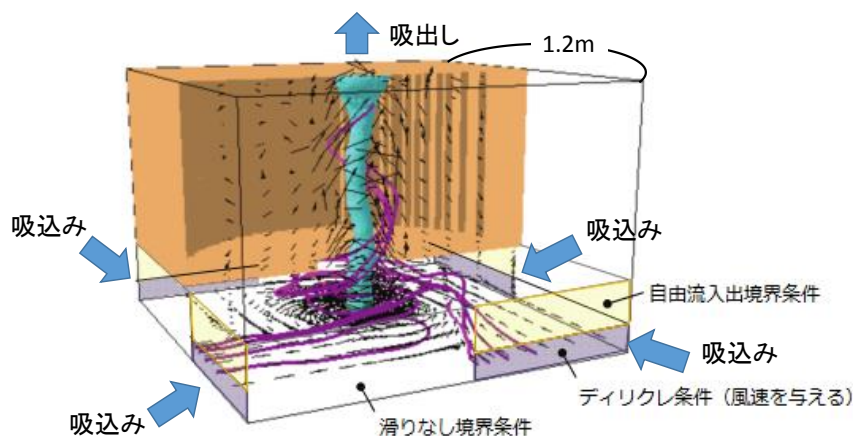


図 8 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況



以上が一般的な LES の説明となる。LES の手法自体は、広く活用されているものがあるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また、竜巻影響評価ガイドで例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

評価ガイドで例示されている LES による解析では、境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配置等）を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成している。渦の生成にあたって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所の局所的配置等）を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。  
⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s（風速+移動速度）に設定している。Maruyama<sup>(7)</sup>によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。  
⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

（参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡）

図 9 にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析（長さ 6m×幅 2.4m×高さ 2.6m, 2300kg, CdA/m=0.0105, 最大風速 100m/s）における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ  $H_i$  は、外部コア半径  $R_m=30$  (m) の場合、 $H_i=15$  (m) であり、2.1 に記載の通り他の文献<sup>(4)(6)</sup>とも概ね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ  $H_i$  を ±10% 変化させた場合の飛跡も示す。

$H_i=15$  (m) の際のコンテナの最大飛散距離 189.4 (m) に対し、流入層高さ  $H_i$  を ±10% 変化された場合の最大飛散距離は 183.4 (m) (-3.2%)、194.7 (m) (+2.8%) となり、流入層高さ  $H_i$  に対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。

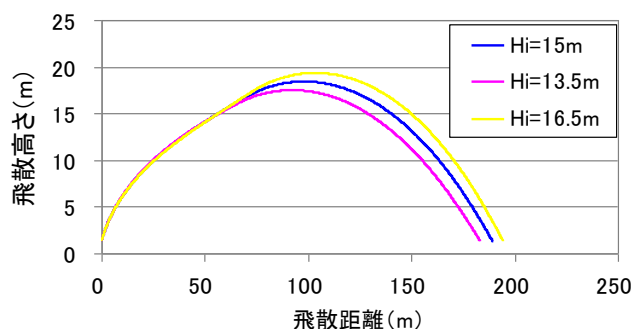


図 9 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡（最大風速 100m/s）

### 3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表1に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図10に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含め、より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的よく表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析できない。LESも同様に地上付近での風速場が実現象と乖離しているため、地上からの飛散挙動を解析できない。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点も無いことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表1 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている</li> <li>【対象施設の例】 Pantex Plant(テキサス州), Oak Ridge(X-10, K-25, Y-12)(テネシー州), Savannah River Site(サウスカロライナ州)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している</li> <li>比較的簡易な代数式により風速場を表現できる</li> <li>流体の連続式を満たす定式化</li> </ul> <p><b>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特になし</li> </ul> <p>(ランキン渦モデルと比較すると、解析プログラムが複雑になるが、計算機能力の向上、および評価ツールの高度化により問題とならない)</p>
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている</li> <li>NRA評価ガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離</li> <li>流体の連続式を満たしていない</li> </ul> <p><b>地上からの飛散挙動を解析できない</b></p>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>NRA評価ガイドにおいて、飛来物および最大速度の設定例に使用されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>風速の時間的な変動、乱れをある程度模擬できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小規模領域での計算結果を、実スケールサイズに規格化するため、粘性の影響が実現象と乖離(特に地表面付近)</li> <li>人為的な境界条件を設定しており、地面や境界近傍で実現象と乖離</li> <li>実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため、飛来物評価が非常に保守的な場合がある(瞬間的な最大値は160m/s程度)</li> </ul> <p><b>地上からの飛散挙動を解析できない</b></p> <p>・実スケールでの解析は、膨大な計算機資源が必要になるため、現実的ではない</p>

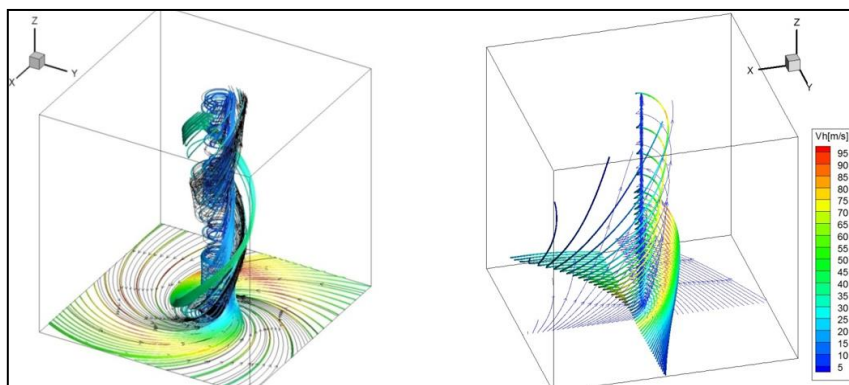


図10 フジタモデル(左)とランキン渦モデル(右)の風速場構造の比較

#### 4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

##### 4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省 (DOE : Department of Energy) が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準<sup>(8)</sup>において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている<sup>(9)(10)</sup> (文献(8)の D.4 節 : Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University. )。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0～2 は一般的な建築物、カテゴリ 3, 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3, 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge (X-10, K-25, Y-12), Savannah River Site が挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書<sup>(11)</sup>にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル DBT-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、「流体力学の連続の式を満足する (Fluid mechanics equations of continuity are satisfied) 」こと、「モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies) 」こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛来について、フジタモデル DBT-77 で再現した事例<sup>(9)</sup> がローレンス・リバモア国立研究所報告書<sup>(11)</sup>及び米国気象学会論文集<sup>(12)</sup>に掲載されている。

なお、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF : National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼鉄パイプや木材の板等) を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書 (NUREG-1827) <sup>(13)</sup>の中で竜巻飛来物に対する LES の竜巻設計を是認している。

( “Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles,NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii)the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.” )

##### 4.2 NRC ガイドでの取扱い

2.1 節でも述べた通り、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国 NRC の要請を受けて考案されたものであるが、米国 NRC Regulatory Guide 1.76<sup>(2)</sup>で

は、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).” と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRC スタッフ自身で水平方向の飛来物速度（Simiu らの運動方程式<sup>(3)</sup>）を計算するプログラムを開発している（“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.”）ことが明記されている。

したがって、米国 NRC ガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

（参考）米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国 NRC では、竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し、確率論的竜巻飛来物評価手法 TORMIS の利用を承認している。

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されている。（米国 NRC においても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない）

## 5. 飛来物評価における不確定性の考慮

前節まででは、フジタモデルの風速場を適用することの妥当性について述べてきた。フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動に関する不確定性や、竜巻が物体と衝突する際の竜巻風速に関する不確定性等について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかという点について説明する。

### 5.1 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方と、その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

#### (1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、評価ガイドの飛来物運動モデル<sup>(3)(4)</sup>と同様に、飛来物は図 11(a)のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力)  $F_D$  と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力(次頁参照)を考慮している<sup>(14)</sup>。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図 11(b)に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力  $F_L$  として考慮する。

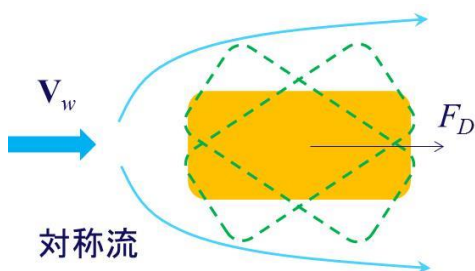


図 11(a) 空中で飛来物へ作用する力

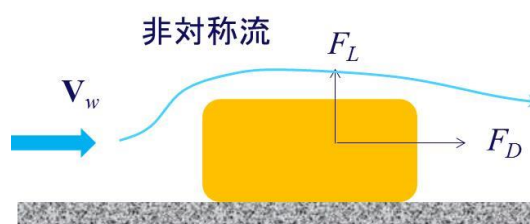


図 11(b) 地面付近で飛来物へ作用する力

このような揚力  $F_L$  は地面での揚力係数  $C_L$ 、地上での物体の見附面積(風向方向から見た投影面積)  $a$  を用いて、以下のように表される<sup>(15)</sup>。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (6)$$

ただし、 $\rho$  は空気密度、 $\mathbf{V}_M$  は飛来物の速度ベクトル、 $\mathbf{V}_w$  は風速ベクトル、 $|*|_{x,y}$  は\*の  $x, y$  成分(水平成分)の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を  $A$  とし、物体と地面の完全接触面積を  $s$  とした場合、無風時 (図 12 の左) は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 ( $p_0$ ) とみなせるため、鉛直方向 (上向き) に作用する揚力  $F_{L0}$  は、以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0A + p_0(A-s) = -p_0s \quad (7)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は  $s=A$  となるため、大気圧  $p_0$  に投影面積  $A$  を乗じた力が下向きに作用し、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、大気圧  $p_0$  に完全接触面積  $s$  を乗じた力が下向きに作用することになるため、いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時 (図 12 の右) の物体に圧力差に伴う流体力が作用 (簡単のため上面での圧力  $p_1$ 、下面での圧力  $p_2$  と仮定) する場合、鉛直方向の流体力  $F_L$  は、以下で与えられる (圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能)。

$$F_L = -p_1A + p_2(A-s) \quad (8)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は  $s=A$  となるため、上面の圧力  $p_1$  に投影面積  $A$  を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。

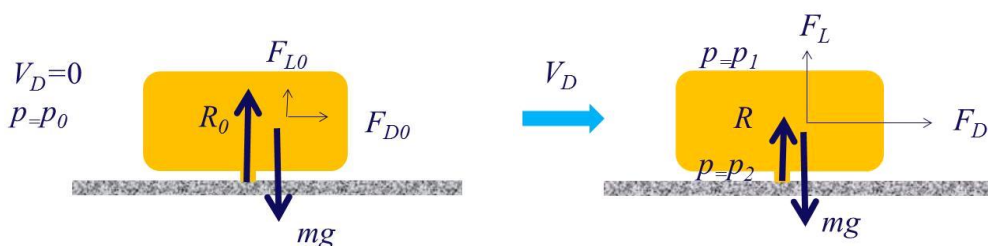


図 12 部分的に地面に接する物体に作用する力 (左: 無風時, 右: 強風時)

(2)揚力係数の設定

(6)式の  $C_{La}$  は風洞実験から求められる値であるが、実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。本評価では、条件によらず保守性を確保できるよう、 $C_{La}$  に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値  $C_D A$  を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad (9)$$

ここで、 $C_{Dx}$  は空中での  $x$  軸方向流れに対する抗力係数、 $A_x$  は  $x$  軸方向流れに対する見附面積であり、その他も同様である。

飛来物の運動モデルを図 13 に示す。上記(9)式の考え方は、図 13 に当てはめ整理すると以下の通り。

- ・物体がある程度浮き上がった後の状態（図 13 の B）であれば、物体はランダム回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。
- ・物体が地面におかれた状態（図 13 の A）から、実際に浮き上がる際には、物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。そのため、これに準ずる方法として、評価に用いる係数は、地面から浮かせた状態で実測された  $C_{La}$  のうち、物体が地面に置かれた状態（図 13 の A）にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで、保守性は確保できると考えられること。
- ・物体が地面におかれた状態（図 13 の A）と物体がある程度浮き上がった状態（図 13 の B）での評価にて、共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。

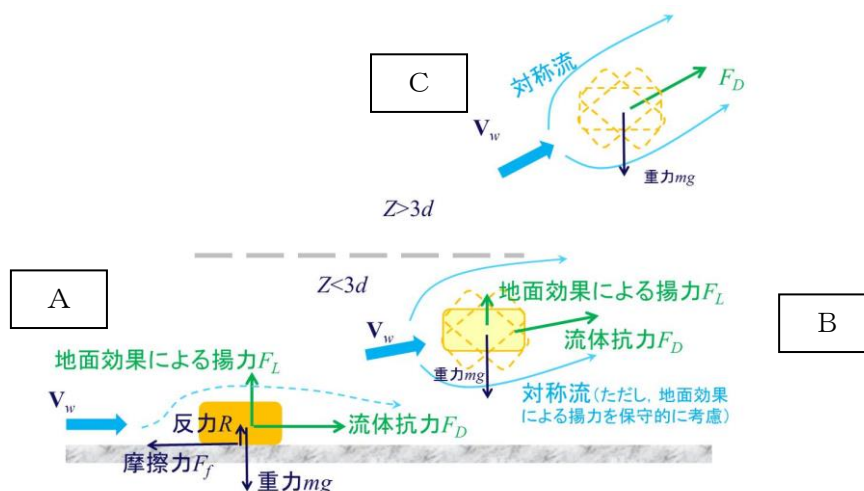


図 13 飛来物の運動モデルの模式図  
(A：地面上，B： $Z < 3d$  の高度範囲，C： $Z > 3d$  の高度範囲)

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数  $C_L$  と見附面積  $a$  の積  $C_L a$  をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数  $C_D A/m$  と同類の  $C_D A$  の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速  $U$  を受ける場合の揚力係数  $C_L$  は、一般にその定義により揚力  $F_L$  と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a \quad (10)$$

これを变形すると、 $C_L a = 2F_L / \rho U^2$  となり、風速、風向及び物体の向きが一定であれば、揚力  $F_L$  および速度圧  $q = \frac{1}{2} \rho U^2$  は見附面積  $a$  の取り方には無関係の物理量であるので、 $C_L a$  も見附面積  $a$  の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。一方、同じ風速  $U$  が同じ物体に作用する場合であっても、地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積  $C_L a$  は変化する。（例えば、円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが、直角の場合には最大となる）

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の  $C_L a$  の最大値（または、それに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される  $C_D A$  の値を比較した。（表 2）

表 2 より、 $C_D A > C_L a$  の関係が成立しており、 $C_L a$  の代用として  $C_D A$  の利用が適切であることが確認できる。なお、 $C_D A$  は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば、一辺  $d$  の立方体では  $C_D A = 2d^2$ 、一辺  $d$  の平板では  $C_D A = 0.66d^2$  となる。両者には約 3 倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の  $C_L a$  値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして  $C_L a$  値の代わりに  $C_D A$  を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（図 13 の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図 13 の状態 A, B, C の全領域で揚力の連続性が確保されている。



表 2 主な物体の  $C_{DA}$  と地面に置かれた物体の  $C_{La}$  (実測値) の大小関係(1/2)

形状	物体	仕様	$C_{DA}^{*1}$	$C_{La}$ (実測値)	$C_{La}$ (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3 ft.)	129ft. <sup>2</sup>	48.7ft. <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験<sup>(16)</sup> (風速 22~31m/s, <math>Re=2.8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6</math>)</li> <li><math>C_{La}</math> が最大となる流入角での値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
		1/6 縮尺模型 (セダン:長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.42m, 質量 1633kg)	12.07m <sup>2</sup>	7.76m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験<sup>(22)</sup>(風速 0~150m/s, <math>Re=0 \sim 3 \times 10^6</math>)</li> <li>4つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から <math>C_{La}</math> 値を計算 (<math>C_{La}=2mg/\rho U^2</math>)</li> <li><math>C_{La}</math> が最大となる流入角での値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
		1/6 縮尺模型 (ミニバン:長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.69m, 質 量 2086kg)	14.58m <sup>2</sup>	7.89m <sup>2</sup>	
	立方体	一辺の長さ D	$2D^2$	$0.2D^2$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>水路試験<sup>(17)</sup>(<math>Re=8000 \sim 28000</math>)</li> <li>流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
柱状	円柱	長さ $\lambda$ , 直径 D	$0.47D\lambda$	$0.2D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験<sup>(16)</sup> (<math>Re=1.3 \times 10^6</math>)</li> <li>流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
				$0.05D\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験(<math>Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5</math>)</li> <li>流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
	角柱	長さ $\lambda$ , 断面が一辺 D の 正方形	$0.8D\lambda$ ( $1.3D\lambda$ ) <sup>*2</sup>	$0.5D\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>水路試験<sup>(17)</sup> (<math>Re=8000 \sim 28000</math>)</li> <li>長方形断面 (アスペクト比 4:3) の角柱は地面から <math>0.167D</math> 以上離れると揚力は負となる (電中研風洞実験)</li> <li>流入方向と角柱の軸方向が垂直となる配置 (角柱の軸方向は地面と平行) における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
				負値 (地面との 隙間が $0.167D$ 以上の場合)	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験(<math>Re=3.8 \times 10^4</math>)</li> <li>流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置 (角柱の軸方向は地面と平行)</li> </ul>

表 2 主な物体の  $C_{DA}$  と地面に置かれた物体の  $C_{La}$  (実測値) の大小関係 (2/2)

形状	物体	仕様	$C_{DA}^{*1}$	$C_{La}$ (実測値)	$C_{La}$ (実測値) に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さ $\lambda$ , 幅 $B$ , 厚さ $D$ ( $B=200\text{mm}$ , $D=5\text{mm}$ , $\lambda=1000\text{mm}$ の場合)	0.66 $B\lambda$	0 に近い値 (地面から 0.25 $B$ 離れた位 置で $C_{La}=0.04B\lambda$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験<sup>(18)</sup>(幅 <math>B</math> に基づく <math>Re=2 \times 10^5</math>)</li> <li>流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置 (平板は地面と平行) における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>
	薄い翼	長さ $\lambda$ , 幅 $B$ , 厚さ $D$ ( $B=100\text{mm}$ , $D=15\text{mm}$ , $\lambda$ $=300\text{mm}$ ) (参考文献(20)で は $B$ の代わりに $c$ で表記)		0.2 $B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>風洞試験<sup>(21)</sup>(幅 <math>B</math>(参考文献(20)では <math>c</math>)に基づく <math>Re=2.2 \times 10^5</math>)</li> <li>流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置 (翼面は地面と平行)</li> </ul>
	平板状 ブロック	長さ $\lambda$ , 幅 $B$ , 厚さ $D$	0.66 $B\lambda$ 0.66( $B\lambda+D(B+\lambda)$ ) <sup>*2</sup>	0.1 $B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>水路試験<sup>(19)</sup>(<math>Re=5 \times 10^4</math> 程度)</li> <li>流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値を <math>C_{La}</math> (実測値) として記載</li> </ul>

※1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

※2: 塊状をみなせる場合

### (3) 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数  $C_L$  と見附面積  $a$  の積  $C_L a$  が、飛行定数  $C_{DA}/m$  と同類の  $C_{DA}$  で代用できることについて、表 2 における  $C_L a$  (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

表 2 の各文献中の実験でのレイノルズ数  $Re$  は同表の備考欄に示す通り、 $10^4$  から  $10^6$  の範囲にある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7 ft. , 幅 5.8 ft. , 高さ 4.3 ft. ) では風速を 30 mph (13m/s) から 120 mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている<sup>(16)</sup>。これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、図 14 に示すようにレイノルズ数  $Re$  が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。表 2 の EPRI の円柱の風洞試験結果<sup>(16)</sup>は  $Re=1.3 \times 10^6$  の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は  $Re=6 \times 10^5$  程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0~16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4$  から  $1 \times 10^5$  程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 15 に示す通り風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数  $C_L$  と見附面積  $a$  の積  $C_L a$  はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 2 に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

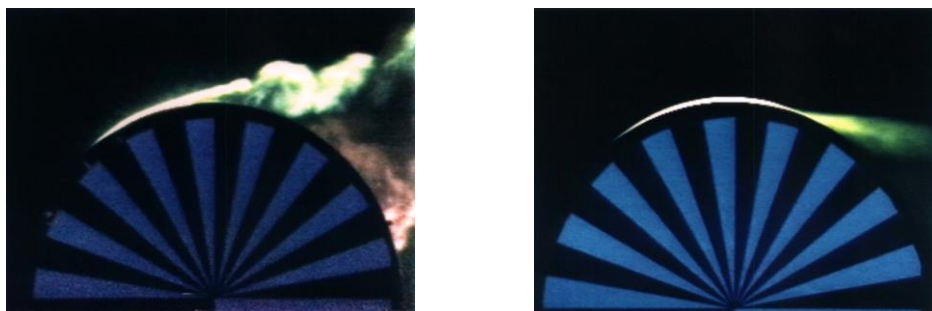


図 14 可視化した円柱周りの流れ (左 :  $Re \approx 4 \times 10^4$ , 右 :  $Re \approx 2 \times 10^5$ )

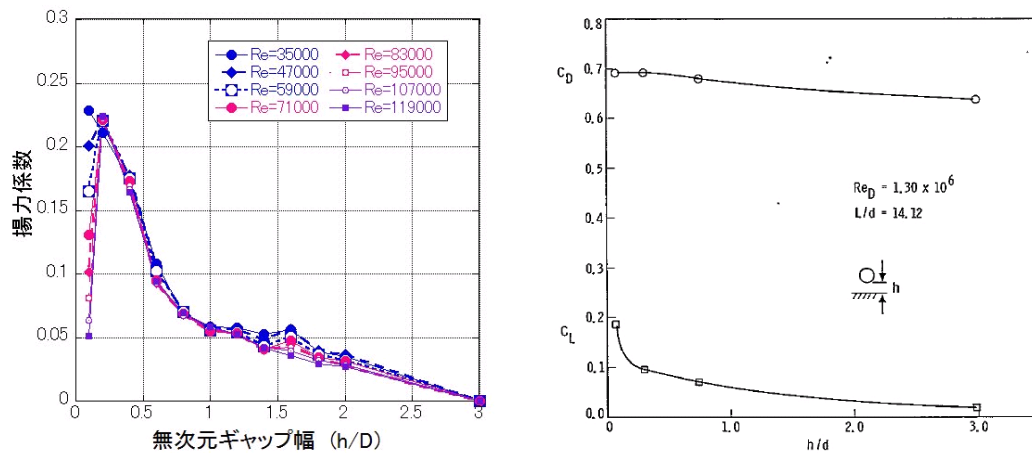


図 15 (左) 電力中央研究所の風洞試験<sup>(19)</sup> ( $Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ ) と  
 (右) EPRI の風洞試験<sup>(15)</sup> ( $Re=1.3 \times 10^6$ ) で得られた円柱揚力係数

#### (4) 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので、既往の風洞実験の結果<sup>(16)</sup><sup>(23)</sup>を考慮して、物体高さ  $d$  の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から  $3d$  の高度であるとき消滅すると仮定した。

具体的には、地面から  $z$  の距離 (高度) にある物体に作用する揚力加速度  $L$  を以下の関数形でモデル化した。(Z: 物体底面の高度)

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

ただし、 $f(Z/d)$  は、EPRI の風洞実験結果<sup>(16)</sup>を参考に、以下の反比例式とした。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\}, & Z = z - d/2 \quad (Z \leq 3d) \\ Z = 0 & (Z > 3d) \end{cases} \quad (12)$$

また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱)、板状物体 (平板) の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ  $d$  の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から  $3d$  の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

##### ① 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験<sup>(16)</sup>にて、地面及び風洞中央 ( $h/d \approx 3.5$ ) に設置した場合にて計測されており、図 16(a)に示すように流入角 ( $0^\circ$  は正面、 $90^\circ$  は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、図 16(b)にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と

同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用揚力係数に近い物と考えられる。

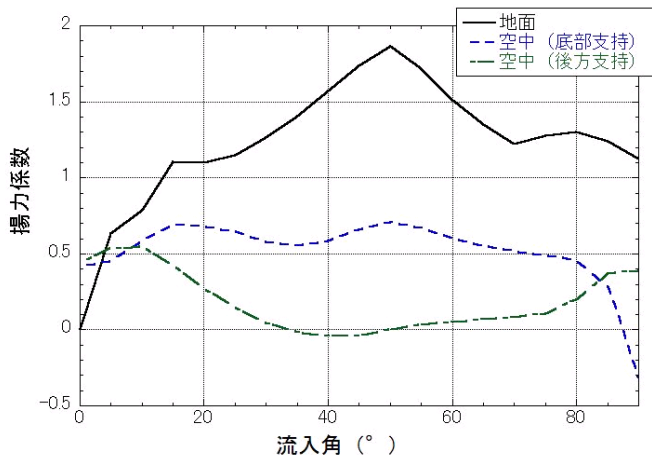


図 16(a) 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

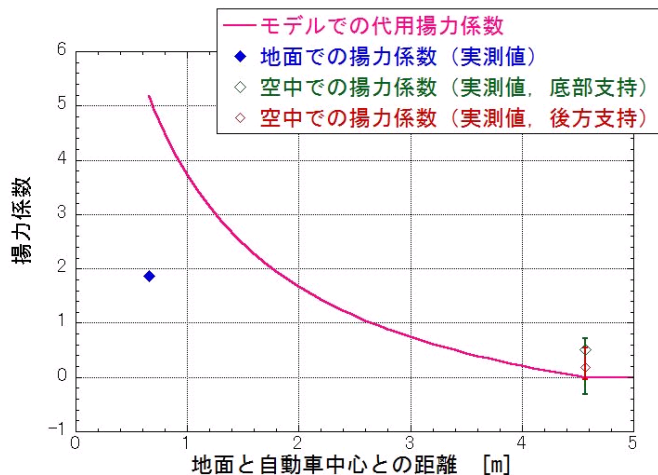


図 16(b) 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

### ②柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており、図 17 にその結果を示す。角柱の場合、地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので、正の揚力を与える本モデルの代用揚力式（図 17 の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は、EPRI の風洞試験<sup>(16)</sup>にて測定しており、図 18 に示すように本モデルの代用揚力係数（図 18 の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため、保守的な結果となっていることが分かる。

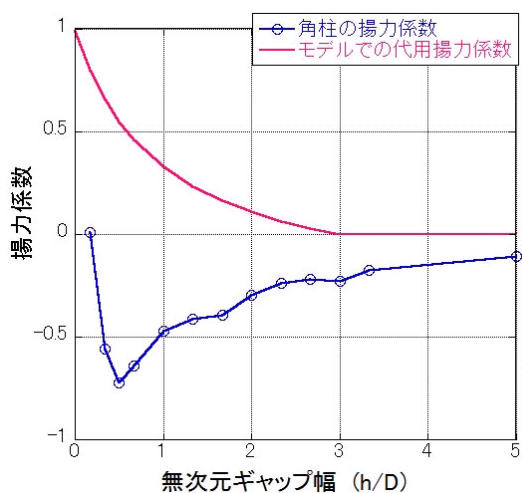
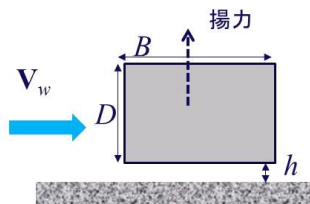


図 17 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm)



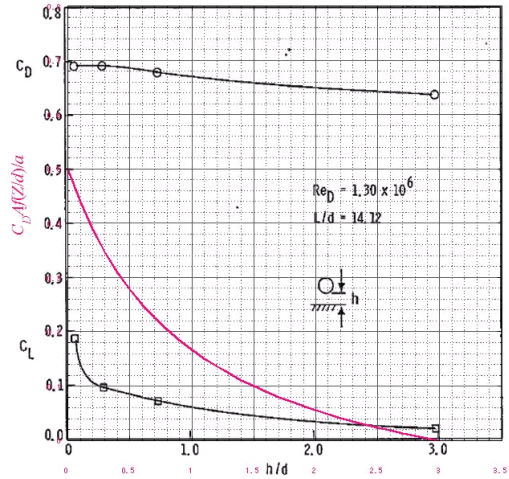


図 18 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

③板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角  $0^\circ$ ）の試験結果<sup>(21)</sup>に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（図 19 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりも概ね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。

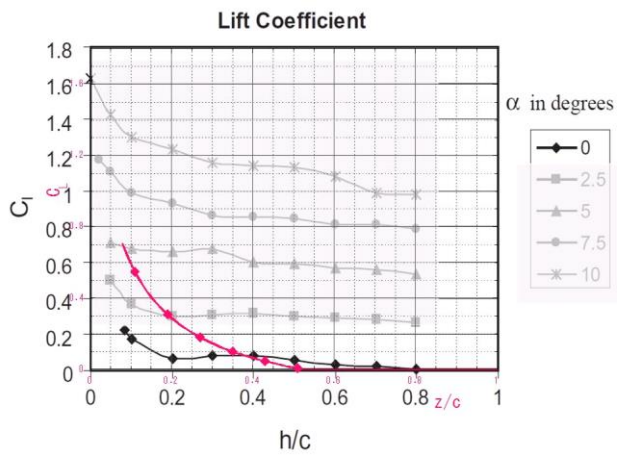


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

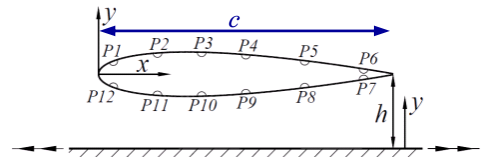


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 19 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(5) 飛来物の運動方程式

上記(1)～(4)を踏まえ、重力加速度  $g$ 、上向きの単位ベクトル  $\mathbf{k}$  を用いて、飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L) \mathbf{k} \quad (13)$$

飛来物の位置  $\mathbf{X}_M(t)$  と速度  $\mathbf{V}_M(t)$  の時刻歴の計算には陽解法(一定加速度法)を用いた。具体的には、時刻  $t = \tau$  における飛来物の位置  $\mathbf{X}_M(\tau)$  と速度  $\mathbf{V}_M(\tau)$  を既知として、時刻  $t = \tau + \Delta\tau$  における飛来物の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$  は上記運動方程式の右辺に対応する時刻  $t = \tau$  における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \Delta\tau \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau) \Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau) \Delta\tau^2}{2} \quad (15)$$

$\mathbf{A}(\tau)$  の計算には、時刻  $t = \tau$  における風速場も必要であるが、初期に原点に位置する竜巻の中心が  $x$  軸上を移動速度  $V_{tr}$  で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、飛来物速度・位置を算出することができる。

(6) 飛来物の運動方程式 ((12)式) に関する考察

地上面の物体 (図 13 の状態 A) が浮上するには、地面からの反力が消滅 ( $R < 0$ 、つまり  $mg < F_L$ ) する条件で浮上し、浮上後は、(13)式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad (18)$$

ここで、飛来物速度  $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速  $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$  であり、右辺第1項が流体抗力  $F_D$  の加速度を表しており、(18)式の右辺第3項が地面効果による揚力  $F_L$  の加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態 (上記の式(16)～(18)で飛来物速度  $\mathbf{V}_M$  を 0) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (16')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (18')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合（図 13 の状態 A）では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式(18')の右辺第1項は右辺第2, 第3項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \quad (19)$$

例として、竜巻コア半径 30m, 設計竜巻の最大風速 92m/s の竜巻が原点に位置し x 方向に 14m/s で移動する場合、点(0, -30m)における式(18')の右辺第1項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第3項の値（地面効果による揚力加速度）を図 20 に示す。

図 20 より、地面上（z=0）においては、z 方向抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。

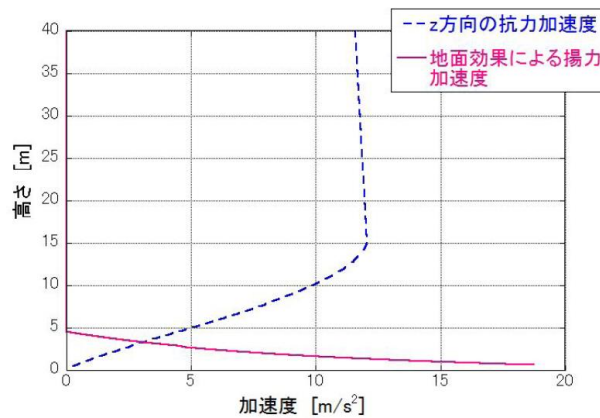


図 20 地面近傍の飛来物に作用する z 方向の加速度  
(飛来物の特性： $0.5 \rho C_D A / m = 0.004 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ ,  $d = 1.31 \text{ [m]}$ )



なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は、上昇風速が水平風速の約 60%にも達するため、地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 $L$ を付加していない（図 21）。

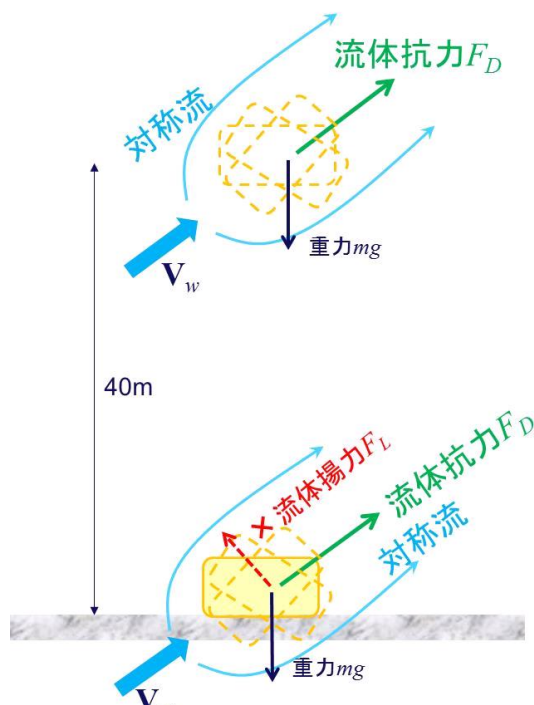


図 21 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

## 5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド<sup>(2)</sup>に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点数配置した場合の飛来速度の違いを比較した。配置の違いについて、図 22 に示す。1 点配置の場合は、特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置  $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置する。また多点数配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に  $51 \times 51$  個の物体を配置する。その上で飛散させた物体の内、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

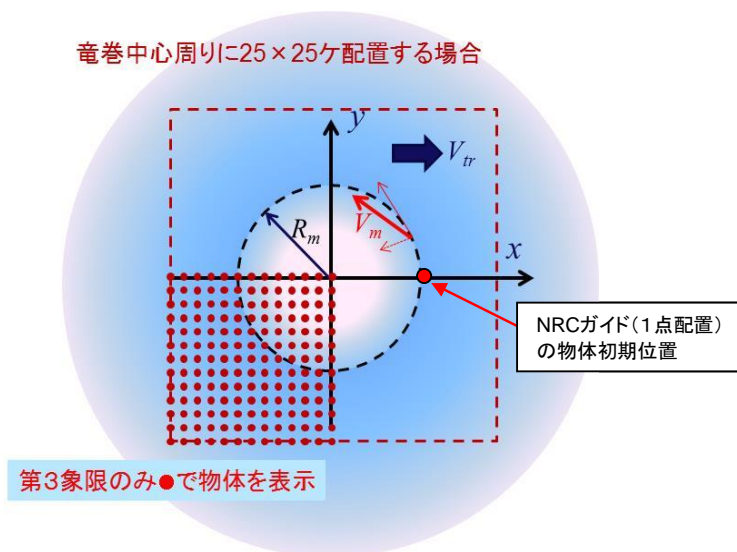
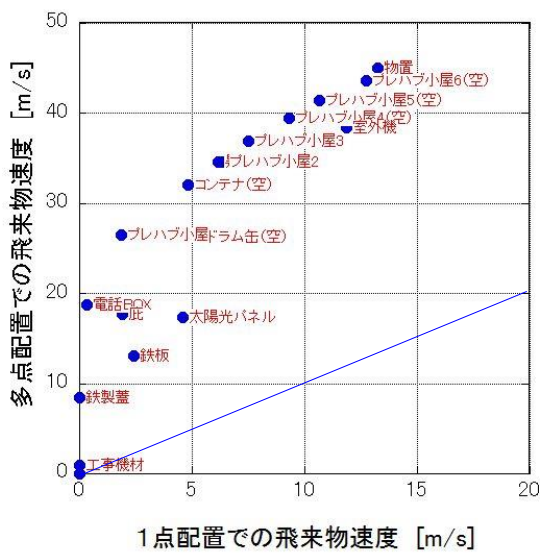


図 22 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 92m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、評価ガイドの記載より竜巻の移動速度  $V_{tr}$  を 10m/s、竜巻コア半径  $R_m$  を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書<sup>(4)</sup>に掲載されている物体の飛行定数 (5.1 節の  $C_D A$  を質量で割った値： $C_D A/m(m^2/kg)$ ) を用いた。図 23 に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点数配置の手法では、飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となった。多点数配置することで、その竜巻風速場における最大風速 (最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点) を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

したがって、物体を多点数配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。



物体のパラメータ	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	$C_D A / m$ ( $m^2 / kg$ )
フォークリフト	3.60	1.10	2.10	3600	0.0026
トラック	5.00	1.90	1.30	4750	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	1.10	250	0.0036
乗用車	3.10	1.60	1.30	1430	0.0052
工事機材	2.44	0.65	1.20	610	0.0058
プレハブ小屋1	5.00	5.00	3.00	4400	0.0083
コンテナ(空)	2.40	2.60	6.00	2300	0.0105
昇降機かご	1.20	1.20	2.80	480	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	2.60	730	0.0119
プレハブ小屋3	4.60	2.30	3.30	1850	0.012
プレハブ小屋4(空)	5.00	5.00	3.00	2400	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.40	13	0.0169
プレハブ小屋5(空)	1.85	1.85	2.60	460	0.0189
プレハブ小屋6(空)	4.60	2.30	3.30	1000	0.0222
物置	1.80	0.90	1.50	120	0.0315
室外機	0.80	0.25	0.30	10	0.0343
コンクリート板	1.50	1.00	0.15	540	0.0021
底	11.00	2.10	0.20	680	0.0242
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	6.8	0.0364
鉄板	2.00	0.25	0.04	7.6	0.0486
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	14.5	0.0582
鉄骨部材	4.20	0.30	0.20	135	0.0065
鉄パイプ1	2.00	0.05	0.05	8.4	0.0057
鉄パイプ2	1.00	0.05	0.05	4.2	0.0059
ドラム缶(空)	0.90	0.60	0.60	24	0.0203

図 23 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較 (左) と物体のパラメータ (右)

前頁の図 22 に示す物体の多点多点配置 (竜巻半径の 4 倍の正形状の領域に  $51 \times 51$  個の物体を配置) を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定についても考慮した設定となる。

図 24 に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況 (海上で竜巻が発生して上陸する場合など) を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝され、飛散することになる。しかし、物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。

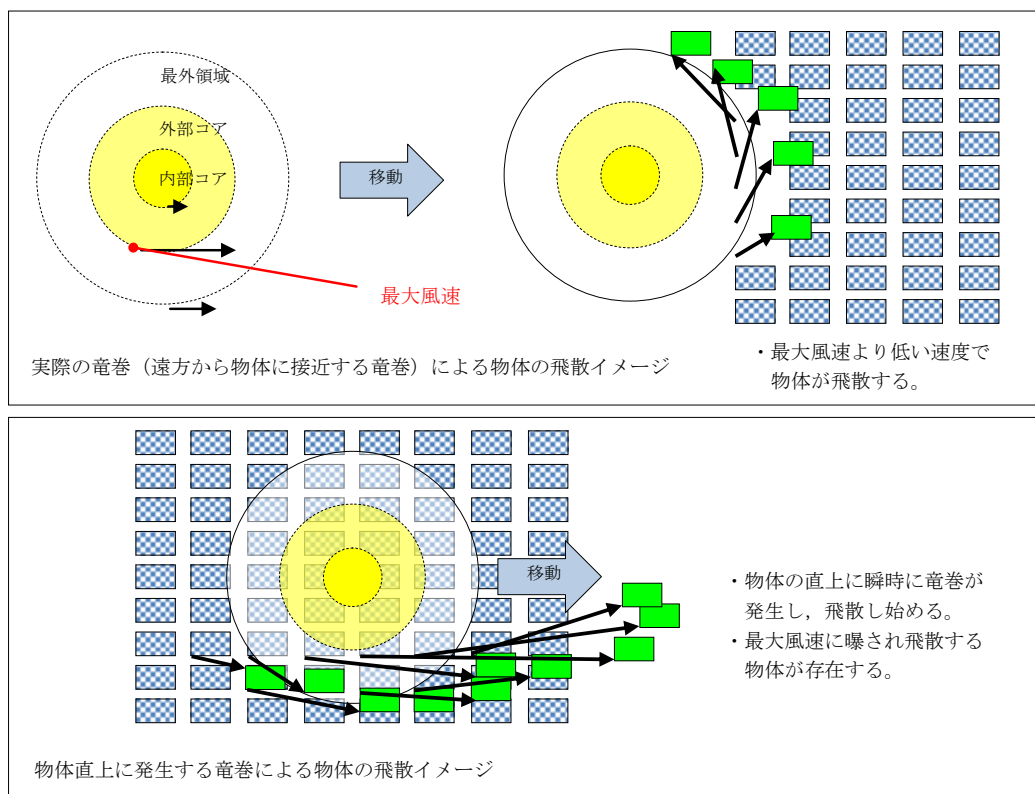


図 24 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点多数配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると考えられる。

### 5.3 飛来物評価法まとめ

飛来物の浮上・飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とした。

また、物体を多点多数配置し、その物体直上での竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内の物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とした。

以上により、フジタモデルを用いて飛来物の飛散速度評価を行う場合でも、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと考えられる。

なお、参考として図 25 に本検討の条件設定による、物体の飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子が分かる。

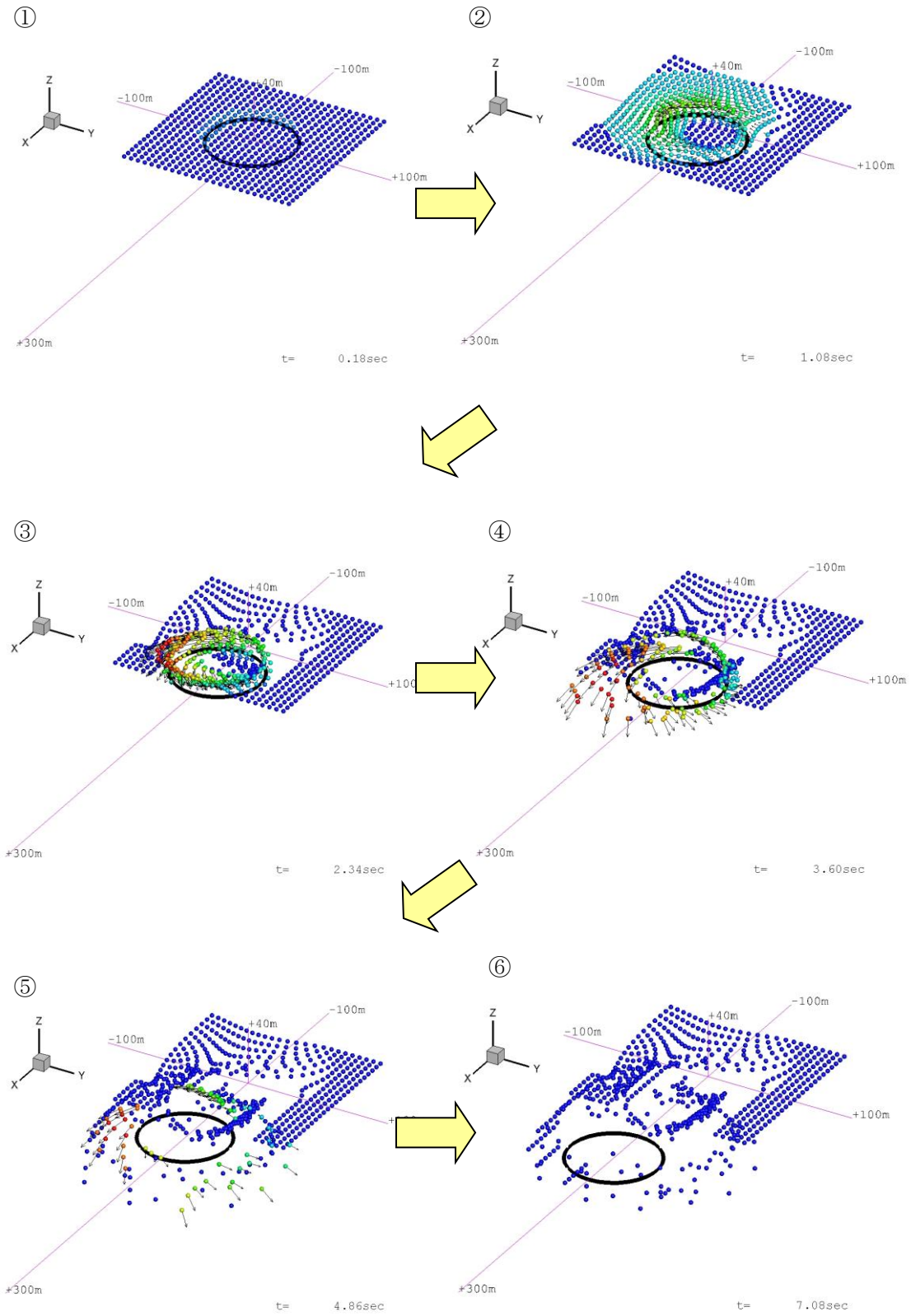


図 25 竜巻による物体の飛散イメージ

## 6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までで、フジタモデルの風速場を用いる優位性や、飛来物評価を行う上で考慮している事項等について説明した。

本節では、フジタモデルの風速場や、前節の飛来物評価法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行った。

### 6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表3に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速(69m/s, 92m/s, 116m/s)を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った。その結果を表4に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況と概ね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F2相当の風速(69m/s)で評価しても大きく飛散することになり、フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

表3 フジタスケールで示されている自動車の飛散状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, または, かなりの距離を転がる)

表4 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻飛散速度 [m/s]	計算結果		
				速度[m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	1	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

## 6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した<sup>(24)</sup>。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径8~10インチの木が折れた事例等も確認されており、図26は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは8フィート、直径(内径)は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表5の通りとした。



"Courtesy of HathiTrust" <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65> <sup>(19)</sup>

図26 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>パイプを収納した木箱(一部は二段重ね)は浮上せずに転倒し、パイプが周辺7m~9mに散乱。</li> </ul> <p>(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long.<sup>(20)</sup>)</p>
------	--

表5 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9 inch (0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m <sup>3</sup>
	飛行定数 C <sub>D</sub> A/m	0.0080 m <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内（x, y=[-2Rm, +2Rm]）に等間隔配置。</li> <li>・ 設置高さ 1 m（パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。）</li> </ul>	

計算結果を表 6 に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況と概ね合致している。

なお、参考としてランキン渦モデルで評価した場合、飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり、実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。

表6 Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果(TONBOS)		
		飛散距離	飛散高さ※2	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	1 m※1	42.6 m	0.34 m	30.7 m/s
ランキン渦モデル	40 m	227 m	0.34 m	40.9 m/s

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。



### 6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下、佐呂間竜巻と呼ぶ。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている<sup>(25)</sup>。被災状況を図25に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図27左上画像の②）。また、4tトラックの他に2台の自動車（図27左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図27 佐呂間竜巻（2006.11.7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）<sup>(25)</sup>  
 文献(24)で示されている竜巻被害の方向を で加筆

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック、乗用車）の飛散評価を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行った。方法としては、下記の2通りとした。

- (a) 竜巻特性や飛来物（4tトラック、乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- (b) 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(i) 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ<sup>(25)(26)</sup>に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表7のように設定した。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

車両と竜巻中心との距離を18m、20m、22mとした場合の解析結果を表8及び図28に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向と概ね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

表7 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s	
	最大接線風速	70m/s	
	移動速度	22m/s	
	コア半径	20m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用。	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両重量	4000kg
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0056 m <sup>2</sup> /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>物体個数1個。</li> <li>竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない。</li> <li>設置高さ0m</li> </ul>		

表8 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	45.4 m	2.8m	25.8 m/s
2	20m	35.5 m	2.3m	22.2 m/s
3	18m	25.9 m	1.7m	18.8 m/s

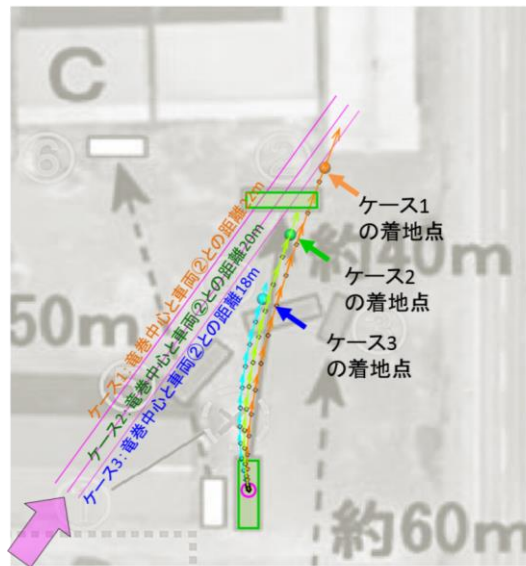


図 28 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(ii) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図 27 の⑥）の被災事例を対象として、物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について、表 9 に示す。

表 9 佐呂間竜巻の乗用車の計算条件

竜巻条件	表 7 と同様		
飛来物条件	乗用車 〔 トヨタカローラ を仮定 〕	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097 $m^2/kg$	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・物体個数 1 個</li> <li>・竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない</li> <li>・設置高さ 0 m</li> </ul>		

乗用車と竜巻中心との距離を、18m、20m、22m とした場合の解析結果を表 10 及び図 29 に示す。飛散距離についてはケース 1 で概ね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向は概ね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物（A 棟）に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（図 27 の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散した

プレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て，図27のA）の直ぐ下流側に駐車しており，その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表10 佐呂間竜巻での乗用車の飛散計算結果

解析ケース	乗用車と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	51.9 m	3.6m	28.9 m/s
2	20m	43.5 m	3.4m	24.7 m/s
3	18m	34.7 m	2.9m	21.1 m/s

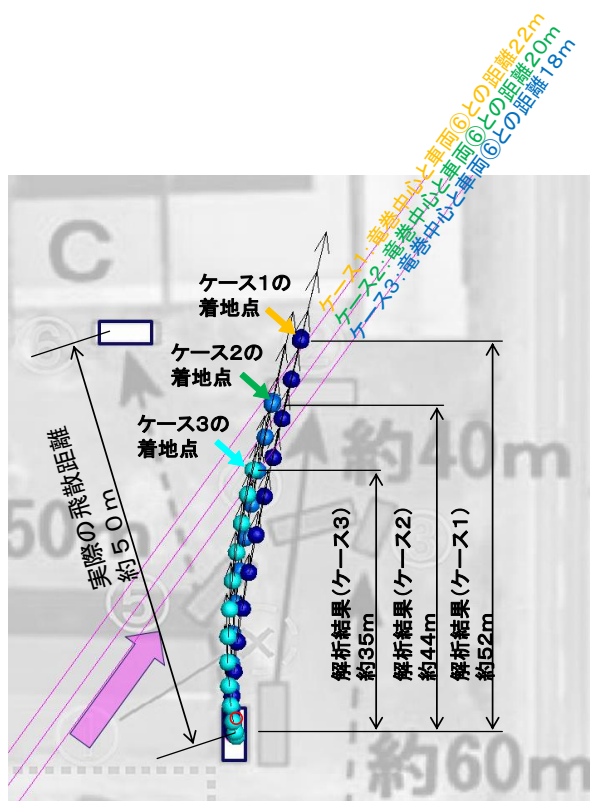


図28 フジタモデルによる乗用車飛散の再現解析結果

(b)原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証<sup>(27)</sup>

ここでは、原子力発電所に適用する飛来物評価法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における4tトラックおよび乗用車の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

(i) 4tトラックの飛散解析

計算条件について表11に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を92m/sとし、その他の特性量については、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会、2013）に例示されている方法に従い、移動速度 $V_{tr}$ を14m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 $R_m$ を30mとした。

表11 原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	表7と同様	
初期配置	・物体個数 51×51 個，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内（ $x, y = [-2R_m, +2R_m]$ ）に等間隔配置。 ・設置高さ 0m	

表12に実際の被災状況と、原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図29に被災後の4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は36m/s、最大飛散高さは3.6m、最大飛散距離は63.4mとなった。

実際の4tトラック飛散距離は約40mであり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回った。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形を留めていることなどから、原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施した。ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

表 12 実際の被災状況と「原子力発電所の飛来物評価法」の結果の比較

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ※ <sup>2</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4m	3.6m	36.0m/s (毎時 130 km)
ランキン渦モデル (地上※ <sup>1</sup> )	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル (40m)	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約 40 m	4t トラックの運転席に 乗車していた乗員 2 名 が幸いも存命で救出さ れ、搬送先の病院で聞き 取り調査に応じており <sup>(25)</sup> 、被災した 4t トラ ックが地面からは 3.6m 以上の高所から落下し たとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外 形を留めていること が示されており <sup>(21)</sup> 、 実際の飛来物速度は 本解析で得られた最 大飛来物速度(約 130 km/h)を遙かに下回 るものと推察でき る。

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。



図 29 竜巻による被災後の 4 t トラックの様子<sup>(25) (26)</sup>

(ii) 乗用車（白）の飛散解析

4t トラックの場合と同様に、原子力発電所に適用する飛来物評価条件で乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表 13 に示す。

乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表 13 「原子力発電所の飛来物評価法」の評価結果の比較（乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ <sup>※2</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル (地上 <sup>※1</sup> )	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル (40m)	305.8m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約 50m	—	—

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。

## 7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく、横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため、本節では、これらの飛来物の挙動について、下記の2点に分けて考察する。

- (a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- (b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

### (a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載の通り、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく、横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

### (b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と竜巻防護施設の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が竜巻防護施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、竜巻防護施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置にあたっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重に、地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

## 8. まとめ

フジタモデルは、米国 NRC による要望で実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国 DOE の重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況と概ね合致していることから、確認することができる。

また、フジタモデルにより算出される風速 ( $V_w$ ) は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出にあたっては保守性を確保したうえで、「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」の通り、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(b) 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含め、より正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等）を正確に捉えることにより、飛来物発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安



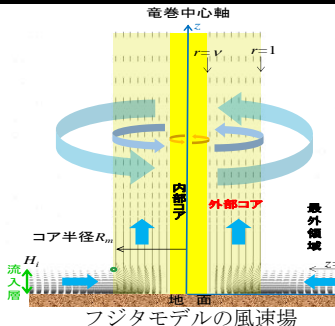
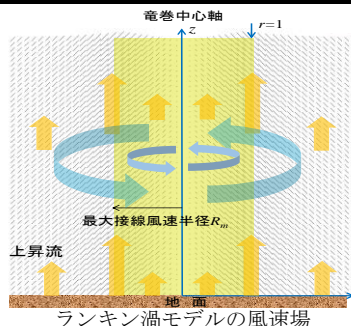
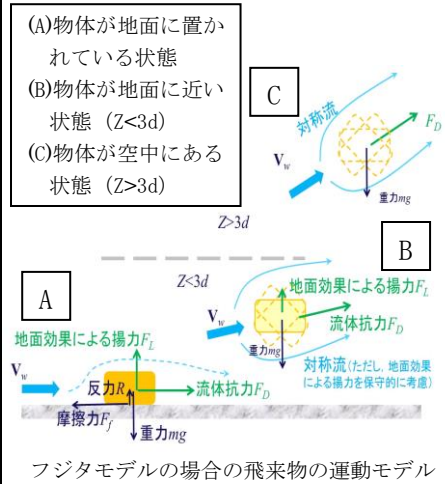
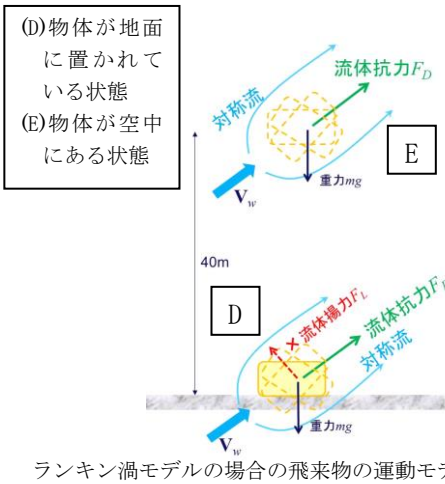
全性を向上させるため、当社の竜巻影響評価については、フジタモデルを適用することとする。

## 9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013.
- (2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (4) 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.
- (5) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.
- (6) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552-1561.
- (7) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002.  
(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.  
(<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico(Docket No.70-3103)
- (14) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.
- (15) 日本鋼構造協会, 構造物の耐風工学, p82

- (16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898 , 1978.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体および  
棧粗度の流体力, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 67, No. 4, I\_1141-I\_1146, 2011.
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の  
地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護  
岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について, 水工学論文集,  
第 44 巻, pp1053~1058, 2000.
- (20) 江口 讓, 西原 崇, 水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電  
力中央研究所 研究報告 U96050, 1997.
- (21) M. R. Ahmed, S. D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical  
airfoil in ground effect, Experimental Thermal and Fluid Science, 29,  
pp. 633-647, 2005.
- (22) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G.,  
Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe  
winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002.
- (23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane  
boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. of Wind  
Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf,  
Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear  
Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (25) 札幌管区气象台: 平成 18 年 11 月 7 日から 9 日に北海道 (佐呂間町他) で発生し  
た竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006 年第 1 号,  
2006.  
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.html> に  
て閲覧可能。)
- (26) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006 年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究  
所災害調査, 46, 2006.  
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (27) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の  
合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日  
本機械学会論文集, vol. 81, No. 823, 2015.

「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

		フジタモデル (及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法)		ランキン渦モデル (及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法)			
風速場モデル	各風速場モデルの概要	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fujita により実観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり、<u>実際に近い風速場構造を有する</u></li> <li>• 半径方向に (内部コア、外部コア、最外領域) の 3 つの領域で構成され、外部コアに上昇風速を有する</li> <li>• <u>接線風速や上昇風速に高さ依存性がある</u></li> <li>• 米国 DOE 重要施設の基準において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定に使用</li> </ul>		 <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現</u></li> <li>• 上昇流は全領域に存在</li> <li>• <u>接線風速や上昇風速に高さ依存性がなく、地面から吹き出しが生じる流れとなっている</u> (飛散評価を行う場合、<u>地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できないため、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる</u>)</li> <li>• 米国 NRC Regulatory Guide 1.76 にて採用</li> </ul>			
	メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能</li> <li>→ <u>地上における構造物に対する力や挙動を表現するのに適しているモデルであり、防護対策や固縛対策の範囲や強度について、実効性の高い対策とすることが可能。</u></li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現可能</li> </ul>			
	デメリット	<p>特になし。 (ランキン渦モデルに比べ、解析プログラムが複雑になるが、近年の計算機能力の向上や評価ツールの高度化により問題とならない)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する (地面からも吹き出しがある) ため、<u>実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できない</u></li> <li>→ <u>地上における構造物に対し、過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる。</u> (例えば、SA 車両を固縛することで、機動性が損なわれる)</li> </ul>			
	主なパラメータ (設計竜巻の最大風速 92m/s の場合)	竜巻の移動速度 $V_T$	14 (m/s)	評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、各値や式をフジタモデルへ適用	竜巻の移動速度 $V_T$	14 (m/s)	評価ガイドの値や式より算出
		最大接線風速 $V_{Rm}$	78 (m/s)		最大接線風速 $V_{Rm}$	78 (m/s)	
		最大接線風速半径 $R_m$	30 (m)		最大接線風速半径 $R_m$	30 (m)	
		最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$	64 (hPa)	フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 (フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる)	最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$	75 (hPa)	
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$		42 (hPa/s)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$		35 (hPa/s)		
内部コア半径と外部コア半径の比 $\nu$		0.3	Fujita により提案された経験式より算出 (流入層高さは他の文献に示されている値と概ね同じであることを確認) ※: その他の定数についても、Fujita により提案された値を使用				
流入層高さ $H_i$	15 (m)						
飛来物評価手法	物体の浮上・飛来モデル	<p>(A)物体が地面に置かれている状態 (B)物体が地面に近い状態 (<math>Z &lt; 3d</math>) (C)物体が空中にある状態 (<math>Z &gt; 3d</math>)</p>  <p>フジタモデルの場合の飛来物の運動モデル</p> <p>《物体の浮上・飛来モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地面の存在により物体上面と下面の流れが非対象となることで生じる地面効果による揚力 (左図 A/B) と流れの速度方向に平行な抗力 (左図 A~C、但し地面付近では抗力の影響は小さい) を考慮し、地面に置かれた状態からの飛来高さや飛来物速度等を評価</li> </ul> <p>《揚力係数》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、翼のような極端な形状を除き保守的となるよう、風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定 (物体の風の受け方や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認)</li> </ul>		<p>(D)物体が地面に置かれている状態 (E)物体が空中にある状態</p>  <p>ランキン渦モデルの場合の飛来物の運動モデル</p> <p>《物体の浮上・飛来モデル》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 物体に働く流れの速度方向に平均的な抗力 (左図 D/E) と自重の関係から、物体が飛来するかどうかを判定し、飛来する場合には、風速場を表現できている空中浮遊状態からの飛来高さや飛来速度等を評価</li> </ul> <p>《抗力係数》</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 物体がランダム回転し、物体の各面に均等に力を受けるものとして、<u>抗力係数は 3 方向の平均値を設定</u></li> </ul>			
	竜巻が物体に与える速度に関する設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し、<u>風速場における物体の中から、最大の飛来物速度や飛来距離を設定</u></li> <li>• 実際に竜巻が遠方から近づく場合には、低い風速に曝され飛来することになるが、物体を強制的に高速域に配置し、物体が瞬時に最大風速を受けるよう設定</li> </ul>		同左			

柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉

火山影響評価について

## 第6条：外部からの衝撃による損傷の防止

### 目次

#### 別添3－1

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 安全施設のうち評価対象施設の抽出
  - 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の組合せについて
3. 降下火砕物による摩耗について
4. 塗装による降下火砕物の化学的影響（腐食）について
5. 積雪量の重畳の考え方について
6. 降下火砕物による送電鉄塔への影響について
7. 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
8. アイスランド火山を用いる基本的考え方とセントヘレンズ火山による影響評価
9. 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
10. 降下火砕物の侵入による潤滑油への影響
11. 降下火砕物のその他設備への影響について
12. 火山灰の金属腐食研究

13. 安全保護系計装盤への降下火砕物の影響
14. 6号及び7号炉の建屋及び屋外タンクの降灰除去について
15. アクセスルートにおける降下火砕物除去時間の評価について
16. 降下火砕物降灰時のバグフィルタ取替についての手順
17. 観測された諸噴火の最盛期における噴出率と継続時間
18. 重大事故等対処設備への考慮
19. 軽油タンクからの燃料移送について
20. 水質汚染に対する補給水等への影響について

# 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、図 1.1 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柏崎刈羽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小さ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評価を行う。

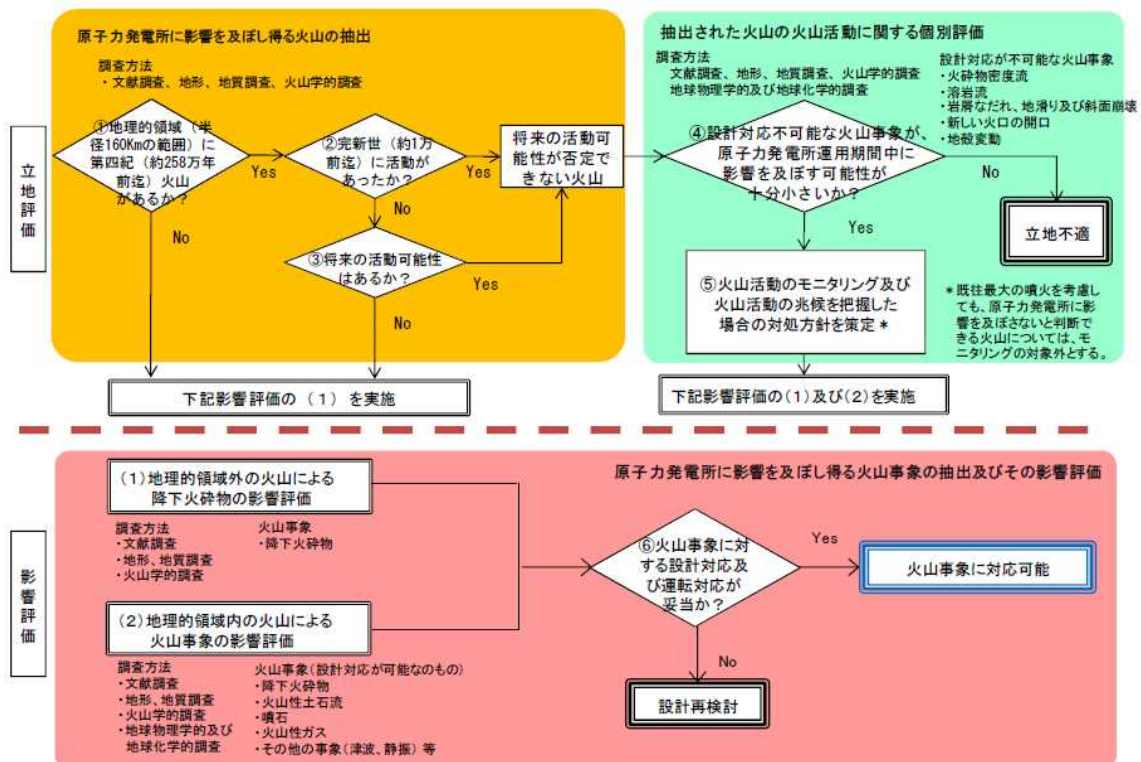


図 1.1 火山影響評価の基本フロー「原子力発電所の火山影響評価ガイド」から抜粋

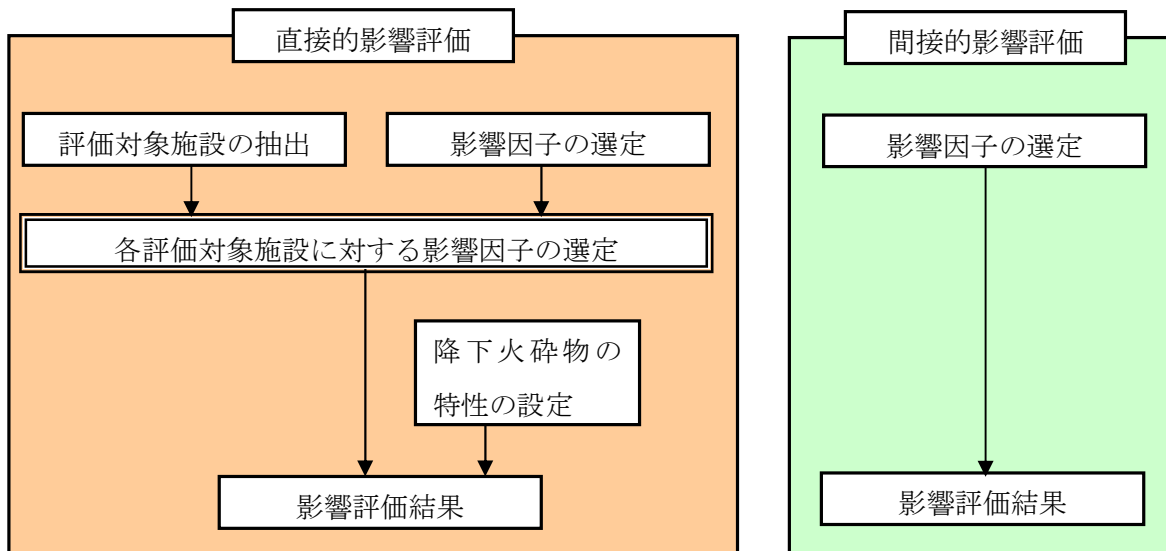


図 1.2 影響評価のフロー

## 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（81 火山）について、完新世における活動の有無を確認し、将来の活動可能性のある火山、若しくは将来の活動可能性が否定できない火山を抽出した。

その結果、黒岩山、苗場山、妙高山、志賀高原火山群、新潟焼山、新潟金山、黒姫山、燧ヶ岳、志賀、沼沢、飯縄山、草津白根山、日光白根山、子持山、四阿山、白馬大池、榛名山、男体・女峰火山群、赤城山、烏帽子火山群、鼻曲山、浅間山、高原山、那須岳、立山、磐梯山、上廊下、吾妻山、鷲羽・雲ノ平、北八ヶ岳、安達太良山及び環諏訪湖の 32 火山を将来の活動可能性のある火山若しくは将来の活動可能性を否定できない火山として評価した。

### 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若しくは将来の活動可能性を否定できない火山として評価した 32 火山を対象として、文献調査に基づき、運用期間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周辺では確認されておらず、敷地まで十分に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小さいと評価した。

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小さいと評価した。

新しい火口の開口については、敷地周辺で深部低周波地震の活動がないこと、地温勾配が小さく、また地殻熱流量が小さいことから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に小さ



いと評価した。

地殻変動については、敷地周辺が過去の火山活動に伴う火口及びその近傍に位置しないことから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に小さいと評価した。

以上の検討結果より、発電所の運用期間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小さいと評価した。また、これらの火山活動は、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、柏崎刈羽原子力発電所6，7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。）のみが柏崎刈羽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。

地質調査において、発電所敷地周辺で確認されている降下火砕物堆積層について、給源が特定できる降下火砕物については、各火山の活動性を評価し、同規模の噴火が発生する可能性は小さいと評価した。また、給源不明の降下火砕物（阿相島テフラ等）は、敷地で最大35cmを確認しているが、水系等の影響を受けて堆積したと推定され、当時の堆積環境と異なる現在において、これらに基づいて将来の降下火砕物の層厚を想定することは適切でないと判断した。

一方、プラント運用期間中に、この様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、既往解析結果の知見、降下火砕物シミュレーションを用い評価した結果、約23.1cmという結果を導いた。想定する降下火砕物堆積量は、評価結果（約23.1cm）を基に設定するが、敷地で最大層厚35cmが確認されていることも踏まえ、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35cmと設定した。そのほか得られた降下火砕物の特性を表1.1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、プラント寿命期間を考慮して年超過発生頻度 $10^{-2}$ 規模の積雪を踏まえ設定した。

表 1.1 降下火砕物特性の設定結果

項目	設定	備考
層度	35cm	鉛直荷重に対する健全性評価 に使用
密度	湿潤密度：1.5g/cm <sup>3</sup>	
荷重 <sup>※1</sup>	8,542N/m <sup>2</sup>	
粒径	8.0mm 以下	水循環系の閉塞並びに換気， 電気系及び計装制御系に対す る機械的影響評価に使用

※1：湿潤状態の降下火砕物の荷重（35cm×1500kg/m<sup>3</sup>×9.80665m/s<sup>2</sup>）＋積雪荷重（115.4cm<sup>※2</sup>×29.4N/（m<sup>2</sup>・cm）<sup>※3</sup>）＝8,542N/m<sup>2</sup>（小数点以下を切り上げ）

※2：積雪量＝1日あたりの積雪量の年超過確率10<sup>-2</sup>/年の値（84.3cm）

＋最深積雪量の平均値（31.1cm）＝115.4cm

※3：新潟県建築基準法施行細則に基づく積雪の単位荷重（積雪1cm 当たり 29.4N/m<sup>2</sup>）

### 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、柏崎刈羽原子力発電所 6，7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、降下火砕物のみが柏崎刈羽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。

降下火砕物に対し、防護すべき評価対象施設の安全機能を損なわない設計とする。以下に、火山事象に対する防護の基本方針を示す。

- (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) 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 安全施設のうち評価対象施設の抽出

「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、「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。

また，安全施設とは，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス 1，2 及び 3 に該当する構築物，系統及び機器（以下，「安全重要度クラス 1，2，3 に属する構築物，系統及び機器」という。）を指していることから，火山の影響に対して防護する施設としては，安全重要度クラス 1，2，3 に属する構築物，系統及び機器とする。

また，以下の点を踏まえ，安全施設のうち，外部事象防護対象施設は，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（原子炉停止，炉心冷却，使用済燃料プール冷却を維持するために必要な異常の発生防止の機能，若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備）又はそれを内包する建屋とする。

- ・降下火砕物襲来時の設備損傷状況を踏まえ，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の中から屋内設備，屋外設備，屋外に開口している設

備（降下火砕物を含む海水及び気体の流路となる設備）及び外気を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設備を評価対象施設として抽出した。

また、上記以外の安全施設については、降下火砕物に対して機能維持する、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、安全上支障のない期間に除灰、修復すること等の対応が可能な設計とする。

以上を踏まえた、抽出フローを図 1.3 に示す。抽出した評価対象施設を表 1.2 及び表 1.3 に示すとともに、評価対象施設の設置場所を図 1.4 に示す。

設計基準事象に対して耐性を確保する必要があるのは設計基準事故対処設備であり、重大事故等対処設備ではないが、設置許可基準規則第 43 条の要求を踏まえ、設計基準事象によって、設計基準事故対処設備の安全機能と重大事故等対処設備が同時にその機能が損なわれることがないことを確認するとともに、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といった観点から、代替手段により必要な機能を維持できることを確認する。

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

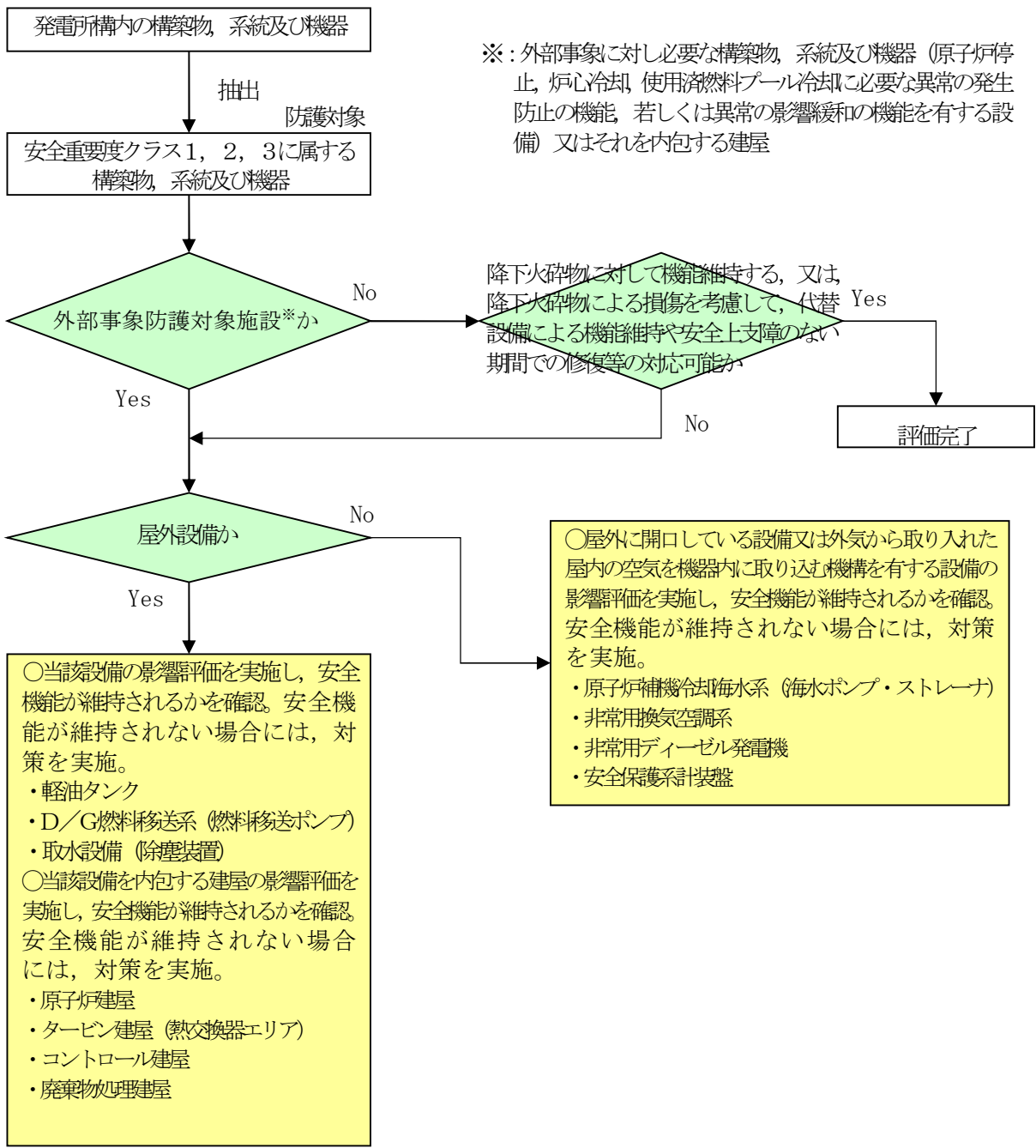


図 1.3 降下火砕物に対する安全施設の評価フロー

表 1.2 評価対象施設

分類	評価対象施設
屋外設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軽油タンク (クラス 1)</li> <li>・ D/G 燃料移送系 (クラス 1)</li> <li>・ 取水設備 (除塵設備) (クラス 3)</li> </ul>
屋内設置の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉建屋</li> <li>・ タービン建屋 (熱交換器エリア)</li> <li>・ コントロール建屋</li> <li>・ 廃棄物処理建屋</li> </ul>
屋外に開口している設備又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能を有する設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉補機冷却海水系 (クラス 1) (海水ポンプ・海水ストレナ)</li> <li>・ 非常用換気空調系 (クラス 1) (中央制御室換気空調系, 非常用 D G 換気空調系, 非常用 D G / Z 換気空調系, C / B 計測制御電源盤区域換気空調系, 熱交換器エリア換気空調系)</li> <li>・ 非常用ディーゼル発電機 (クラス 1)</li> <li>・ 安全保護系計測制御盤 (クラス 1)</li> </ul>

表 1.3 評価対象施設の抽出 (1 / 4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	外部事象防護対象施設	屋外設備	屋外に開口している設備等	降下物体として維持する 又は 降下物体による損傷を考慮して代替設備による維持が安全に支障のない期間の稼働が対応可能	評価対象施設	
	機能	構築物、系統又は機能							
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
	過剰反応度の印加防止機能	制御棒カップリング・制御棒駆動機構	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
	炉心形状の維持機能	炉心支持構造物、燃料集合体	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
MS-1	原子炉の緊急停止機能	原子炉停止系の制御棒による系 (制御棒、制御棒駆動系)	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
	未臨界維持機能	原子炉停止系 (制御棒駆動系、ほう酸水注入系)	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	逃がし安全弁 (安全弁としての開機能)	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
	原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統 (残留熱除去系、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、逃がし安全弁、自動減圧系)、原子炉格納容器 (サブプレッションプール)	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
		復水補給水系 (復水貯蔵槽)	Rw/B	○	×	×	—	廃棄物処理建屋	
	炉心冷却機能	非常用炉心冷却系 (残留熱除去系、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、自動減圧系)、原子炉格納容器 (サブプレッションプール)	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
		復水補給水系 (復水貯蔵槽)	Rw/B	○	×	×	—	廃棄物処理建屋	
	放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器、原子炉格納容器隔離弁、原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管、残留熱除去系	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
		原子炉建屋	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋	
		非常用ガス処理系、可燃性ガス濃度制御系	R/B	—	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—	
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系	R/B, C/B	○	×	○	—	原子炉建屋 コントロール建屋 安全保護系計装盤	
		非常用所内電源系	非常用所内電源系	R/B, C/B, T/B	○	×	×	—	原子炉建屋 コントロール建屋 タービン建屋
			非常用ディーゼル発電機	R/B	○	×	×	—	原子炉建屋
軽油タンク、非常用ディーゼル発電機燃料移送系		屋外	○	○	—	—	軽油タンク 非常用ディーゼル 発電機燃料移送系		
非常用ディーゼル発電機給気系		R/B	○	×	○	—	原子炉建屋 非常用ディーゼル 発電機給気系		
安全上特に重要な関連機能		中央制御室及びその遮へい・中央制御室換気空調系	C/B	○	×	○	—	コントロール建屋 中央制御室換気空調系	
		非常用換気空調系	R/B, C/B, T/B	○	×	○	—	原子炉建屋 コントロール建屋 タービン建屋 非常用換気空調系	
原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	R/B, T/B	○	×	○	—	原子炉建屋 タービン建屋 原子炉補機冷却海水系 取水設備 (除塵機)			
直流電源系・計測制御電源系	R/B, C/B	○	×	×	—	原子炉建屋 コントロール建屋			

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

○：YES ×：No —：該当せずもしくは評価完了

表 1.3 評価対象施設の抽出 (2 / 4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	外部事象防護対象施設	屋外設備	屋外との接続がある設備	降圧降物に対して隔離 保持する 又は 降圧降物 による損壊を考慮して代 替設備による機能喪失 安全上支障のない期間での修 復等の対応可能	評価対象施設	
	機能	構築物, 系統又は機能							
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能 (ただし, 原子炉冷却材圧力バウナ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ナダリに直接接続されていないものは除く)	原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウナダリから外れる部分), 主蒸気系	R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため, 影響なし)	-	
		原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン (→MS-1 炉心冷却機能に記載)	R/B	○	×	×	-	原子炉建屋	
	原子炉冷却材圧力バウナダリに直接接続されていないものであって, 放射性物質を貯蔵する機能	使用済燃料プール(使用済燃料貯蔵ラックを含む), 新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能)	R/B	○	×	×	-	原子炉建屋	
		放射性気体廃棄物処理系(活性炭希ガスホールドアップ装置)	T/B	×	-	-	○ (屋内設備のため, 影響なし)	-	
	燃料を安全に取り扱う機能	燃料交換機, 原子炉建屋クレーン	R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため, 影響なし)	-	
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	逃がし安全弁(吹き止まり機能に関連する部分)	R/B	○	×	×	-	原子炉建屋	
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	非常用所内電源系空調	R/B・C/B・T/B	○	×	○	-	原子炉建屋 コントロール建屋 タービン建屋 非常用所内電源系 空調	
	燃料プール水の補給機能	残留熱除去系	R/B	○	×	×	-	原子炉建屋	
	放射性物質放出の防止機能	燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	○	×	×	-	原子炉建屋	
			原子炉建屋原子炉棟	R/B	×	-	-	○ (影響なし)	-
			放射性気体廃棄物処理系(オフガス系)隔離弁	T/B	×	-	-	○ (屋内設備のため, 影響なし)	-
			排気筒(非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分)	屋外	×	-	-	○ (影響なし)	-
		非常用ガス処理系, 空調機(間接関連系:MS-2)	R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため, 影響なし)	-	
事故時のプラント状態の把握機能	事故時監視計器の一部(格納容器エリアモニター)	C/B	○	×	×	-	コントロール建屋		
制御室外からの安全停止機能	制御室外原子炉停止装置(安全停止に関連するもの)	R/B	○	×	×	-	原子炉建屋		

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

○: YES    ×: No    -: 該当せずもしくは評価完了



表 1.3 評価対象施設の抽出 (3 / 4)

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	外部事象防護対象施設	屋外設備	屋外との接続がある設備	降下碎物にさらされ機能維持する 又は 降下碎物による損傷を考慮して代替設備による機能維持が安全上支障のない期間の修繕等の対応可能	評価対象施設
	機能	構築物、系統又は機能						
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2 以外のもの)	原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管、弁	R/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
	原子炉冷却材の循環機能	原子炉再循環系	R/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
	放射性物質の貯蔵機能	サブプレッションプール水サージタンク	屋外	×	—	—	○ (運用停止中のため影響なし)	—
		復水貯蔵槽、液体廃棄物処理系、固体廃棄物処理系	Rw/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
		固体廃棄物貯蔵庫、ドラム缶	固体廃棄物貯蔵庫	×	—	—	○ (補修を実施(放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施))	—
		固体廃棄物処理建屋、固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	×	—	—	○ (補修を実施(放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施))	—
		新燃料貯蔵庫、新燃料貯蔵ラック	R/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
	電源供給機能 (非常用を除く)	タービン、発電機及び励磁装置、復水系、給水系、循環水系	T/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
		送電線	屋外送電線	×	—	—	○ (代替設備(非常用ディーゼル発電機)により機能維持可能)	—
		変圧器、開閉所	屋外	×	—	—	○ (代替設備(非常用ディーゼル発電機)により機能維持可能)	—
	プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く)	原子炉制御系 (RWM 含む)、原子炉核計装、原子炉プロセス計装	C/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
	プラント運転補助機能	補助ボイラ設備	補助ボイラ建屋	×	—	—	○ (補修を実施)	—
		計装用圧縮空気系	T/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし(建屋内は、外気取入口にバグフィルタが設置されている換気空調系によって、空調管理されているため、屋内の空気取り込みによる影響なし))	—
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放射防止機能	燃料被覆管	R/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
	原子炉冷却材の浄化機能	原子炉冷却材浄化系	R/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—
復水浄化系		T/B	×	—	—	○ (屋内設備のため、影響なし)	—	

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

○：YES ×：No —：該当せずもしくは評価完了

表 1.3 評価対象施設の抽出（4 / 4）

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所	外部事象防護対象施設	屋外設備	屋外との接続がある設備	降下灰物にさらされて機能維持する、又は降下灰物による損傷を考慮して代替設備による機能維持が安全上支障のない期間で修復等の対応可能	評価対象施設		
	機能	構築物、系統又は機能								
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能	逃がし安全弁（逃がし弁機能）	R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-		
		タービンバイパス弁	T/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-		
	出力上昇の抑制機能	原子炉冷却材再循環系（再循環ポンプトリップ機能）、制御棒引抜監視装置	R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-		
	原子炉冷却材の補給機能	制御棒駆動水圧系、原子炉隔離時冷却系	R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-		
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	原子炉冷却材再循環ポンプ MG セット	Rw/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-		
	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	原子力発電所緊急時対策所		免震重要棟 R/B(5号炉)	×	-	-	○ (設計荷重に対して影響ないことを確認)	-	
		試料採取系		R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	
		通信 連絡 設備	所外 通信	無線系	マイクロ波無線鉄塔	×	-	-	○ (代替設備（衛星系）により機能維持可能)	-
				有線系	送電鉄塔	×	-	-	○ (代替設備（衛星系）により機能維持可能)	-
			所内外 通信	有線系 無線系 衛星系	免震重要棟（屋外設備含む）	×	-	-	○ (建屋内設備は影響なし。屋外設備（無線系、衛星系）は、灰が積もりにくい形状であるとともに、適切に除灰するなどの対応により機能維持可能)	-
					R/B(5号炉)（屋外設備含む）	×	-	-	○ (建屋内設備は影響なし。屋外設備（無線系、衛星系）は、灰が積もりにくい形状であるとともに、適切に除灰するなどの対応により機能維持可能)	-
		所内 通信	有線系	各建屋（地下設備含む）	×	-	-	○ (建屋（免震重要棟除く）内及び地下布設のため影響なし)	-	
				屋外設備	×	-	-	○ (復旧（PHS 基地局）により機能維持可能)	-	
		放射能監視設備（モニタリングポスト）		屋外	×	-	-	○ (代替設備（可搬型モニタリング設備）により機能維持可能)	-	
		放射線監視設備（放射能観測車）		可搬型 SA 設備 保管場所	×	-	-	○ (適切に除灰するなどの対応により機能維持可能)	-	
		放射線監視設備（建屋内）		各建屋内	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	
		事故時監視計器の一部		R/B	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	
				気象観測装置	×	-	-	○ (代替設備（可搬型気象観測装置）により機能維持可能)	-	
		消火系		給水建屋 水処理建屋	×	-	-	○ (代替設備（防火水槽）により機能維持可能)	-	
	ろ過水タンク（屋外配管含む）			×	-	-	○ (代替設備（防火水槽）により機能維持可能)	-		
泡消火設備	×			-	-	○ (代替設備（消防車）により機能維持可能)	-			
安全避難通路、非常照明		各建屋内	×	-	-	○ (屋内設備のため、影響なし)	-			

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

○：YES ×：No -：該当せずもしくは評価完了

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

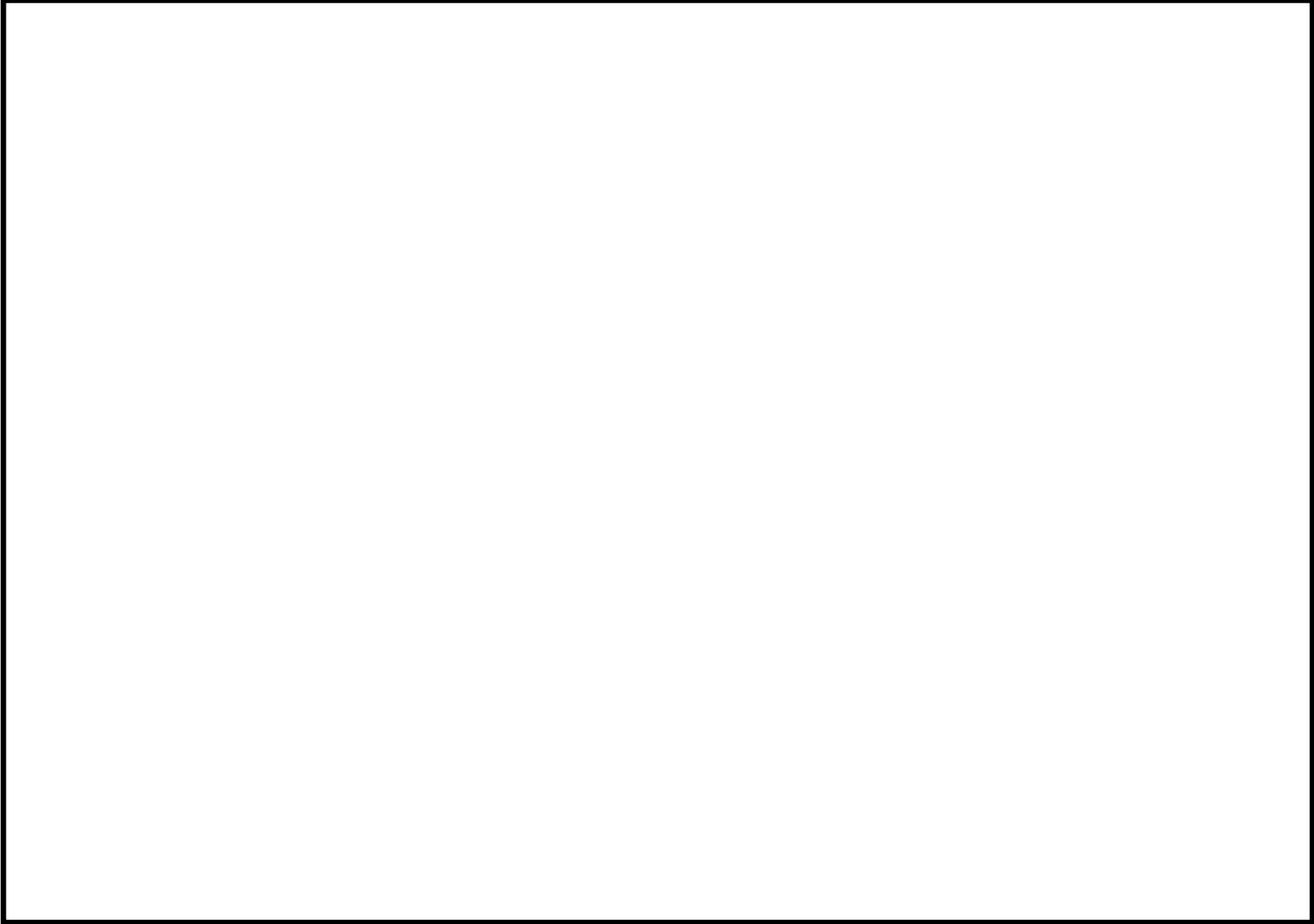
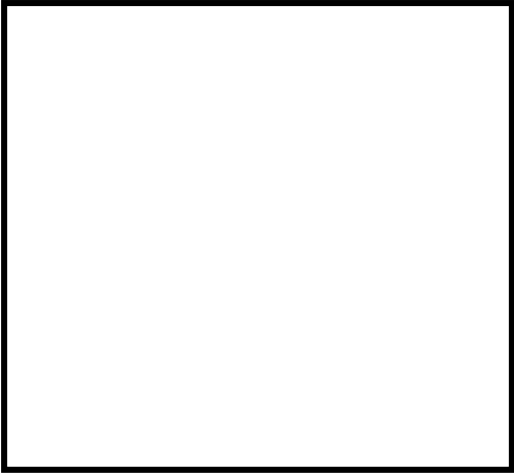


図 1.4 評価対象施設の設置場所 (1/6)

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

7号炉原子炉建屋地下1階



7号炉原子炉建屋地上4階



7号炉原子炉建屋地上3階



7号炉原子炉建屋地上3階（中間階）

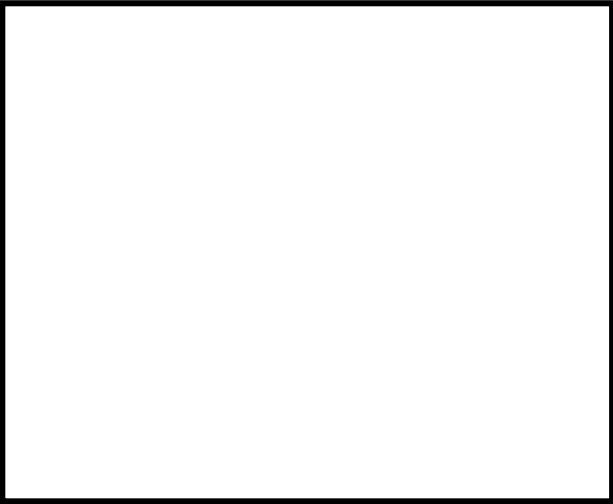
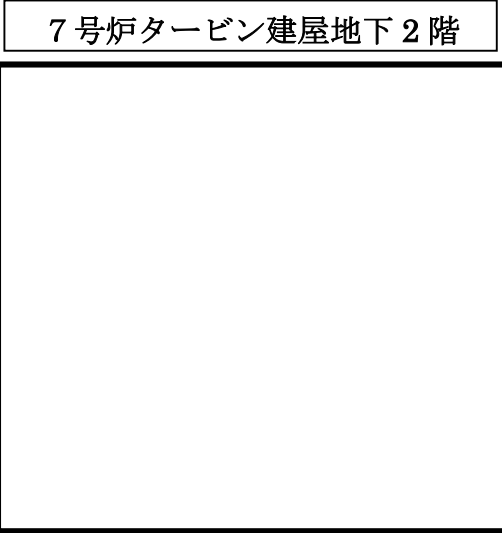
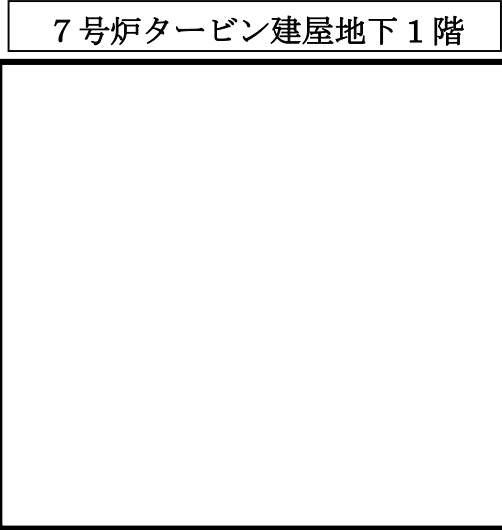


図 1.4 評価対象施設の設置場所 (2/6)

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。



7号炉タービン建屋地上3階

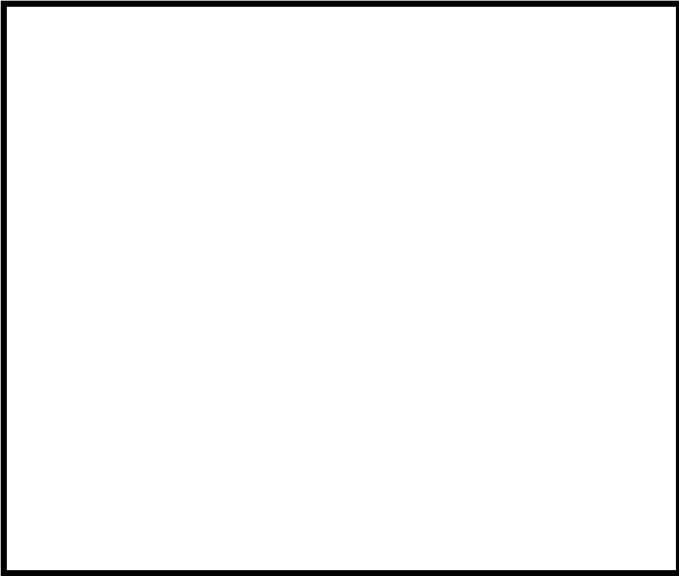
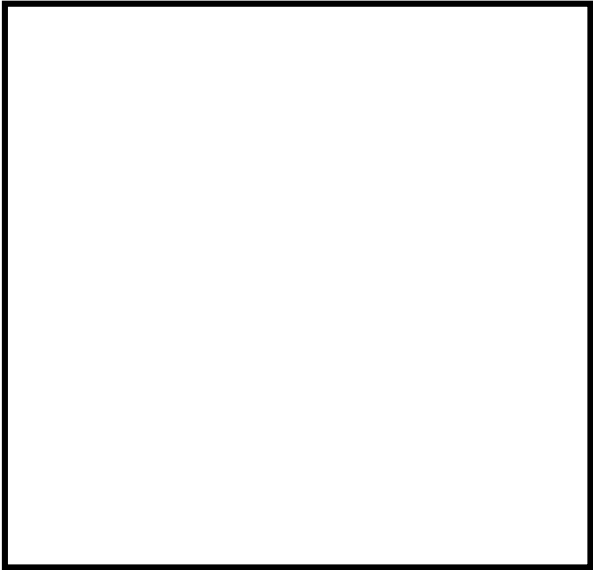


図 1.4 評価対象施設の設置場所 (3/6)

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

6号炉原子炉建屋地上3階



6号炉原子炉建屋地上4階



6号炉原子炉建屋地上3階（中間階）



図 1.4 評価対象施設の設置場所 (4/6)

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

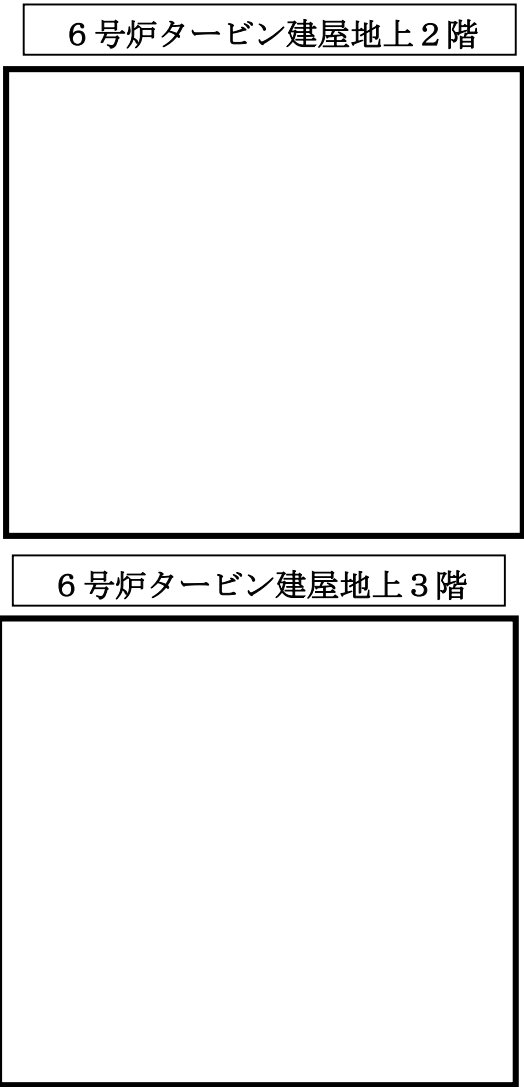
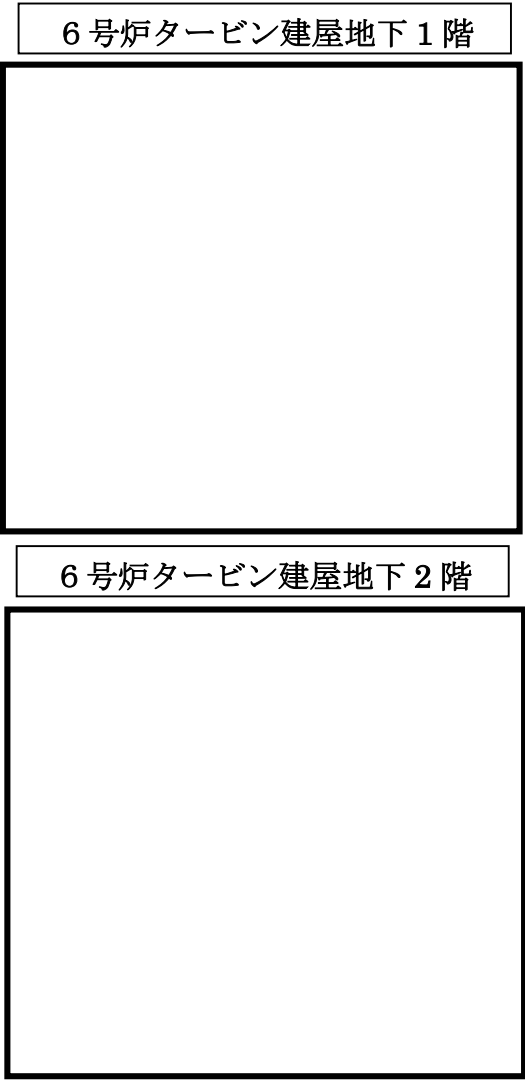


図 1.4 評価対象施設の設置場所 (5/6)

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

6, 7号炉コントロール地上2階



6, 7号炉コントロール建屋屋上



図 1.4 評価対象施設の設置場所 (6/6)



### 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， 砂よりもろく硬度は低い。
- (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）

#### 3.4.2 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， 水質汚染及び絶縁低下を抽出し， 評価対象施設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， 柏崎刈羽原子力発電所 6， 7 号炉で想定される降下火砕物の条件を考慮し， 表 1.4 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， 「竜巻防護に関する基本方針」に包絡される。

なお， 評価対象施設とした建屋については， 建築基準法における積雪の荷重の考え方に準拠し， 降下火砕物及び積雪の除去を適切に行うことから， 短期許容応力度を許容限界とする。

また， 建屋を除く評価対象施設においては， 許容応力を「日本工業規格」， 「日本機械学会の基準・指針類」及び「原子力発電所耐震設計技術指針（日本電気協会）」に準拠する。

(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」、並びに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、電気系及び計装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、電気系及び計装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、電気系及び計装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、電気系及び計装制御系に対する化学的影響（腐食）」、並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、市水道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、降下火砕物襲来時に外部事象防護対象施設へ供給等する必要はないため、安全施設の安全機能に影響しない。

(補足資料－20)

(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、電気系及び計装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 1.4 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、降雨条件及び積雪の重畳を考慮する。	○
構造物への化学的影響（腐食）	屋外設備において影響を考慮すべき要因であり、影響がないことを確認する。	○
粒子の衝突	降下火砕物は発電所に到達する降下火砕物は微小であり重量も小さいことから、衝突荷重により設備に影響を与える可能性はない。	—
水循環系の閉塞	海水中に漂う降下火砕物については取水する可能性があるため、海水系において影響を考慮すべき要因であり、狭隘部等における閉塞の影響を考慮する。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磨耗	降下火砕物は、砂等に比べて破碎し易く、硬度が小さいことから、降下火砕物粒子による磨耗が設備に影響を与える可能性は小さい。	—
水循環系の化学的影響（腐食）	海水系において影響を考慮すべき要因であり、降下火砕物成分が海水中に溶出した場合に懸念される腐食について短期的に影響がないことを確認する。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。	○
換気系、電気系及び計装制御系に対する機械的影響（摩耗）	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、電気系及び計装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。	○
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いて影響を考慮すべき要因である。	○
水質汚染	水質汚染によって、市水道が汚染する可能性があるが、降下火砕物襲来時に外部事象防護対象施設へ補給等する必要はないため、プラントの安全機能に影響はない。	—
絶縁低下	送電網より引き込む開閉所や変圧器周りに碍子洗浄装置などがあり、降下火砕物が確認された場合、洗浄することが可能である。また、絶縁低下により、外部電源喪失に至った場合、非常用ディーゼル発電機により電源の供給を実施する。 屋内の施設であっても、屋内の空気を取り込む機構を有する計装盤については、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、評価対象施設の特性を踏まえて必要な評価項目を表 1.5 の通り選定した。

## 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) 評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重

評価対象施設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。

### (2) 設計基準事故時荷重

降下火砕物の降灰は原子炉冷却材喪失事故などの設計基準事故の起因とはならないため、火山事象と設計基準事故は独立事象となる。

なお、評価対象施設のうち設計基準事故時荷重が生じ得る屋外設備としては、軽油タンク及び非常用ディーゼル発電機燃料移送系であるが、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が変化することはないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、降下火砕物及び設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

### (3) その他の自然現象の影響を考慮した荷重の組み合わせ

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地震及び積雪であり、降下火砕物との荷重と適切に組み合わせる。

(補足資料－5)

## 3.6 降下火砕物に対する設計

### 3.6.1 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が安全機能を損なわない以下の設計とする。（個別評価-1～

## 個別評価-8)

### a. 外部事象防護対象施設を内包する建屋

原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋及び廃棄物処理建屋は，「構造物への静的負荷」について，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。なお，建築基準法における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，降下火砕物の荷重を短期に生じる荷重とし，建築基準法による短期許容応力度を許容限界とする。

「腐食」については，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. 原子炉補機冷却海水ポンプ

「閉塞」については，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，降下火砕物の粒径に対し十分な流路幅を設ける設計とするともに，ポンプ軸受部が閉塞しない設計とする。

「腐食」については，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。

### c. 海水ストレーナ

「閉塞」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または差圧管理される設計とする。

「腐食」については，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. 非常用ディーゼル発電機

「閉塞」については，非常用ディーゼル発電機の吸気口の上流側の外気取入口には，ガラリが取り付けられており，下方から吸い込む構造であること，換気空調系のフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕獲する性能）を設置することで，降下火砕物が流路に侵入しにくい設計とする。また，外気取入口に，換気空調系の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。

なお、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。

「摩耗」については、降下火砕物は砂より硬度が低くもろいことから、摩耗の影響は小さく、かつ構造上の対応として、吸気口の上流側の外気取入口には、ガラリが取り付けられており、下方から吸い込む構造であること、換気空調系のフィルタを設置することで、降下火砕物が流路に侵入しにくい設計とし、仮に当該施設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、摩耗により安全機能を損なわない設計とする。

「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ことから、金属材料を用いることで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。

#### e.軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）

「構造物への静的負荷」について、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。

「腐食」については、外装の塗装等によって短期での腐食により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。

「閉塞」については、軽油タンクのベント管を下向きに取り付ける、また、燃料移送ポンプは、降下火砕物が侵入しづらい設計とする。

#### f.換気空調設備

非常用換気空調系（中央制御室換気空調系、非常用DG換気空調系、非常用DG/Z換気空調系、C/B計測制御電源盤区域換気空調系、熱交換器エリア換気空調系）は、外気取入口に、ガラリが取り付けられており、下方から吸い込む構造であること、換気空調系のフィルタ（粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕獲する性能）を設置することで、降下火砕物が流路に侵入しにくい設計とする。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。

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再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こと、さらに外気取入遮断時において室内の居住性を確保するため、酸素濃度及び二酸化炭

素濃度の影響評価を実施することにより、安全機能を損なわない設計とする。

#### g.取水設備（除塵装置）

「閉塞」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設計とする。

「腐食」については、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。

#### h.安全保護系計装盤

当該機器の設置場所は非常用DG/Z換気空調系，中央制御室換気空調系にて空調管理されており，本換気空調設備の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）を設置することで，降下火砕物が流路に侵入しにくい設計とする。従って，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。

### 3.6.2 間接的影響に対する設計方針

柏崎刈羽原子力発電所6，7号機の非常用所内交流電源設備は，非常用ディーゼル発電機（3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（3基；18kL以上）を有している。更に，軽油タンク（2基；550kL以上）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燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要な電力の供給が継続できる設計とする。

（補足資料－19）



表 1.5 降下火砕物が影響を与える評価対象施設と影響因子の組み合わせ

影響因子 評価対象施設	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 計装制御系に対する 機械的影響 （閉塞・摩耗）	換気系、電気系及び 計装制御系に対す 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，タービン 建屋（熱交換器エリア）， コントロール建屋，廃 棄物処理建屋	●	●	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)
原子炉補機冷却海水 ポンプ	－(①)	－(①)	● (ポンプ)	● (ポンプ)	－(①) (モータ)	－(①) (モータ)	－(④)	－(④)
海水ストレーナ	－(①)	－(①)	●	●	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)
非常用ディーゼル発 電機	－(①)	－(①)	－(④)	－(④)	●	●	－(④)	－(④)
軽油タンク（燃料移送 ポンプ含む）	●	●	－(④)	－(④)	● (燃料移送ポンプ)	● (燃料移送ポンプ)	－(④)	－(④)
換気空調設備	－(①)	－(②)	－(④)	－(④)	●	●	●	－(④)
取水設備（除塵装置）	－(④)	－(②)	●	●	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)
屋内の計装盤	－(①)	－(①)	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)	－(④)	●

凡例 ●：詳細な評価が必要な設備  
 ー：評価対象外( )内数値は理由

【評価除外理由】

- ①：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：腐食があっても、機能に有意な影響を受け難い  
 ③：塗装により腐食が起り難い  
 ④：影響因子と直接関連しない

表 1.6 降下火砕物による直接的影響の評価結果

評価対象施設	確認結果	個別評価
原子炉建屋，タービン建屋（熱交換器エリア），コントロール建屋，廃棄物処理建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>・考慮する堆積荷重は8,542N/m<sup>2</sup>であり，建屋の許容堆積荷重はそれ以上の設計とするため，安全性への影響はない。</li> <li>・外装塗装がなされていることから，降下火砕物による化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはない。</li> </ul>	1
原子炉補機冷却海水ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ポンプの狭隘部は降下火砕物の粒径より大きく，軸受けには異物逃がし溝が設けられているため，降下火砕物による閉塞には至らない。また，降下火砕物は，破碎し易く摩耗による影響は小さい。</li> <li>・耐食性のある材料を使用していることから，降下火砕物による化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはない。</li> </ul>	2
海水ストレーナ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・降下火砕物の粒径は，海水ストレーナのフィルタ穴径より僅かに小さいものの，差圧管理されており，自動洗浄されることから閉塞することはない。なお，海水ストレーナのフィルタを通過した降下火砕物は，下流の機器（海水熱交換器等）に対して閉塞等の影響を与えることはない。また，降下火砕物は，破碎し易く摩耗による影響は小さい。</li> <li>・海水ストレーナ，及び下流の機器内面に防汚塗装等が施されており，直ちに機能を喪失することはない。</li> </ul>	3
非常用ディーゼル発電機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外気取り入れ箇所は，降下火砕物が侵入しにくい構造であり，また，フィルタにより降下火砕物が捕集されること，及び侵入した場合でも降下火砕物の硬度が低く破碎しやすいことから，機能に影響を及ぼすことはない。また，フィルタは，必要に応じて清掃及び交換することにより除灰ができる。</li> </ul>	4
軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・考慮する堆積荷重は8,542N/m<sup>2</sup>程度であり，軽油タンクの許容堆積荷重は約13,000N/m<sup>2</sup>（暫定値）以上であるため，安全性への影響はない。</li> <li>・軽油タンクには，外面塗装が施されており，直ちに機能を喪失することはない。</li> <li>・軽油タンクのベント管は，雪害対策として，ベント管開口部位置をタンク屋根外側に位置しており，地上から約10mの高さがあることから，想定される降下火砕物堆積量に対し，開口部閉塞には至らない。</li> <li>・燃料移送ポンプ及び電動機は，その構造上から，降下火砕物が内部に侵入することはない。</li> </ul> <p>また，降下火砕物堆積荷重に対しては，別途防護対策を実施するなかで堆積荷重を考慮した設計とする。</p>	5
非常用換気空調設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常用換気空調設備の外気取入口には，ガラリ及びフィルタ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，降下火砕物を与える影響は小さい。また，フィルタは，必要に応じて清掃及び交換することにより除灰ができる。</li> <li>・中央制御室換気空調設備については，外気取入ダンパを閉止し，再循環運転することにより，中央制御室の居住環境が維持されることを確認する。</li> </ul>	6
取水設備（除塵装置）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・降下火砕物の粒径は十分小さく，取水口を閉塞することはない。</li> <li>・取水設備（除塵装置）は塗装等の対応を実施しており，直ちに腐食により機能に影響を及ぼすことはない。</li> </ul>	7
安全保護系計装盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全保護系計装盤が設置されている部屋は，非常用電気品区域換気空調系，中央制御室換気空調系にて空調管理されており，本空調の外気取入口にはフィルタが設置されていることから，降下火砕物に対する高い防護を有しており，侵入する降下火砕物は微細なものに限られ，またその可能性は小さく，その付着等により短絡等を発生させる可能性はないことから，安全保護系計装盤の安全機能が損なわれることはない。</li> </ul>	8

### 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 1.5 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。

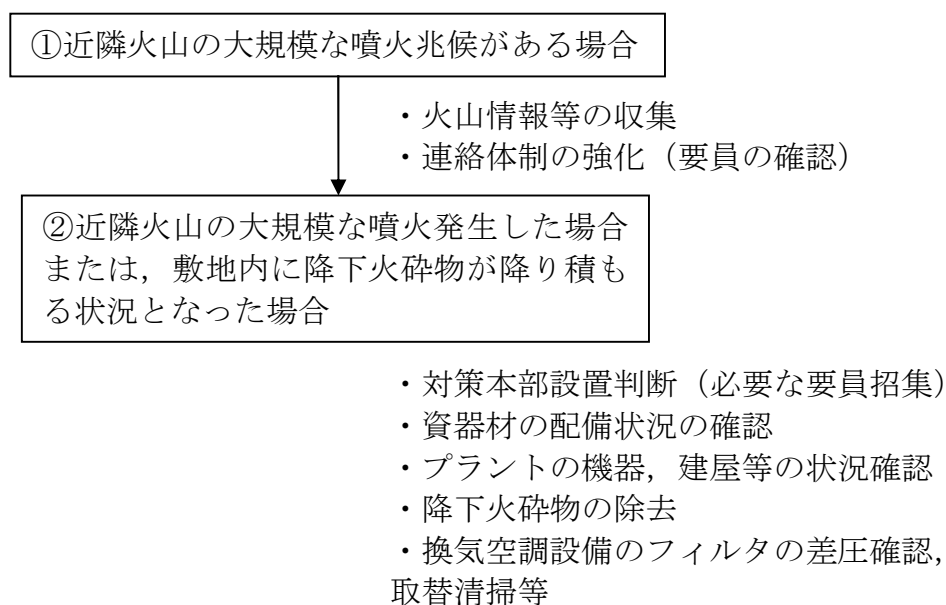


図 1.5 降下火砕物に対応するための運用管理フロー

#### ①近隣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、規模、風向、降灰予測等）を把握し、連絡体制を強化する。

#### ②近隣火山の大規模な噴火発生した場合または、降下火砕物が降り積もる状況となった場合

担当箇所は、近隣火山において大規模な噴火が確認された場合、または、発電所敷地で降灰が確認された場合に、関係個所と協議の上、対策本部の設置判断をする。

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・建屋等の火山灰の除去のため、発電所内に保管しているホイールローダ・スコップ・マスク等の資器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。

敷地内に火山灰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、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。

### 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。

降灰が確認された場合には、建屋や屋外の設備等に長期間降下火砕物の荷重を掛け続けないこと、また降下火砕物の付着による腐食等が生じる状況を緩和するために、評価対象施設に堆積した降下火砕物の除灰を適切に実施する。

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手順を定める。

降灰が確認された場合には、換気空調設備の外気取入口の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え等を実施する。

## 4. まとめ

降下火砕物による直接的影響およ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。

降下火砕物の飛来の恐れがある場合は、火山噴火対策を行うための体制を構築し、プラント及び屋外廻りの監視の強化、火山灰の除去等を実施する。

## 建屋に係る影響評価

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通り評価した。

## (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，タービン建屋，コントロール建屋，廃棄物処理建屋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：35cm
- ・密度：1.5g/cm<sup>3</sup>

## ② 積雪条件

- ・積雪量：115.4cm

積雪量＝1日あたりの積雪量の年超過確率 $10^{-2}$ /年の値（84.3cm）  
 ＋最深積雪量の平均値（31.1cm）＝115.4cm

- ・単位荷重：29.4N/m<sup>2</sup>（新潟県建築基準法施行細則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通り。

飽和状態の降下火砕物の荷重（35cm×1500kg/m<sup>3</sup>×9.80665m/s<sup>2</sup>）  
 ＋積雪荷重（115.4cm×29.4N/（m<sup>2</sup>・cm））＝8,542N/m<sup>2</sup>

表 1-1 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，全ての建屋において，許容堆積荷重は設計堆積荷重を十分に上回っていることから，対象建屋の安全性への影響はない。

表 1-1 建屋の堆積荷重概略評価結果

号機	評価対象施設	対象設備エリア	許容堆積荷重 <sup>※1</sup> (N/m <sup>2</sup> )	降下火砕物 堆積荷重 (N/m <sup>2</sup> )	評価結果
K6	原子炉建屋	燃料プール上部	12,000	8,542	○
	コントロール建屋	中央制御室上部（全体） K7 共通	21,000		○
	タービン建屋（熱交換器エリア）	熱交エリア上部	10,000		○
K7	原子炉建屋	燃料プール上部	12,000		○
	コントロール建屋	中央制御室上部（全体） K6 共通	21,000		○
	タービン建屋（熱交換器エリア）	熱交エリア上部	11,000		○
	廃棄物処理建屋	CSP 位置上部（K6 と共通）	9,000 <sup>※2</sup>		○

※1：許容堆積荷重は、以下の方法で算出した。

- ① 建屋の屋根部を構成する構造部材の断面性能を元に、各構造部材で発生する応力が短期許容応力度となるような屋根部の鉛直荷重（以下、耐荷重という）を計算する。（耐荷重算定の詳細フローを図 1-1 に示す）
- ② 屋根部に作用する荷重としては堆積物による荷重以外に、常時作用する荷重（固定荷重、機器荷重及び配管荷重等）があるため、①で計算した耐荷重から常時作用する荷重の差し引いた値を許容堆積荷重として設定する（有効数字2桁で切り下げ）。

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

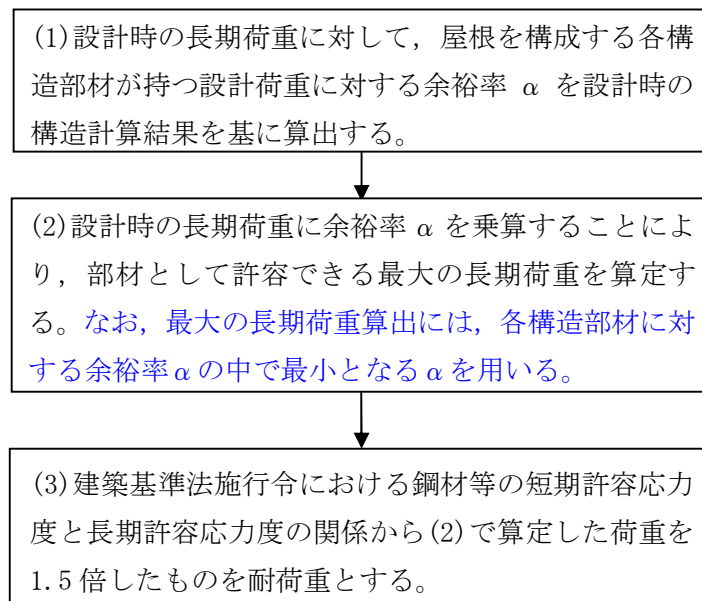


図 1-1 耐荷重算定フロー

②構造物への化学的影響（腐食）

原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋，廃棄物処理建屋については，外壁塗装を施していることから，火山灰による化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはない。

（補足資料－４）

## 原子炉補機冷却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に係る影響評価について以下の通り評価した。

### (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海水ポンプにより取水した場合に、流水部、軸受け部等が閉塞し、機器の機能に影響がないことを評価する。

#### ② 水循環系の摩耗

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に、摩耗による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海水ポンプにより取水した場合に、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。

### (2) 評価条件

#### ① 降下火砕物条件

- ・ 粒径：8.0mm 以下

### (3) 評価結果

#### ① 水循環系の閉塞

- ・ 流水部の閉塞

原子炉補機冷却海水ポンプ流水部の狹隘部は数十 mm であり、想定する降下火砕物の粒径は 8mm 以下であるため、閉塞には至らない。

- ・ 軸受部の閉塞

原子炉補機冷却海水ポンプの軸受けの隙間は、約 1mm～4mm 程度の許容値以下で管理されている。一部の降下火砕物は軸受けの隙間より、軸受け内部に入り混む可能性があるが、異物逃がし溝（約 5mm 程度）が設けられており、軸受部の閉塞には至らない。



枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

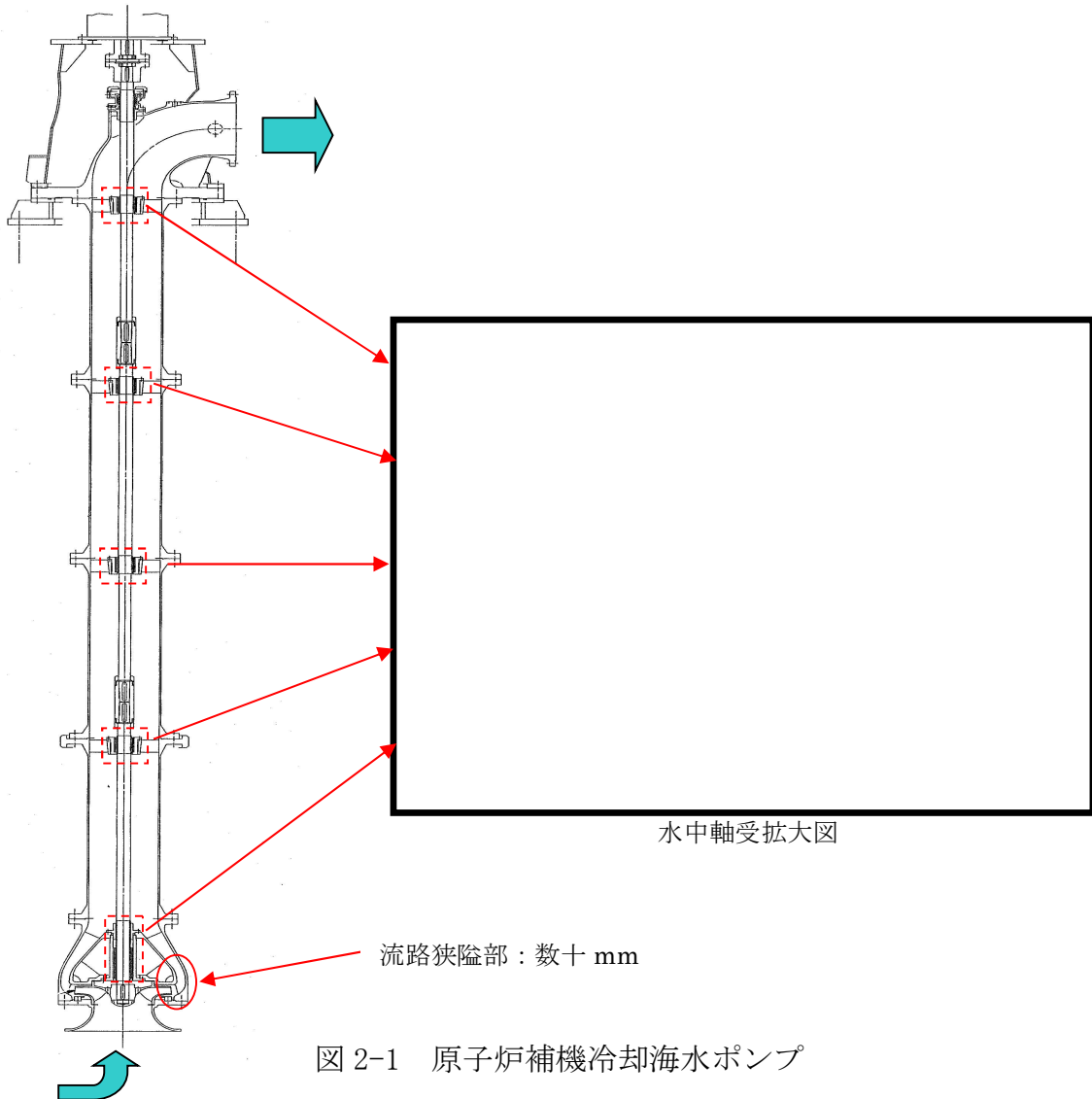


図 2-1 原子炉補機冷却海水ポンプ

## ② 水循環系の摩耗

降下火砕物は破碎し易く、硬度が小さ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、また、日常の保守管理等により補修が可能。

(補足資料-3)

## ③ 水循環系の化学的影響 (腐食)

原子炉補機冷却海水ポンプは、ステンレス製であり、また、塗装等の対応を実施していることから、腐食により原子炉補機冷却海水ポンプの機能に影響を及ぼすことはない。

(補足資料-4)

## 海水ストレーナに係る影響評価

降下火砕物による海水ストレーナに係る影響評価について以下の通り評価した。

## (1) 評価項目

## ① 水循環系の閉塞

降下火砕物によって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。

## ② 水循環系の摩耗

降下火砕物によって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。

## ③ 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物によって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。

## (2) 評価結果

## ① 水循環系の閉塞

各号機の海水ストレーナのフィルタ穴径を示す。

	6号炉	7号炉
フィルタ穴径	8mm	7mm

想定する降下火砕物の粒径は、最大で8mmであるが、7mm以上の粒径割合は、およそ4%程度であり、また、取水口からポンプ取水箇所までの距離が数十mあるため、海水ストレーナは閉塞する可能性は少ない。また、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、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（6号炉：1,700mmAq、7号炉：1,800mmAq）で自動洗浄される。

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、下流設備の熱交換器の伝熱管の穴径（6号炉：23.0mm、7号炉：16.6mm）に対して、想定する降下火砕物の粒径は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。

原子炉補機冷却海水ポンプの定格流量は1台あたり、約1,800m<sup>3</sup>/hと大きく、冷却器管内で流れが一様になり、降下火砕物がストレーナ内で堆積し、閉塞する可能性は低い。

## ②水循環系の摩耗

降下火砕物は破碎し易く、硬度が小さ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、また、日常の保守管理等により補修が可能。

(補足資料－3)

## ③水循環系の化学的影響（腐食）

海水ストレーナは、ライニングが施工されていることから、直ちに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、耐食性に優れた材料（アルミニウム黄銅管）を用いていること、及び連続通水状態であり著しい腐食環境にならないことから、腐食により下流設備に影響を及ぼすことはない。

## 非常用ディーゼル発電機（機関）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について以下の通り評価した。

## (1) 評価項目

## ① 換気系、電気系及び計装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、電気系及び計装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）への侵入等により、化学的影響（内部腐食）によって、機能に影響がないことを評価する。

## (2) 評価条件

- ・粒径：8.0mm 以下

## (3) 評価結果

## ① 換気系、電気系及び計装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（機関）の吸気系統は、非常用ディーゼル発電機非常用送風機室の機関給気口より上流側に、換気空調系のフィルタ（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、降下火砕物の侵入を防止している。

粒径が  $2\mu\text{m}$  程度のものについては、図 4-1 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は、当該間隙内に侵入し、摩耗発生が懸念されるが、降下火砕物は、砂と比較しても破碎しやすく<sup>※1</sup>、硬度が低く<sup>※2</sup>、これまでの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の可能性は小さい。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、更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。また、潤滑油系には機関付フィルタが設置されているが、メッシュ寸法が ( $30\mu\text{m}$ ) と取り込んだ降下火砕物によって閉塞することはなく長期的な影響も少ないと考えられる。加えて、換気空調系のフィルタを通過した降下火砕物の潤滑油への混入を想定し、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。

(補足資料－ 3, 9, 10, 12)

また、シリンダから排出される排気ガスの温度は、約 500℃であることから、融点が約 1,000℃である降下火砕物の溶融による影響はない。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

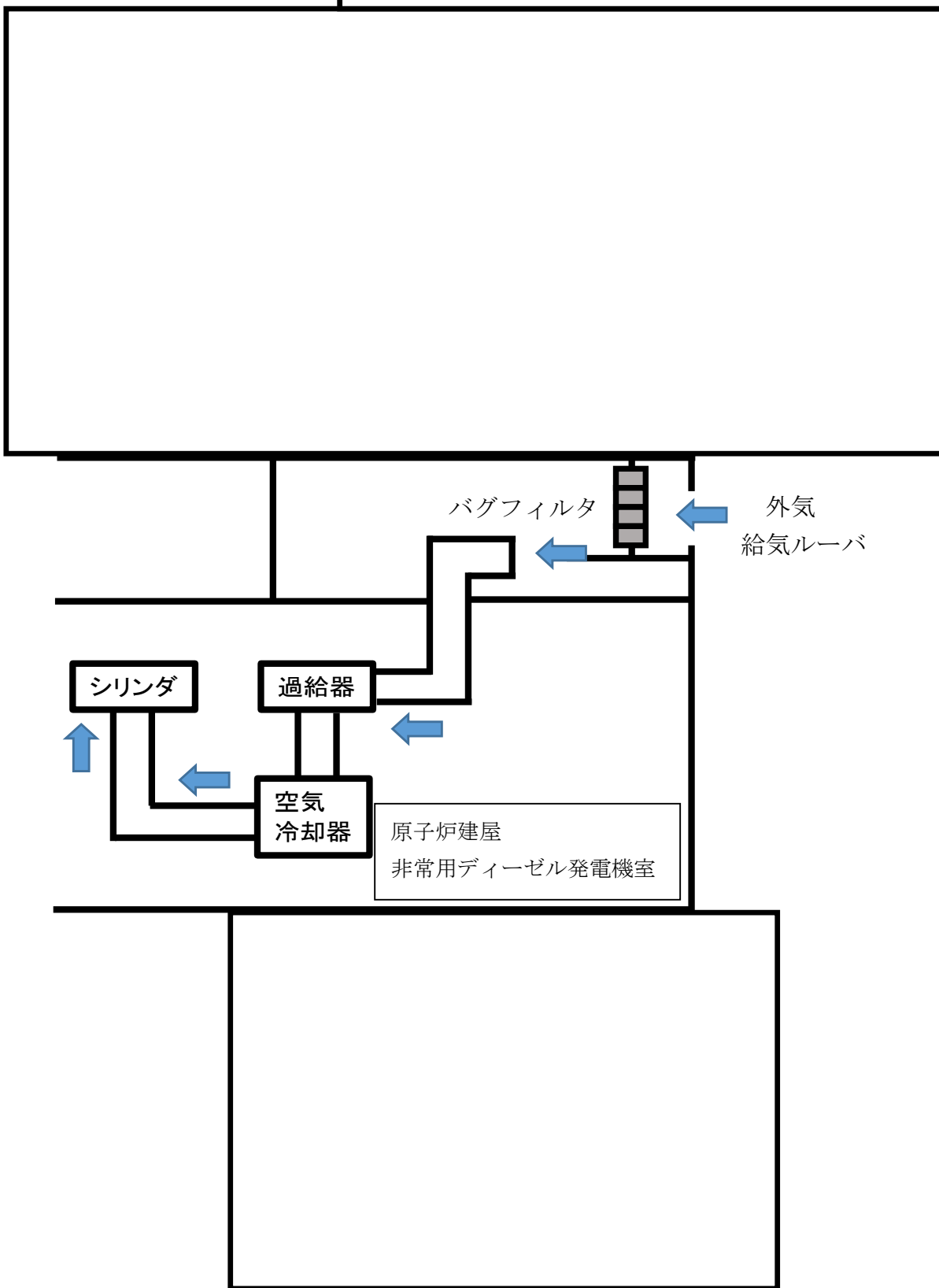


図 4-1 非常用ディーゼル機関給気系統構造図

※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 他（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

② 換気系，電気系及び計装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，降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないことから，金属材料を用いることで非常用ディーゼル発電機の機能に影響を与えにくい。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－ 1 2）

## 軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）に係る影響評価

降下火砕物による軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）への影響について以下の通り評価した。

## (1) 評価項目

## ① 構造物への静的負荷

軽油タンクについては、降下火砕物の堆積による堆積荷重に対して健全性に影響がないことを評価する。

燃料移送ポンプについては、鋼板性のカバーで覆われており、直接堆積しない構造であるが、別途、堆積荷重を考慮した防護対策を実施する。

## ② 構造物への化学的影響（腐食を含む）

降下火砕物の軽油タンク及び燃料移送ポンプへの付着や堆積による化学的腐食により、機能への影響がないことを評価する。

## ③ 換気系、電気系及び計装制御系に対する機械的影響

軽油タンクのベント管が、降下火砕物の閉塞による影響がないことを評価する。  
燃料移送ポンプについては、軸受け等への侵入による、機能に影響がないことを評価する。

## ④ 換気系、電気系及び計装制御系に対する化学的影響（腐食）

燃料移送ポンプモータへの侵入による、化学的影響（内部腐食）によって、機能に影響がないことを評価する。

## (2) 評価条件

- ・ 堆積荷重：8,542N/m<sup>2</sup>
- ・ 粒径：8.0mm 以下

## (3) 評価結果

## ① 構造物への静的負荷

表に、軽油タンク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、全ての軽油タンクにおいて、許容堆積荷重は堆積荷重を上回っていることから、降下火砕物の荷重により、各軽油タンクの機能が喪失しないことを確認した。なお、燃料移送ポンプについては、当該ポンプ上部に防護板を設置することで、静的荷重によって機能喪失しない設計とする。



表 5-1 軽油タンクの堆積荷重評価結果（値は暫定値）

号機	評価対象構造物	評価対象部位	設計耐荷重 (N/m <sup>2</sup> )	降下火砕物 堆積荷重 (N/m <sup>2</sup> )	評価結果
K6	軽油タンク A,B	ラフタボルト部	約 13,000	8,542	○
K7	軽油タンク A,B	ラフタボルト部	約 13,000		○

② 構造物への化学的影響（腐食を含む）

軽油タンクの化学的影響については、外面塗装が施されており、直ちに機能を喪失することはない。（補足資料－４）

また、燃料移送ポンプの化学的影響については、当該ポンプ上部に防護板を設置することで、降下火砕物が燃料移送ポンプと直接接触する可能性は低いことから、直ちに機能を喪失することはない。

③換気系，電気系及び計装制御系に対する機械的影響  
（軽油タンク）

軽油タンクのベント管は、雪害対策として、ベント管開口部が下向きに取り付けられている。また、開口部はタンク屋根外側に位置しており、地上から約 10m の高さがあることから、想定される降下火砕物堆積量に対し、開口部閉塞には至らない。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

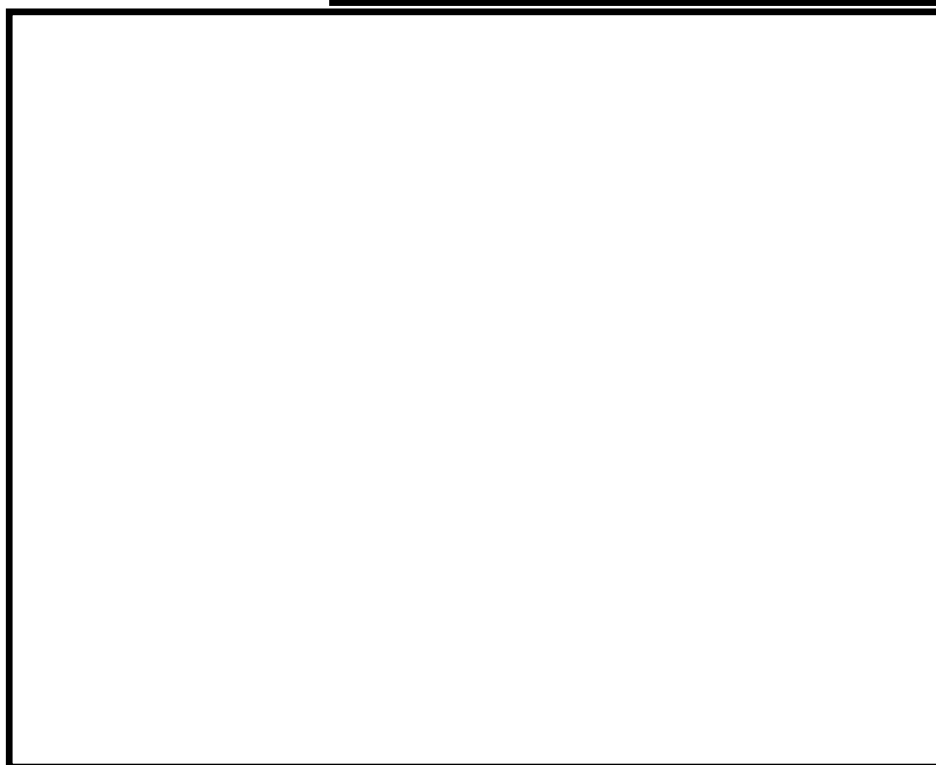


図 5-1 軽油タンク外形図

(燃料移送ポンプ)

ポンプ本体への異物混入経路としては、軸貫通部があるが、当該部はオイルリング等を用いて潤滑剤や内部流体の漏えいの無いよう適切に管理されていることから、火山灰がポンプ本体へ侵入することはない。

動力源となる電動機については「全閉外扇屋外型」であり、ケーシングの放熱フィン等に堆積した火山灰もしくは浮遊中の火山灰が冷却ファン側から吸入された場合でも電動機内部に火山灰が侵入することはない。

#### ④換気系、電気系及び計装制御系に対する化学的影響（腐食）

上記のように、ポンプ本体及び電動機内部に火山灰が侵入することはないため影響はない。



図 5-2 燃料移送ポンプ外形写真

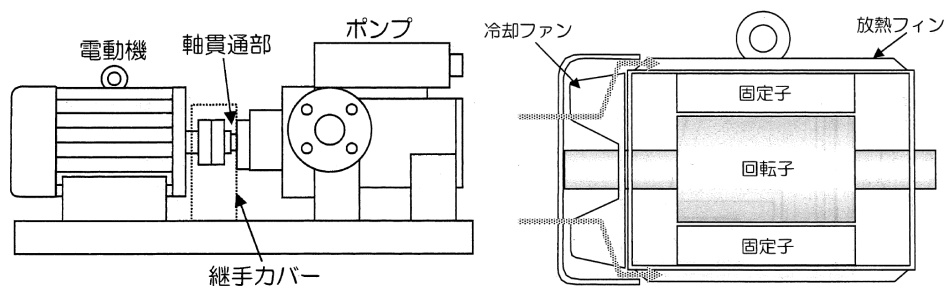


図 5-3 燃料移送ポンプ概略構造図

## 換気空調設備（外気取入口）に係る影響評価

降下火砕物による 非常用換気空調系（中央制御室換気空調系，非常用DG換気空調系，非常用DG/Z換気空調系，C/B計測制御電源盤区域換気空調系，熱交換器エリア換気空調系）（外気取入口）への影響について以下の通り評価した。

## （1）評価項目

## ① 換気系，電気系及び計装制御系に対する機械的影響（閉塞，摩耗）

降下火砕物の換気空調設備（外気取入口）に対する，機器の機能に影響がないことを評価する。

## ② 換気系，電気系及び計装制御系に対する化学的影響（腐食）

換気空調設備（外気取入口）に対する，化学的影響（内部腐食）によって，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発電所周辺の大気が換気空調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無いことを評価する。

## （2）評価条件

## ① 降下火砕物条件

- ・粒径：8.0mm 以下

## （3）評価結果

## ① 換気系，電気系及び計装制御系に対する機械的影響（閉塞，摩耗）

各評価対象施設の外気取入口には，ガラリ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から，給気を供給する系統および機器に対して降下火砕物が与える影響は少ない。

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交換することが可能である。

（補足資料7，16）

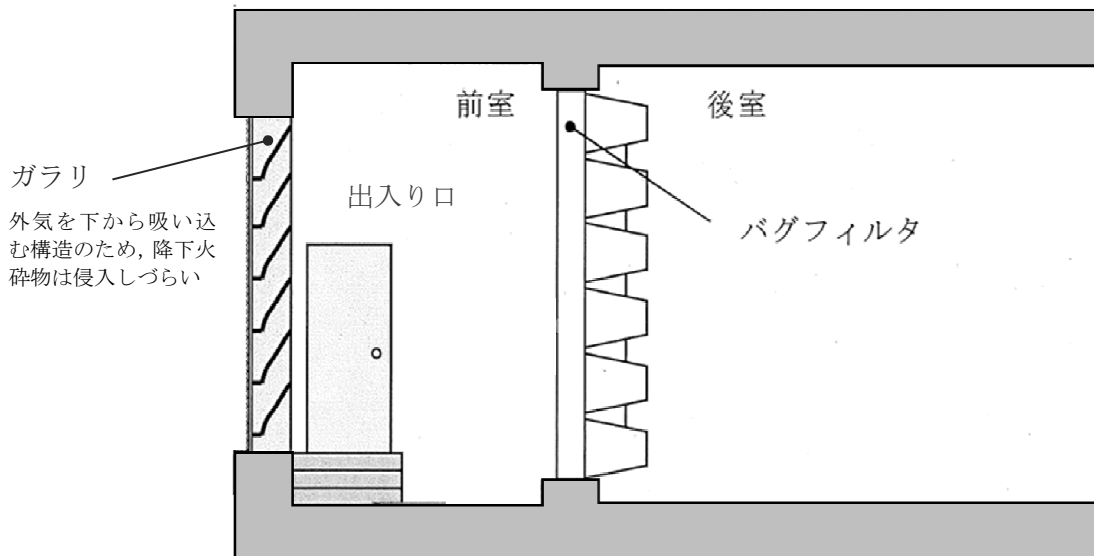


図 6-1 換気空調系の外気取入口イメージ図



図 6-2 非常用ディーゼル発電機換気空調系の外気取入口

② 換気系、電気系及び計装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、降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じないことから、金属材料を用いることで換気空調設備（外気取入口）の機能に影響を与えにくい。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－12）

### 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設備によって空調管理されており、他の非常用空調設備と同様、外気取入口には、ガラリ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から、降下火砕物が与える影響は少ない。

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。



図 6-3 中央制御室換気空調設備の外気取入口

○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 18名
- ・ 中央制御室バウンダリ内体積  m<sup>3</sup>
- ・ 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 0.066m<sup>3</sup>/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の歩行でのO<sub>2</sub>消費量）
- ・ 許容酸素濃度 18%以上（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 6-1 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	455 時間
酸素濃度	20.8%	20.7%	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 18名
- ・ 中央制御室バウンダリ内体積  m<sup>3</sup>
- ・ 空気流入はないものとする。
- ・ 初期二酸化炭素濃度 0.030%（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 0.030m<sup>3</sup>/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の軽作業でのCO<sub>2</sub>排出量）
- ・ 許容二酸化炭素濃度 0.5%以下（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 6-2 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	158 時間
二酸化炭素濃度	0.07 %	0.11%	0.14%	0.50%

以上の結果から、158 時間外気取入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。

## 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より、取水設備が閉塞しないことを評価する。

#### ② 水循環系の摩耗

降下火砕物が混入した海水を取水することに伴う、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

- ・粒径：8.0mm 以下

### （3）評価結果

#### ① 水循環系の閉塞

取水設備（トラベリングスクリーンメッシュ幅 9mm）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メッシュ幅より小さく、また、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、除塵装置が閉塞することはない。

#### ② 水循環系の摩耗

降下火砕物は破碎し易く、硬度が小さ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）

#### ③ 水循環系の化学的影響（腐食）

海水系の化学的影響については、取水設備は塗装等の対応を実施しており、海水と金属が直接接することはないため、直ちに腐食により取水設備の機能に影響を及ぼすことはない。

（補足資料－4）

安全保護系計装盤に係わる影響評価

降下火砕物による安全保護系計装盤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した場合の影響について評価する。

(2) 評価条件

- ・粒径：8.0mm 以下

(3) 評価結果

安全保護系計装盤については、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、換気に伴い、降下火砕物が計装盤内に侵入する可能性がある。

当該盤が設置されているエリアは、非常用DG/Z換気空調系、中央制御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%以上を捕獲する性能）を介した換気空気を吸入している。従って、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、安全保護系計装盤の安全機能が損なわれることはない。

(補足資料-13)



## 1. 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，以下の表に示す。

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
<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。</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」（JEAG4625-2009）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>原子力発電所の運用期間中に火山活動が想定され、それによる設計対応不可能な火山事象が原子力発電所に影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価できない場合には、原子力発電所の立地は不適と考えられる。</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> <p>1. 3 関連法規等</p> <p>本評価ガイドは、以下を参考としている。</p> <p>(1) 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年原子力規制委員会規則第5号）</p> <p>(2) 使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における「自然環境」の考え方について（平成20年10月27日原子力安全委員会了承）</p> <p>(3) 日本電気協会「原子力発電所火山影響評価技術指針」（JEAG4625-2009）</p> <p>(4) IAEA Safety Standards “Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations” (No. SSG-21, 2012)</p>	<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（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第五号）」第6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。</p> <p>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の「原子力発電所の火山影響評価ガイド」にそって、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"> <li>・立地評価</li> <li>・影響評価</li> </ul>

### 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

#### 2. 原子力発電所に影響を及ぼす火山影響評価の流れ

火山影響評価は、図1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、まず原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出を行い、影響を及ぼし得る火山が抽出された場合には、抽出された火山の火山活動に関する個別評価を行う。即ち、設計対応不可能な火山事象が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。(解説-1)

影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価された場合は、火山活動のモニタリングと火山活動の兆候把握時の対応を適切に行うことを条件として、個々の火山事象に対する影響評価を行う。一方、設計対応不可能な火山事象が原子力発電所運用期間中に影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価されない場合は、原子力発電所の立地は不適と考えられる。

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評価を行う。

解説-1. IAEA SSG-21 では、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道の開通及び地殻変動を設計対応が不可能な火山事象としており、本評価ガイドでも、これを適用する。

#### 1. 2 原子力発電所に影響を及ぼす火山影響評価の流れ (ガイドどおり)

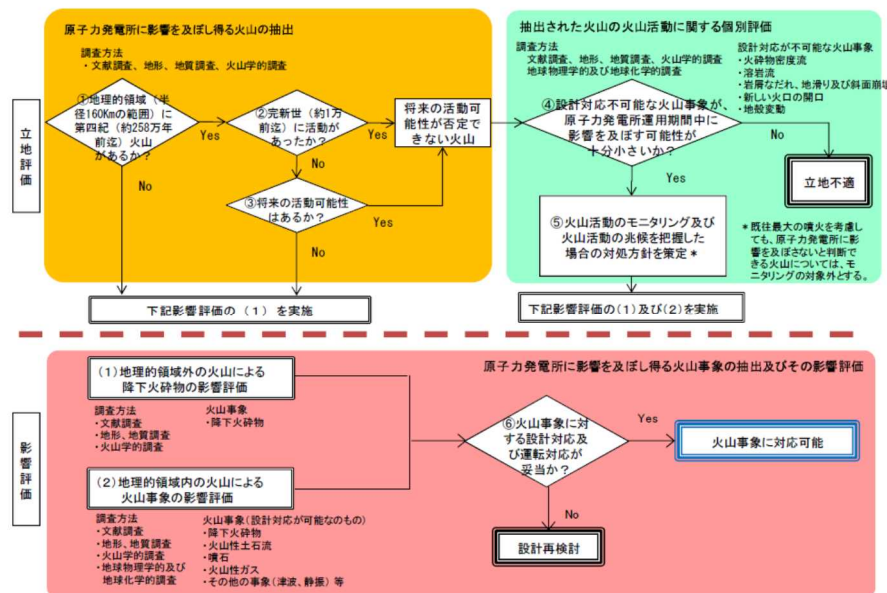


図1 原子力発電所に影響を及ぼす火山影響評価の基本フロー

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響
<p>【立地評価】（項目名のみ記載）</p> <p>3. 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出</p> <p>3. 1 文献調査</p> <p>3. 2 地形・地質調査及び火山学的調査</p> <p>3. 3 将来の火山活動可能性</p> <p>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</p> <p>4. 1 設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価</p> <p>4. 2 地球物理学的及び地球化学的調査</p> <p>5. 火山活動モニタリング</p> <p>5. 1 監視対象火山</p> <p>5. 2 監視項目</p> <p>5. 3 定期的評価</p> <p>5. 4 火山活動の兆候を把握した場合の対処</p>	<p>2. 立地評価</p> <p>2. 1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出</p> <p>地理的領域内に分布する第四紀火山（81火山）について、完新世における活動の有無を確認し、将来の活動可能性のある火山、若しくは将来の活動可能性が否定できない火山を抽出した。</p> <p>その結果、黒岩山、苗場山、妙高山、志賀高原火山群、新潟焼山、新潟金山、黒姫山、燧ヶ岳、志賀、沼沢、飯縄山、草津白根山、日光白根山、子持山、四阿山、白馬大池、榛名山、男体・女峰火山群、赤城山、烏帽子火山群、鼻曲山、浅間山、高原山、那須岳、立山、磐梯山、上廊下、吾妻山、鷲羽・雲ノ平、北八ヶ岳、安達太良山及び環諏訪湖の32火山を将来の活動可能性のある火山若しくは将来の活動可能性を否定できない火山として評価した。</p> <p>2. 2 運用期間における火山活動に関する個別評価</p> <p>将来の活動可能性のある火山若しくは将来の活動可能性を否定できない火山として評価した32火山を対象として、文献調査に基づき、運用期間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。</p> <p>火砕物密度流による堆積物が敷地周辺では確認されておらず、敷地まで十分に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小さいと評価した。</p> <p>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小さいと評価した。</p> <p>新しい火口の開口については、敷地周辺で深部低周波地震の活動がないこと、地温勾配が小さく、また地殻熱流量が小さいことから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に小さいと評価した。</p> <p>地殻変動については、敷地周辺が過去の火山活動に伴う火口及びその近傍に位置しないことから、発電所に影響を及ぼす可能性は十分に小さいと評価した。</p> <p>以上の検討結果より、発電所の運用期間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小さいと評価した。また、これらの火山活動は、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。</p>

### 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

#### 6. 原子力発電所への火山事象の影響評価

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。

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）

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）

以下に、各火山事象の影響評価の方法を示す。

表1 原子力発電所に影響を及ぼす可能性のある火山事象及び位置関係<sup>1)</sup>

火山事象	潜在的に影響を及ぼす特性	原子力発電所との位置関係
1. 降下火砕物	静的な物理的負荷、気中及び水中の研磨性及び腐食性粒子	注2
2. 火砕物堆積量：火砕流、サージ及びプラスト	動的な物理的負荷、大気の過圧、飛来物の衝撃、300℃超の温度、研磨性粒子、毒性ガス	160km
3. 溶岩流	動的な物理的負荷、洪水及び水のせき止め、700℃超の温度	50km
4. 岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊	動的な物理的負荷、大気の過圧、飛来物の衝撃、水のせき止め及び洪水	50km
5. 火山性土石流、火山泥流及び洪水	動的な物理的負荷、水のせき止め及び洪水、水中の浮遊粒子	120km
6. 火山から発生する飛来物（噴石）	粒子の衝突、静的な物理的負荷、水中の研磨性粒子	10km
7. 火山ガス	毒性及び腐食性ガス、酸性雨、ガスの充満した洞、水の汚染	160km
8. 新しい火口の開口	動的な物理的負荷、地盤変動、火山性地震	注3
9. 津波及び静振	水の圧縮	注4
10. 大気現象	動的過圧、落雷、ダウンバースト風	注4
11. 地殻変動	地盤変位、沈下又は隆起、傾斜、地滑り	注4
12. 火山性地震とこれに関連する事象	継続的振動、多度衝撃	注4
13. 熱水系及び地下水の異常	熱水、腐食性水、水の汚染、圧縮又は湧昇、熱水変質、地滑り、カルスト及びサーモカルストの変質、水圧の急変	注4

(参考資料：IAEA SSG-21及びJEAG4625)

- 1)：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ものとする。
- 2)：降下火砕物に関しては、原子力発電所の敷地及び敷地付近の調査から求められる単位面積あたりの質量と同等の火山灰等が降下するものとする。
- 3)：新しい火口の開口については、原子力発電所の運用期間中に、新しい火口の開口の可能性を検討する。
- 4)：火山活動によるこれらの事象は、原子力発電所との位置関係によらず、警報に検討を行う。

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。

解説-15. 原子力発電所との位置関係について

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（JEAG4625）から引用した。JEAG4625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。

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。

#### 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、柏崎刈羽原子力発電所6、7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。）のみが柏崎刈羽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。

地質調査において、発電所敷地周辺で確認されている降下火砕物堆積層について、給源が特定できる降下火砕物については、各火山の活動性を評価し、同規模の噴火が発生する可能性は小さいと評価した。また、給源不明の降下火砕物（阿相島テフラ等）は、敷地で最大35cmを確認しているが、水系等の影響を受けて堆積したと推定され、当時の堆積環境と異なる現在において、これらに基づいて将来の降下火砕物の層厚を想定することは適切でないと判断した。

一方、プラント運用期間中に、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、既往解析結果の知見、降下火砕物シミュレーションを用い評価した結果、約23.1cmという結果を導いた。想定する降下火砕物堆積量は、評価結果（約23.1cm）を基に設定するが、敷地で最大層厚35cmが確認されていることも踏まえ、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35cmと設定した。そのほか得られた降下火砕物の特性を表1.1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、プラント寿命期間を考慮して年超過発生頻度 $10^{-2}$ 規模の積雪を踏まえ設定した。

表1.1 降下火砕物特性の設定結果

項目	設定	備考
層度	35cm	鉛直荷重に対する健全性評価に使用
密度	湿潤密度：1.5g/cm <sup>3</sup>	
荷重 <sup>*1</sup>	8,542N/m <sup>2</sup>	
粒径	8.0mm以下	水循環系の閉塞並びに換気、電気系及び計装制御系に対する機械的影響評価に使用

\*1：湿潤状態の降下火砕物の荷重（35cm×1500kg/m<sup>3</sup>×9.80665m/s<sup>2</sup>）+積雪荷重（115.4cm<sup>\*2</sup>×29.4N/（m<sup>2</sup>・cm）<sup>\*3</sup>）=8,542N/m<sup>2</sup>（小数点以下を切り上げ）

\*2：積雪量=1日あたりの積雪量の年超過確率 $10^{-2}$ /年の値（84.3cm）+最深積雪量の平均値（31.1cm）=115.4cm

\*3：新潟県建築基準法施行細則に基づく積雪の単位荷重（積雪1cm当たり29.4N/m<sup>2</sup>）

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
<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、降下火砕物の堆積物量、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付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、17、18）</p>	<p>3. 4 降下火砕物の影響</p> <p>3. 4. 2 直接的影響</p> <p>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、評価対象施設の構造や設置状況等を考慮して直接的な影響因子を選定する。なお、柏崎刈羽原子力発電所6、7号炉で想定される降下火砕物の条件を考慮し評価を実施した。</p> <p>3. 4. 3 間接的影響</p> <p>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」、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。</p> <p>○降下火砕物による原子力発電所への影響評価</p> <p>安全施設とは、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1、2及び3に該当する構築物、系統及び機器（以下、「安全重要度クラス1、2、3に属する構築物、系統及び機器」という。）を指していることから、火山の影響に対して防護する施設としては、安全重要度クラス1、2、3に属する構築物、系統及び機器とする。</p> <p>また、以下の点を踏まえ、安全施設のうち、外部事象防護対象施設は、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器（原子炉停止、炉心冷却、使用済燃料プール冷却を維持するために必要な異常の発生防止の機能、若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備）又はそれを内包する建屋とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・降下火砕物襲来時の設備損傷状況を踏まえ、必要に応じプラント停止の措置をとること</li> <li>・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</li> </ul> <p>その上で、外部事象防護対象施設の中から屋外設備、屋外に開口している設備（降下火砕物を含む海水及び気体の流路となる設備）、外気を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設備及び該当する設備を内包している建屋を評価対象施設として抽出した。</p> <p>また、上記以外の安全施設については、降下火砕物に対して機能維持する、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、安全上支障のない期間に除灰、修復すること等の対応が可能な設計とする。</p>

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

(3) 確認事項

(a) 直接的影響の確認事項

- ① 降下火砕物堆積荷重に対して、安全機能を有する構築物、系統及び機器の健全性が維持されること。
- 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。
- 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。
- ④ 必要に応じて、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取れること。

(b) 間接的影響の確認事項

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。

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。
- ✓ 対象となる火山の噴火量、噴煙柱高、全体粒度分布、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関数として、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、並びに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。

○直接的影響に対する設計方針

①外部事象防護対象施設のうち屋外施設の構造健全性の維持（荷重）に対する設計  
外部事象防護対象施設のうち屋外施設は、以下である。

- ・原子炉建屋，タービン建屋（熱交換器エリア），コントロール建屋，廃棄物処理建屋
- ・軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）

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。

②外部事象防護対象施設のうち屋外施設及び屋外に開口している設備等の機能維持に対する設計

降下火砕物による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，電気系及び計装制御系に対する機械的影響（摩耗，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。

降下火砕物の除去等の対策

降下火砕物に備え，手順を整備し，図1.5 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。

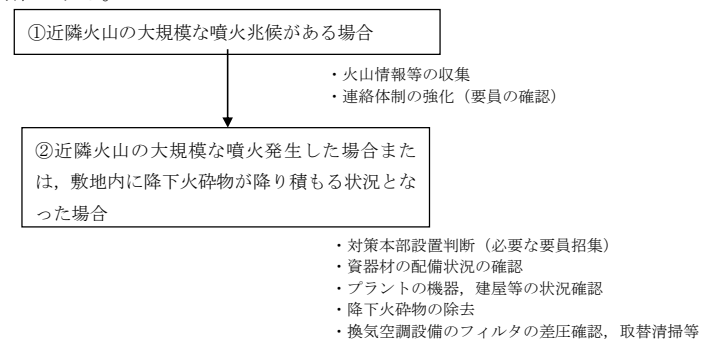


図1.5 降下火砕物に対応するための運用管理フロー

(b) 間接的影響の確認結果

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。

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
<p>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、原子力発電所への間接的な影響も含めて評価する。</p> <p>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。</p> <p>（6. 2～6. 13の項目については、項目名のみ記載）</p> <ul style="list-style-type: none"><li>6. 2 火砕物密度流</li><li>6. 3 溶岩流</li><li>6. 4 岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊</li><li>6. 5 火山性土石流、火山泥及び洪水</li><li>6. 6 火山から発生する飛来物（噴石）</li><li>6. 7 火山ガス</li><li>6. 8 新しい火口の開口</li><li>6. 9 津波及び清振</li><li>6. 10 大気現象</li><li>6. 11 地殻変動</li><li>6. 12 火山性地震とこれに関連する事象</li><li>6. 13 熱水系及び地下水の異常</li></ul>	<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、発電用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 style="text-align: right;">以 上</p>



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、及び影響因子から影響を受ける評価対象施設の組合せについて「表 1.5 降下火砕物が影響を与える評価対象施設と影響因子の組み合わせ」にて、評価すべき組合せを検討した結果、図 2-1 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。

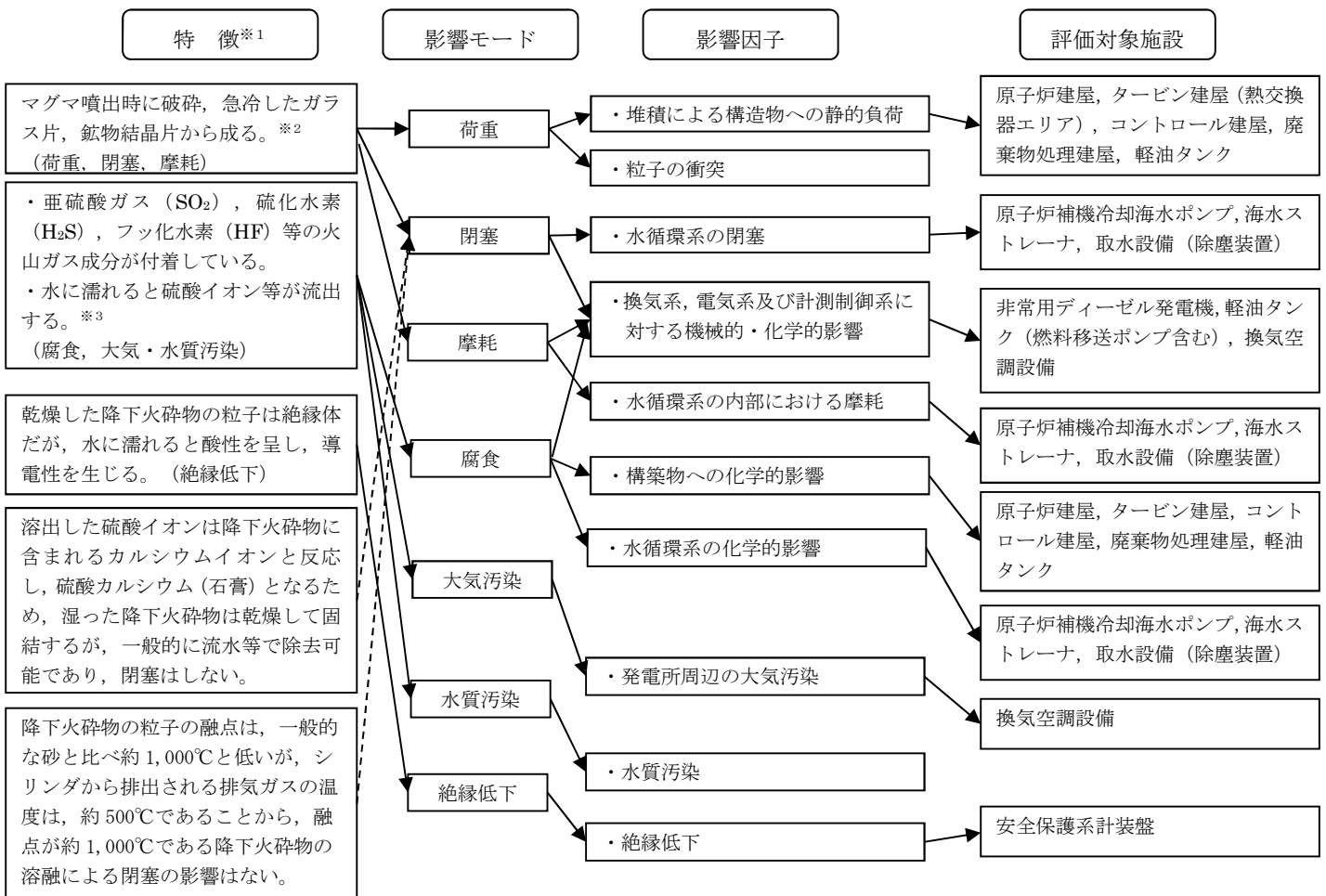


図 2-1 降下火砕物の特徴と影響因子

※ 1 : (参考文献) (内閣府) 広域的な火山防災対策に係る検討会 (第 3 回) (資料 2)

※ 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，桜島火山灰による金属腐食の程度は，実際の自然条件より厳しい条件においても表面厚さに対して十数  $\mu\text{m}$  のオーダーの腐食。

<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，末吉秀一他 (1990 年) : 火山環境における金属材料の腐食

⇒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。

### 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<sup>※1</sup>、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閉塞が考えられるが、水循環系においては、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閉塞としては、換気空調系のフィルタの閉塞が考えられるが、換気空調系の外気取入口にはガラリが設置されており、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火山灰の侵入は減少すると考えられる。なお、侵入した火山灰は、換気空調系のフィルタによって除去されるが、湿った火山灰がフィルタに付着し固結した場合においても、フィルタの取り替えが可能なことから、固結による影響はない。

一方、評価対象施設に対して間接的な影響を与え得る事象としては、降下火砕物による排水路の閉塞時の降水事象が考えられる。ただし、評価対象施設に有意な影響を及ぼし得る大雨に対しては、排水路の閉塞に伴う建屋周辺における滞留水が発生した場合においても、排水路とは別に排水用フラップゲートが設置されており、この滞留水は排水用フラップゲートを通じてすみやかに排水されること、また、原子炉建屋等に対しては、溢水対策として建屋貫通部の止水処置等の実施、屋外設備である燃料移送系については、設置区画に防護板などを設置する設計とすることから、評価対象施設への影響はない。

※1：（参考文献）（内閣府）広域的な火山防災対策に係る検討会（第3回）（資料2）

### 3. 降下火砕物による摩耗について

水循環系において最も磨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、プラントの運用期間中において海水取水中に含まれる砂等の磨耗によるトラブルは発生していないこと、及び降下火砕物は、砂等に比べて硬度が低く、破碎し易いことから、降下火砕物による磨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（火山灰）と砂の破碎しやすさの違いについて

火山灰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、「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火山灰は、砂と比較して破碎しやすいと考えられる。

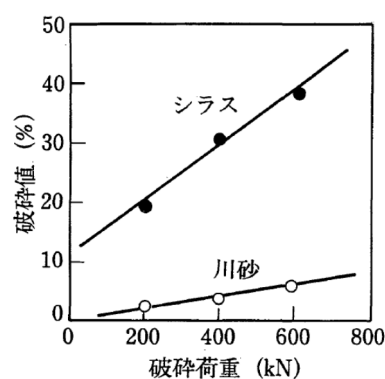


図 3-1 シラスの破碎試験結果

#### 2 降下火砕物（火山灰）と砂及び設備材料の硬度の比較について

鉱物の硬度は搔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、降下火砕物の硬度は砂より低いため、設備への影響は軽微と考える。

- ・火山灰の主成分は、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。
- ・砂の主成分は、石英であり、石英のモース硬度は7とされている。

また、プラント運用期間中において海水取水中に含まれる砂等による磨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、磨耗による設備への影響は軽微と考える。

## 4. 塗装による降下火砕物の化学的影響（腐食）について

降下火砕物による「構造物への化学的影響（腐食）」については、評価対象施設が塗装されていることで直ちに機能に影響を及ぼすことはないと評価している。その詳細について以下に示す。

原子力発電所には、炭素鋼、低合金鋼及びステンレス鋼の機器、配管、制御盤及びダクト等の外表面に対する塗装基準が定められており、耐放射線性、耐水性、除染性、耐熱性、耐油性等を考慮した塗料に係る基準が規定されている。

屋外設備については、海塩粒子等の腐食性有害物質が付着しやすく、最も厳しい腐食環境にさらされるため、エポキシ樹脂、アクリルシリコン樹脂、長油性フタル酸樹脂系等の塗料が複数層で塗布されており、酸性物質を帯びた降下火砕物が堆積したとしても、直ちに金属表面等の腐食が進むことはない。

また、海水ポンプ、海水管等の海水に直接触れる部分については、エポキシ樹脂、ポリウレタン樹脂、塩化ゴム等の耐食性塗料（樹脂ライニング含む）が施されている。

よって、降下火砕物が外表面に堆積及び混入した海水を取水したとしても、直ちに金属表面の腐食が進むことはない。

なお、定期的に外観の点検を行い、塗装の状態についても確認を行っている。

表4-1 柏崎刈羽原子力発電所6, 7号炉における塗装の例

	下塗り	中塗り	上塗り
原子炉建屋 タービン建屋 コントロール建屋 廃棄物処理建屋	エポキシ樹脂 アクリルゴム	アクリルシリコン樹脂	アクリルシリコン樹脂
軽油タンク	鉛・クロムフリーさび止めペイント	長油性フタル酸樹脂	長油性フタル酸樹脂
海水ポンプ	エポキシ樹脂	－	ポリウレタン樹脂
除塵機	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレタン樹脂

## 5. 積雪量の重畳の考え方について

設備影響評価における降下火砕物の条件としては、想定される降下火砕物の層厚を35cmとして、設定を行った。また、設計基準における積雪の条件は、規格・基準類として、建築基準法及び同施行令第86条第3項に基づく新潟県建築基準法施行細則で定められている積雪量、観測記録として、柏崎市に設置されている気象庁地域気象観測システム（アメダス）に記録されている日降雪量の最大値、及び観測記録をもとに算出した年超過確率（年超過頻度 $10^{-4}$ /年）結果を参照し、設計基準積雪深を167cmと設定している。

一方、火山（降下火砕物）と積雪は相関性が低い事象の組み合わせであるため、重畳を考慮する際は、Turkstra 規則を適用する。Turkstra 規則の考え方は、建築基準法や、土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」、国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」、ANSI(米国国家規格協会)等で採用されている。Turkstra 規則は、主たる作用（主事象）の最大値と、従たる作用（副事象）の任意時点の値（平均値）の和として作用の組み合わせを考慮する。単純性・保守性のために、主事象は設計基準で想定している規模、副事象はプラント寿命期間中に発生し得る程度の規模（年超過発生頻度 $10^{-2}$ ）を想定する。この想定は、副事象として想定すべき任意時点の値（平均値）より厳しい値を想定することとなるため、保守性があると考える。

以上の考えをもとに、設計基準で想定している規模の火山灰（35cm）に重畳させる積雪量は、1日あたりの積雪量の年超過確率 $10^{-2}$ /年の値（84.3cm）に最深積雪量の平均値（31.1cm）を合算した115.4cmとした。

なお、主事象を積雪、副事象を火山灰とした場合は、設計基準として想定している積雪量167cmに火山灰3.5cm\*の荷重を重畳させることを想定するが、前者の荷重に包含される。

※火山灰については、確率論的評価を実施していないことから、副事象として想定する噴火規模は、設計基準規模として設定している噴火規模（VEI5）から1段階噴火規模を下げたVEI4相当として設定した。

## 柏崎市における積雪の観測記録

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

表 5-1 柏崎市における毎年の積雪観測記録

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

値\*：資料不足値

統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。

統計処理では、上記の観測記録を使用して評価を実施。

## 平均積雪量の算出

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

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

上式は、積雪があった場合に平均的な積雪量を与える式となる。

柏崎市のアメダスの記録から、平均積雪量を計算すると以下の通りとなる。

観測期間：1980年11月1日～2013年3月31日

積雪のあった日数 (N)：1,925日

積雪量の合計：59,766 cm

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

## 年超過確率の推定方法

### 1. 評価方法

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

評価フローを以下に示す。

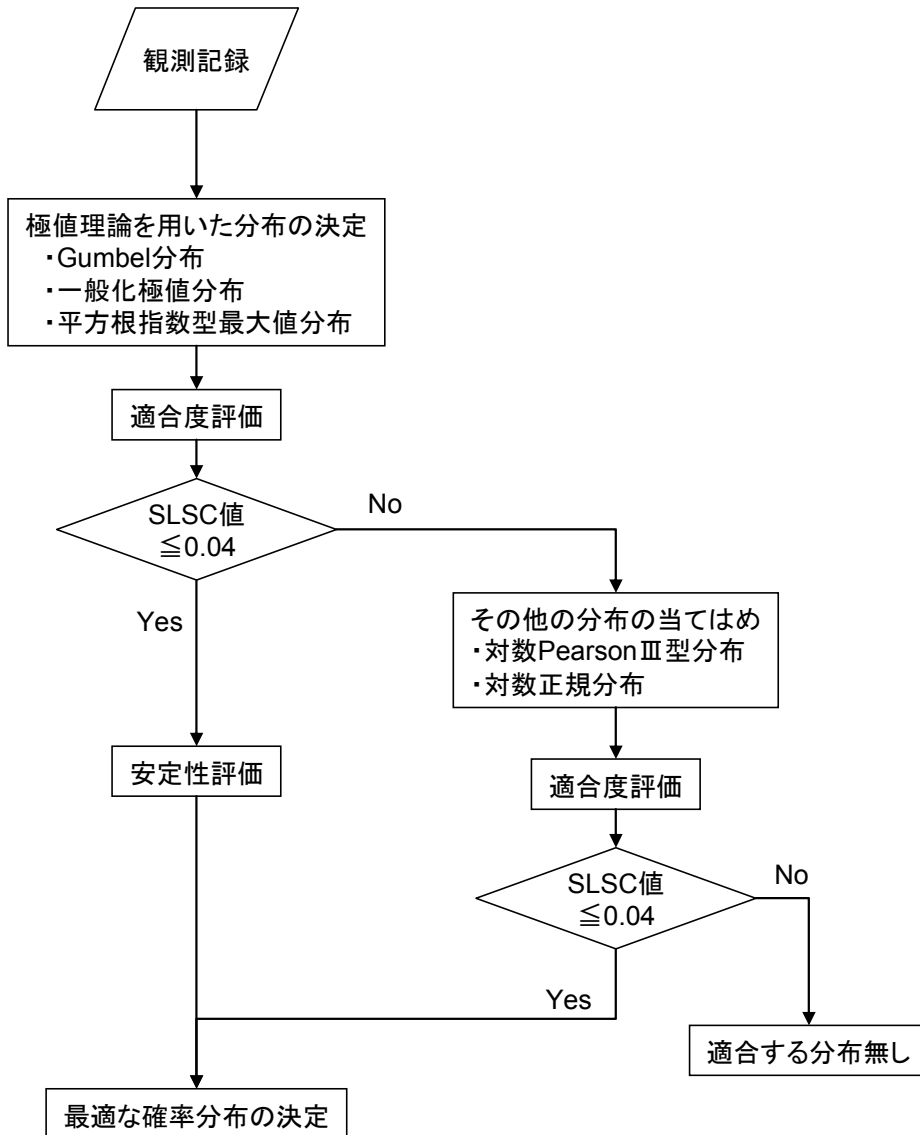


図 5-1 年超過確率評価フロー



### (1) 確率分布の算出

観測記録から、観測値の平均、分散値等を算出し、確率分布を算出する。ここでは、極値理論からの分布や従来から使用されている分布等を用いて確率分布を決定する。

### (2) 適合度評価

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

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

SLSC は、観測値はプロットイングポジション公式と並べた場合と、確率分布から推定した場合との確率の差を指標化した値である。SLSC が小さいほど、適合度が高い。本評価では SLSC が 0.04 以下で適合していると判断する。

プロットイングポジション公式とは、経験的に求められた公式であり、いくつかの式が提案されているが、本評価においては以下の式を採用する。

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

ここで、 $N$  はデータの個数であり、大きい方から  $i$  番目のデータの再現期間  $T(i)$  とする。

### (3) 安定性評価

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

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

## 2. 評価結果

表 5-2 一日あたりの積雪量に対する年超過確率

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

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

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

## 積雪・火山灰堆積状態での地震発生時の影響評価について

## 1. 評価内容

自然現象の重畳評価において抽出された組合せ「雪・火山灰が堆積している状態での地震発生」についての評価を実施した。自然現象の重畳評価においては主事象（設計基準規模）×副事象（年超過発生確率  $10^{-2}$  規模）を想定することを基本としていることから、表 5-3 に示す 8 パターンを考慮した。

これらの組み合わせのうち、荷重の大きさ等の観点で代表性のある、主事象：地震、副事象：積雪の組み合わせ、及び主事象：火山灰、副事象：地震（ベース負荷：積雪）の 2 通りの評価を実施するものとする。代表性の判断の際の基準については表 5-4 に示す。

表 5-3 重畳評価ケース<sup>※1</sup>

No.	主事象 (設計基準規模)	副事象 ( $10^{-2}$ 規模)	ベース負荷 (平均規模)	備考
1	地震(Ss 等)	積雪(115.4cm)	—	—
2	地震(Ss 等)	火山灰(3.5cm) <sup>※2</sup>	積雪(31.1cm)	No. 1 に包絡
3	風(40.1m/s)	火山灰(3.5cm) <sup>※2</sup>	積雪(31.1cm)	No. 1 に包絡
4	風(40.1m/s)	積雪(115.4cm)	—	No. 1 に包絡
5	火山灰(35.0cm)	地震( $10^{-2}$ 相当地震動)	積雪(31.1cm)	—
6	積雪(167.0cm)	地震( $10^{-2}$ 相当地震動)	—	No. 5 に包絡
7	火山灰(35.0cm)	風(27.9m/s)	積雪(31.1cm)	No. 5 に包絡
8	積雪(167.0cm)	風(27.9m/s)	—	No. 5 に包絡

※1：除雪に期待できる施設は積雪荷重について除雪能力を考慮した値とする。

※2：火山灰については、確率論的評価を実施していないことから、副事象として考慮する場合は、設計基準規模として設定している噴火規模（VEI5）から 1 段階噴火規模を下げた VEI4 相当を考慮する。

表 5-4 水平荷重・堆積荷重の比較

a. 水平荷重

		せん断力 (kN) (K6 R/B 躯体 38.2 (m) - 49.7 (m))	判定
比較 a-1	設計用地震力	$43.35 \times 10^3$	地震 > 風
	風 (40.1m/s)	$2.65 \times 10^3$	
比較 a-2	地震 ( $10^{-2}$ 相当地震動)	$9.7 \times 10^3$	地震 > 風
	風 (27.9m/s)	$1.29 \times 10^3$	

b. 堆積荷重

		堆積荷重 (N/m <sup>2</sup> )	判定
比較 b-1	積雪 (115.4cm)	3,393	積雪 (115.4cm) > 火山灰 (3.5cm) + 積雪 (31.1cm)
	火山灰 (3.5cm) + 積雪 (31.1cm)	1,429	
比較 b-2	積雪 (167.0cm)	4,910	積雪 (167.0cm) < 火山灰 (35.0cm) + 積雪 (31.1cm)
	火山灰 (35.0cm) + 積雪 (31.1cm)	6,060	

## 2. 評価対象施設について

評価対象施設の抽出フローを図に示す。地震の防護対象が耐震重要度分類 S, B, C クラス，積雪の防護対象が安全重要度クラス 1, 2, 3 であることから，地震と積雪・火山灰の重畳については，その両方に含まれる設備を評価対象とする。

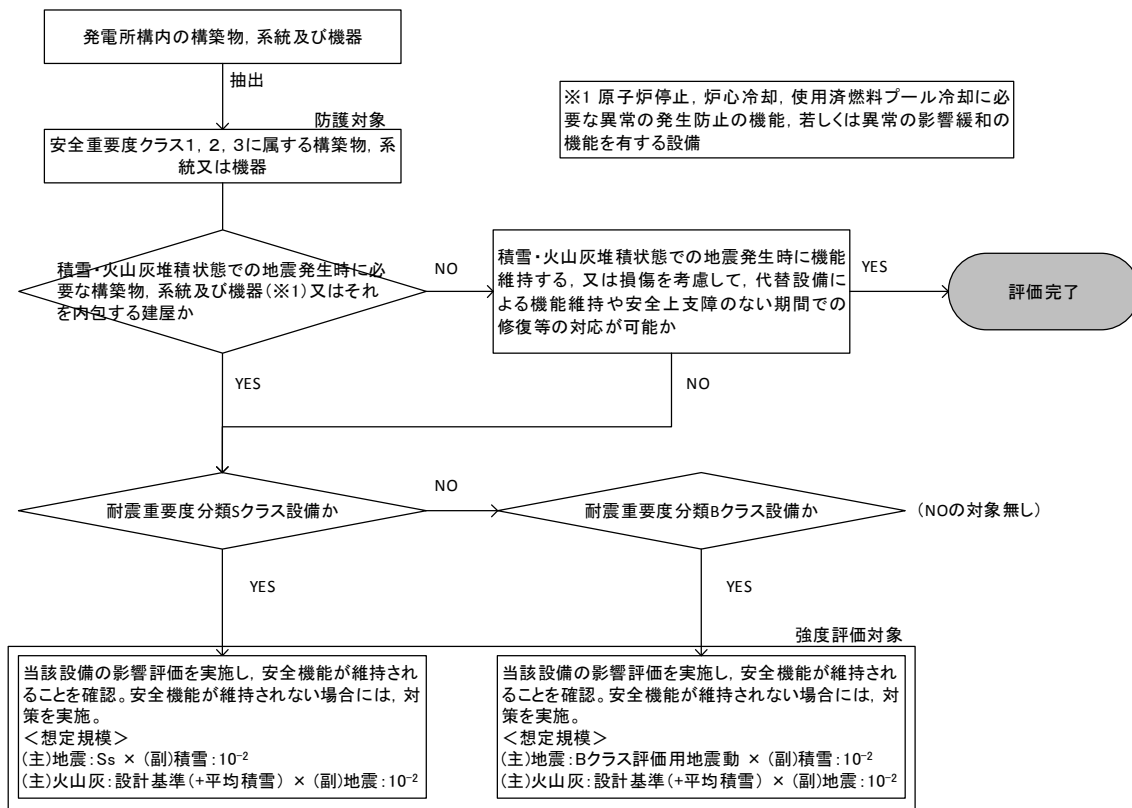


図 5-2 評価対象施設の考え方

### 3. 安全施設の健全性評価結果

抽出された各評価対象施設の直上付近の屋根等の健全性について確認した。屋根強度評価用の値は，除雪能力を考慮した値とする。

表 5-5 主な評価対象施設

建屋等	評価部位	評価対象施設	判定
R/B	R/B 屋根全体	使用済燃料プール等	○
C/B	C/B 屋根全体	中央制御室等	○
T/B	熱交換器エリア直上の屋根部分	非常用所内電源系，非常用所内電源系空調，原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	○
屋外	—	軽油タンク，非常用ディーゼル発電機燃料移送系	○

#### 4. 重畳評価の保守性について

上記の副事象の規模の考え方（年超過発生頻度  $10^{-2}$  規模）については、Turkstra 規則における想定（平均的な値）よりもかなり保守的な設定としている。

年超過確率については、1年で特定の規模以上の事象が発生する確率となっていることから、例えば年超過確率  $10^{-2}$ /年の規模（言い換えると100年に1回以上発生する確率が約63%の規模）は、平均的な規模（年に数回の規模）や年最大値の平均（おおよそ1年に1回の規模）よりも、一般的に大きくなると言える。

例として、本資料で対象としている地震と積雪の重畳について、同じく Turkstra 規則を参照している建築基準法における評価と比較したものを以下に示す。

表 5-6 組み合わせる積雪荷重について（建築基準法との比較）

	積雪の想定する規模	堆積積雪深
建築基準法 （建築物荷重指針・同解説 （2004））	地震との組合せを考慮する場合（短期荷重）、平均的な積雪荷重を想定し、建築基準法施行令第86条に規定する積雪荷重によって生ずる力の0.35倍 <sup>*</sup>	柏崎市 $130\text{cm} \times 0.35$ =45.5cm 刈羽村 $170\text{cm} \times 0.35$ =59.5cm
今回の重畳評価に採用する考え方	再現期間100年における最大値を想定	1日当たり積雪量の年超過確率 $10^{-2}$ の規模の値 84.3cm + 最深積雪量の 平均値 31.1cm=115.4cm

※：建築基準法では上記の通り、簡易式（短期積雪荷重の0.35倍）により算出しているが、そこでの想定規模の考え方に基づいて、経験データから冬季の平均的な積雪量を算出した場合、31.1cmとなる。

## 6. 降下火砕物による送電鉄塔への影響について

送電鉄塔に使用されている碍子は、降下火砕物が堆積しにくい構造となっており、静的荷重の影響は受けにくく機能への影響を及ぼすことはない。

火山活動により大量の降下火砕物による影響が想定される場合には、開閉所の洗浄装置等で碍子の洗浄を実施するなど、事故の未然防止に努める。



## 7. 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

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%以上を捕獲する性能）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、万一閉塞した場合の影響について、以下のとおり評価する。

## 1. 閉塞までに要する時間について

以下の想定における非常用ディーゼル発電機の吸気フィルタの閉塞までの時間を試算した。降下火砕物の大気中濃度には、比較的噴火規模が大きく、地表レベルでの観測データがあるアイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生した火山噴火の際のヘイマランド地区の濃度値 ( $3,241\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) を用いるが、米国セントヘレンズ火山噴火の際の濃度値 ( $33,400\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) を用いた場合についても試算した。（補足資料－ 8 参照）

また、非常用ディーゼル発電機吸気フィルタの灰捕集容量については、粉塵保持容量を用いた場合と、降下火砕物によるフィルタへの影響を直接確認した試験結果（試験内容等は 4. 参照）に基づく保持容量を用いた場合のそれぞれで試算した。

## (1) アイスランドの火山噴火データを用いた試算

表 7-1 より、吸気フィルタの閉塞時間を試算した結果、約 619 時間となった。

表 7-1 吸気フィルタ閉塞までの時間

	粉塵保持容量 <sup>※1</sup>	降下火砕物による 試験結果に 基づく保持容量
① 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ灰捕集容量 (g/枚)	800	8,540
② フィルタ 1 枚当たりの定格風量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	4,250	
③ 降下火砕物の大気中濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>※2</sup>	3,241	
④ 閉塞までの時間 (h) =①/②/③	58	619

※1: 定格風量で最終圧力損失に達した時点において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 の 12 種を使用)

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

（2）セントヘレンズの火山噴火データを用いた試算

表7-2より、吸気フィルタの閉塞時間を試算した結果、約60時間となった。

表7-2 吸気フィルタ閉塞までの時間

	粉塵保持容量	降下火砕物による試験結果に基づく保持容量
① 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ灰捕集容量 (g/枚)	800	8,540
② フィルタ1枚当たりの定格風量 (m <sup>3</sup> /h)	4,250	
③ 降下火砕物の大気中濃度 (μg/m <sup>3</sup> ) ※	33,400	
④ 閉塞までの時間 (h) =①/②/③	5.6	60

※：米国セントヘレンズ火山で発生（1980年5月）した火山噴火地点から約135km離れた場所における大気中の火山灰濃度値（1日平均値）を参照した。

2. フィルタ交換，清掃に必要な時間及び成立性について

非常用ディーゼル発電機のバグフィルタは7号炉で46枚，6号炉で39枚設置されており，フィルタ交換，清掃には複雑な作業が必要なく，フィルタ交換，清掃に要する時間は，要員4名で4時間程度を見込んでいる。一方，吸気フィルタが閉塞するまでの時間は，1. (2)の通り約60時間程度であることから，フィルタが閉塞するまでに交換，清掃することが可能である。



図7-1 非常用ディーゼル発電機のバグフィルタ

### 3. その他

非常用ディーゼル発電機は1ユニットあたり3系統設置されており、フィルタが詰まった場合においても、フィルタの取替えや清掃を行うことが可能である。

### 4. 降下火砕物によるバグフィルタ閉塞試験の概要

評価対象火山の一つである妙高山より採取した降下火砕物について、想定する濃度等より保守的な条件にて、6号及び7号炉の非常用ディーゼル発電機に使用しているものと同様のバグフィルタへの影響について、以下のモックアップ試験により確認した。

バグフィルタは、袋が膨らむことにより、袋全体で風を通過させる（面積を稼ぐ）構造であるが、過度な荷重がかかると下方に引き伸ばされ、バック（袋）が膨らまなくなり、通過面積が減少し差圧が上昇することや、荷重により破損することが想定される。そのため、降下火砕物による「バグフィルタの詰まり試験」及び「バグフィルタの耐荷重試験」について実施した。



図 7-2 バグフィルタの耐荷重試験の様子

#### (1) バグフィルタの詰まり試験

##### ①試験条件及び方法

##### a)降下火砕物

##### ・濃度

想定される降下火砕物の大気中濃度は、1. の通りアイスランドの火山噴火データ ( $3,241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) であるが、本試験においては保守的に降下火砕物の濃度を約  と約  とした。

なお、本試験における降下火砕物の濃度は、米国セントヘレンズの火山噴火データ ( $33,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) も包含する。

・粒径

モックアップ装置にて噴霧する降下火砕物の粒径分布は、表 7-3 の通り、想定する粒径分布に対し、より保守的となるような粒径分布の試料を作成した。具体的には、バグフィルタ（粒径  $2\mu\text{m}$  に対し 80%以上捕獲）をより閉塞させやすくする観点から、試料の粒径分布を、想定する粒径分布より全体的に小さくした。

表 7-3 モックアップ装置にて噴霧する降下火砕物の粒径

--

※：「富士火山 1707 年火砕物の降下に及ぼした風の影響，火山，第 2 集 第 29 巻 第 1 号」における富士山の降下火砕物の粒径分布図より算出

b) モックアップ装置

・装置の構成

図 7-3 の通り、粉塵発生装置により噴霧させた試料を、試験体（バグフィルタ）に吸着させ、バグフィルタ前後の差圧及び捕集重量を測定した。

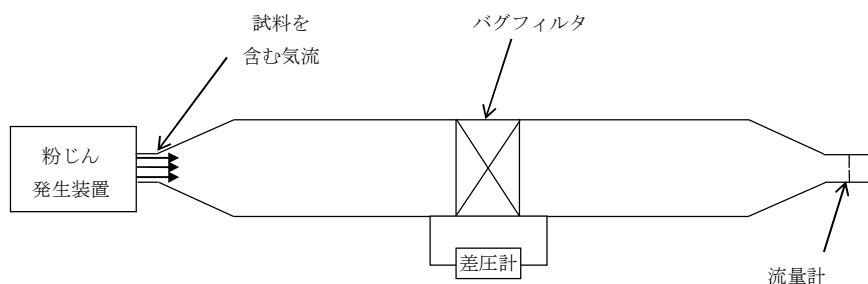


図 7-3 モックアップ装置の構成

・風量

1 枚当たりのバグフィルタの定格風量 ( $4250\text{m}^3/\text{h}$ ) に対し、バグフィルタに

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

より試料が吸着しやすくなるよう、粉塵発生装置から発せられる風量は   とした。

### ②判定基準

バグフィルタ差圧の判定基準は、設計値（系統要求値）の  とした。

### ③試験結果

バグフィルタの差圧と捕集重量の関係を図 7-4 に示す。

図 7-4 より、バグフィルタの差圧は、捕集重量に比例し増加していることが分かり、本試験における最大の捕集重量（8,540g）においても、バグフィルタの差圧は 202Pa であるため、判定基準  を満足していることを確認した。

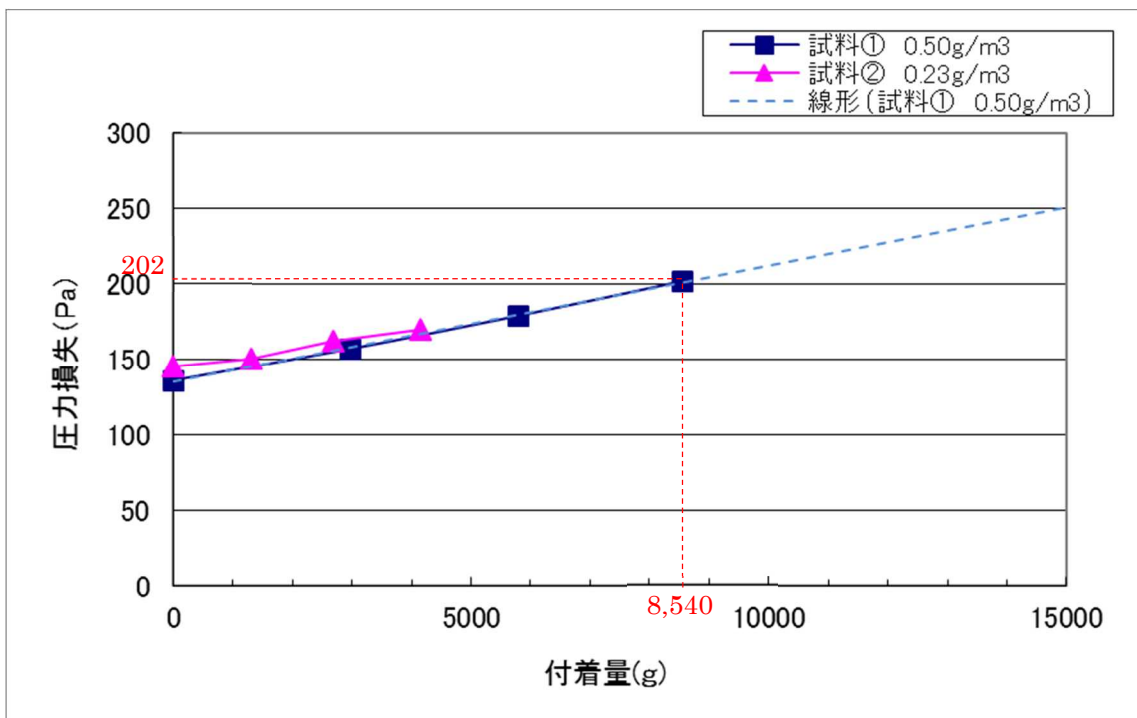


図 7-4 バグフィルタの詰まり試験結果

## (2) バグフィルタの耐荷重試験

### ①試験条件及び試験方法

本試験においては、バグフィルタの袋に試料が溜まった際の荷重の影響を確認することが目的であり、試料の粒径や性状に結果が依存するような試験ではないことから、試料には砂を用い実施した。

バグフィルタの袋の底部に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料①）とバグフィルタの袋全体に均等に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料②）のそれぞれにおいて、試料の重量を変化させた場合におけるフィルタ前後の差圧を測定した。

### ②判定基準

バグフィルタ差圧の判定基準は、設計値（系統要求値）の  とした。

### ③試験結果

バグフィルタの差圧と試料重量の関係を図 7-5、バグフィルタの外観を図 7-6 に示す。

図 7-5 より、バグフィルタの袋の底部に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料①）では、試料重量 10,000g 迄は、バグフィルタの差圧が判定基準  を満足し、12,000g にてバグフィルタの差圧が 250Pa となり、判定基準を上回る結果となった。

また、バグフィルタの袋全体に均等に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料②）においても、試料重量 20,000g において、バグフィルタの差圧が 270Pa となり、判定基準を上回る結果となった。

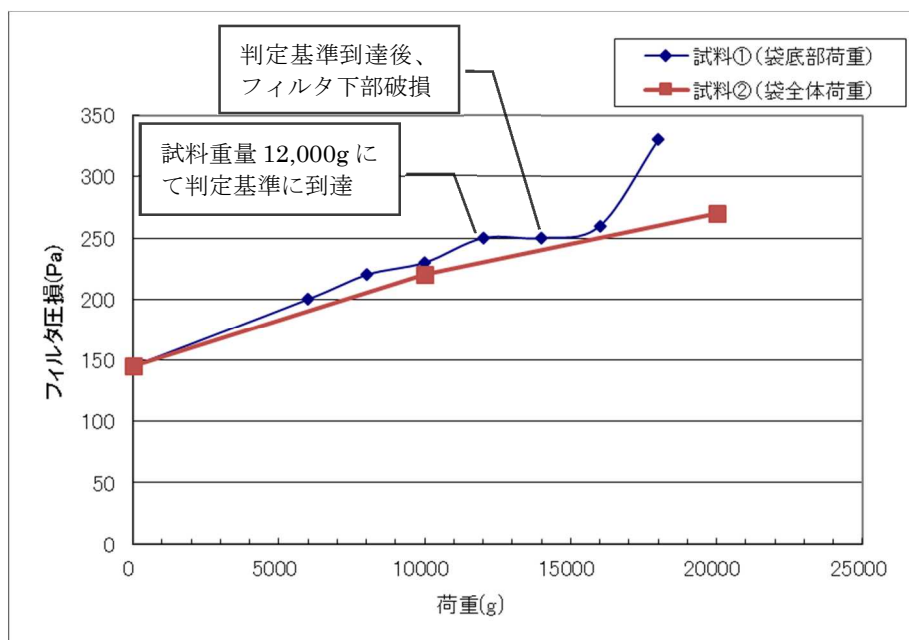
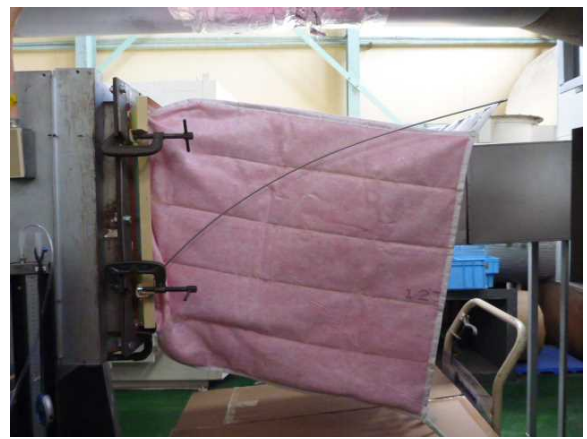


図 7-5 バグフィルタの耐荷重試験結果



初期状態 (0g 荷重)



6,000g 荷重



12,000g 荷重



18,000g 荷重

図 7-6 耐荷重試験におけるバグフィルタの外観

### (3) まとめ

「(1) バグフィルタの詰まり試験」及び「(2) バグフィルタの耐荷重試験」の結果を纏めると、以下の通り。

- ・ (1) の試験では、最大捕集容量 (8,540g) でも、バグフィルタの差圧は 202Pa であり、判定基準  を満足した。
- ・ (2) の試験では、試料重量 10,000g 迄は、バグフィルタの差圧が判定基準を満足し、試料重量 12,000g にて、バグフィルタの差圧が 250Pa となり、判定基準を上回った。

以上より、バグフィルタの閉塞時間評価に用いる灰捕集容量には、より厳しい値である 8,540g を用いることとする。

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

柏崎刈羽 6 号及び 7 号炉において、フィルタ閉塞の評価対象となる施設は、非常用ディーゼル発電機の吸気や換気空調設備のバグフィルタ（外気取入口）が該当するが、バグフィルタ手前には、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、降下火砕物が内部に侵入しにくい構造となっている。また、換気空調設備については降灰が確認された場合には必要に応じ外気取入口のダンパを閉止する運用としており、バグフィルタへの降下火砕物の付着を抑制できる設計となっている。

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

これは、

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

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

また、噴火口からの観測地点の距離が 135km であるセントヘレンズ火山噴火の観測データ（観測濃度  $33,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）について、当該濃度による影響評価を以下のとおり行った。

補足資料－ 7 の通り、非常用ディーゼル発電機の吸気に用いているバグフィルタの閉塞時間は 60 時間であり、他の換気空調設備においても同様のバグフィルタを用いていることから、閉塞時間は同程度である。

バグフィルタ交換に要する時間は最も時間を要する非常用ディーゼル発電機の吸気に用いているバグフィルタでも、4 時間程度で交換が可能である。他の換気空調設備のバグフィルタについても、より短時間で取替えることが可能であり、セントヘレンズ火山の濃度を用いて評価を行った場合でも影響が生じることはない。



なお、非常用ディーゼル発電機の吸気や換気空調設備は、外気取入口に下向き羽根のついたルーバから吸気することにより降下火砕物を吸い込みにくい構造としているが、上記試算では、こうした点を考慮せず、しかも大気中を降下・浮遊する火砕物の粒子が粒径にかかわらず、大気中濃度のまますべて吸い込まれてバグフィルタに捕集されることを前提とした計算となっているため、実際にはバグフィルタが閉塞するまでの時間にはさらに余裕があると考えられること、さらに、換気空調設備のバグフィルタに関しては、バグフィルタを通過する降下火砕物は細かな微細粒子ではあるが、降下火砕物が建屋内へ侵入することを抑制するため、降灰が確認された時点で必要に応じ空調停止やダンパ閉止の運用により影響防止を図ることとしており、機能に影響を及ぼすことはないと考える。

また、上記以外の大気中の降下火砕物濃度に関する知見として、電力中央研究所及び国立研究開発法人産業技術総合研究所にて以下の通り報告がされている。本報告書で報告されている降下火砕物濃度に対して以下の通り見解を示す。

電力中央研究所が公開した「数値シミュレーションによる降下火山灰の輸送・堆積特性評価法の開発（その2）－気象条件の選定法およびその関東地方での堆積量・気中濃度に対する影響評価－」（H28.4）の研究は、火山灰の性状に対して、影響が大きい風速・風向分布の特徴に注視した気象条件の設定法の検討、火山灰の性状への噴火・気象条件の影響を把握することを目的として実施したものである。

本論文で使用している「FALL3D」による数値シミュレーション手法については、今後更なる研究・開発を進め、将来的に発電所敷地での大気中の火山灰濃度を求める計算手法の確立を目指しているが、シミュレーションで用いられている噴煙柱モデルでは、噴出量が過大との報告がなされ、また、バグの存在が認識されており、現在のところ研究・開発段階と評価する。

上記に加え、本論文で公表した富士宝永噴火の数値シミュレーション結果に記載されている大気中濃度（ $10^{-1}$ – $10^0$ g/m<sup>3</sup>）については、実測データとの検証を踏まえた計算結果ではなく、種々の仮定を前提に実施した研究結果であり、現段階では原子力発電所の安全評価において火山灰の大気中濃度として用いることはできない。

国立研究開発法人産業技術総合研究所が公開した「吸気フィルタの火山灰目詰試験」（H28.4）の研究は、供試フィルタに火山灰を供給してフィルタの性能変化を確認する目的として実施したものである。試験は、日本工業規格JIS B 9908「換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法」に準拠した方法で実施され、試験で供給した火山灰濃度は、当該JIS規格の試験条件である粉じん濃度の

70mg/m<sup>3</sup>及びその10倍、100倍の濃度となっているが、試験条件の一例として示されている値であり、原子力発電所の安全評価に用いるものではないと考える。

なお、降下火砕物の影響については、安全機能を損なわない設計であることを確認しているが、原子炉施設へ影響を及ぼす可能性があるような知見に対しては、適切に対応することで更なる安全性向上に向けた取り組みを着実にやっていくこととする。

## 9. 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

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。降下火砕物の付着による冷却機能への影響はない。

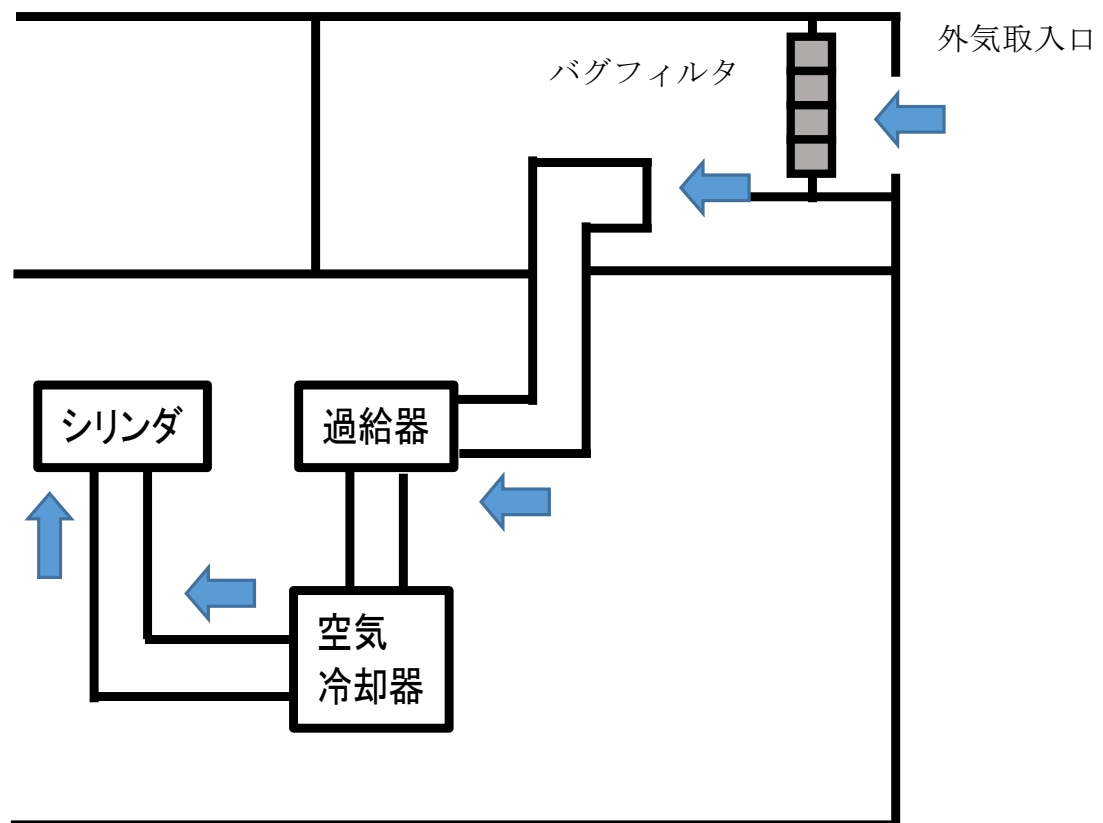


図 9-1 非常用ディーゼル機関給気系概略系統構造図

## 10. 降下火砕物の侵入による潤滑油への影響

非常用ディーゼル発電機吸気口上流に設置されているフィルタ通過後の降下火砕物の潤滑油への混入を想定し、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

評価対象火山の一つである妙高山より採取した降下火砕物を、6号及び7号炉の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 T104）に混入・攪拌させ（図 10-1）、非常用ディーゼル発電機に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。

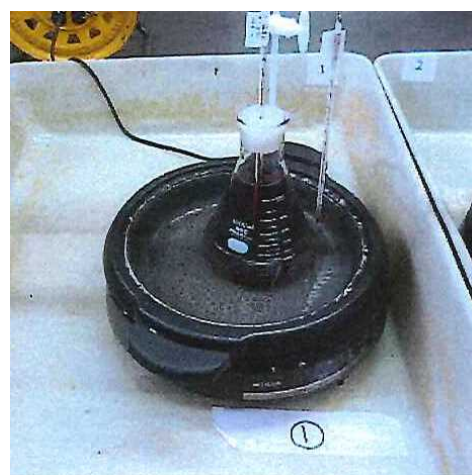
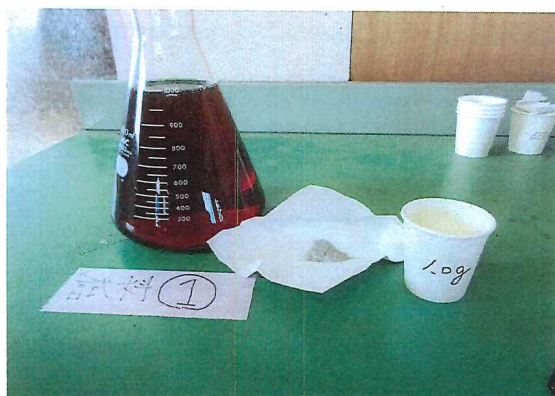


図 10-1 試料作成の様子

### 2. 試験条件

#### (1) 降下火砕物

##### a) 濃度

想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度は、表 10-1 より  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  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  の降下火砕物濃度の試料も作成した。

表 10-1 では、降下火砕物の大気中濃度に、アイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生した火山噴火の際のヘイマランド地区の濃度値 ( $3,241 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) を用いているが、仮に降下火砕物の大気中濃度値に米国セントヘレンズ火山

噴火の際の濃度値 ( $33,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) を用いた場合でも、上記の保守性に包含される。

表 10-1 想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度

①非常用ディーゼル発電機の吸気風量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	
②非常用ディーゼル発電機の運転継続日数 (日)	7
③換気空調系のフィルタの除去効率 (%)	20
④換気空調系のフィルタを通過する降下火砕物の粒径割合 (%) ※1	
⑤降下火砕物の大気中濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	3,241
⑥非常用ディーゼル発電機潤滑油系の潤滑油量 (ℓ)	
⑦潤滑油中の降下火砕物濃度 (mg/ℓ)	
$= \text{①} \times \text{②} \times 24 \times \text{③} \times \text{④} \times \frac{\text{⑤}}{1000} \div \text{⑥}$	

※1：柏崎刈羽原子力発電所を想定している粒径分布（富士山「宝永噴火」（宮地（1984）※2），樽前火山（鈴木他（1973）※3）から  $2 \mu\text{m}$  以下の火山灰の割合を  と算出

※2：富士火山 1707 年火砕物の降下に及ぼした風の影響，火山，第 2 集 第 29 巻 第 1 号，PP. 17-30

※3：樽前降下軽石堆積物 Ta-b 層の粒度組成，火山，第 2 集 第 18 巻 第 2 号，PP. 47-63

b) 粒径

混入させる降下火砕物の粒径は、換気空調系のバグフィルタ（粒径約  $2 \mu\text{m}$  に対し 80%以上捕獲）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うる非常用ディーゼル発電機の機関付フィルタのメッシュ寸法 ( $30 \mu\text{m}$ ) と比べても十分小さいため、本試験において降下火砕物の粒径分布は設定しない。

(2) 潤滑油

a) 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への影響を確認する観点から、表 10-2 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ことによる化学的影響（腐食等）が想定される。そのため、表 10-2 の試験項目は、降下火砕物（不純物）が混入した場合における動粘度や各不溶分、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 10-2 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同点検時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。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

表 10-2 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、始動不良などの原因となり、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。		(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 (過塩素酸法)	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の残存量を示す値であり、潤滑油の劣化状況を把握できることから選定した。		(JIS K2501) 試料を溶剤に溶かし、ガラス電極と比較電極を用いて、電位差滴定する。電位計の読みと、これに対応する液の滴定量との関係を作図し求める。
ペンタン不溶分 (A法)	潤滑油の不溶分が増加すると粘度の上昇、潤滑油システムの清浄性の悪化、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す、不溶分を乾燥させ重量を計測する。
トルエン不溶分 (A法)			

#### 4. 試験結果

以下の表 10-3 の通り，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，成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，潤滑油系に運転圧が加わる）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 300 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 10-3 潤滑油の成分分析結果

試験項目	代表性状	判定基準	試験結果 (降下火砕物濃度： <input type="text"/> )	判定	参考 (降下火砕物濃度： <input type="text"/> )
引火点[°C]	262 <sup>**</sup>	212 以上	<input type="text"/>	○	<input type="text"/>
動粘度[mm <sup>2</sup> /s]	146	230 以下	<input type="text"/>	○	<input type="text"/>
水分[%]	-	0.5 以下	<input type="text"/>	○	<input type="text"/>
塩基価[mg KOH/g]	13	6 以上	<input type="text"/>	○	<input type="text"/>
ペンタン不溶分 [%]	-	5 以下	<input type="text"/>	○	<input type="text"/>
トルエン不溶分 [%]	-	1 以下	<input type="text"/>	○	<input type="text"/>

※：製品の製造過程におけるばらつきを含んだ代表値であり，引火点の試験結果が低い値となっているのは，このばらつきによるものだと考えられる。また，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，今回実施した試験方法「P.M 法（分解点検等の際に実施される試験方法）」では，引火点の測定値が 10～20°C 程度低く示される。

なお，試験結果と参考の比較より，降下火砕物濃度が  より低い  の場合でも，引火点には大きな違いは見られなかったことから，降下火砕物の混入による引火点への影響はなかったものと考えられる。



## 11. 降下火砕物のその他設備への影響について

### 1. 評価対象施設

降下火砕物の影響を受ける可能性のある、その他設備について評価を実施する。

- (1) 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所
- (2) 免震重要棟内緊急時対策所
- (3) 排気筒（非常用ガス処理系）

### 2. 評価結果

#### (1) 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所

5号炉原子炉建屋内緊急時対策所の評価として、5号炉原子炉建屋に対する、荷重評価を行ない、降下火砕物による静的負荷により機能を喪失することはないことを確認した。

降下火砕物堆積荷重：8,542N/m<sup>2</sup> < 許容堆積荷重：32,300 N/m<sup>2</sup>

また、大気汚染に対する居住性の観点から、外気取入遮断時の5号炉緊急時対策所の居住環境について「空気調和・衛生工学便覧 空調設備編」に基づき、酸素濃度及び二酸化炭素濃度について評価した。

#### ○酸素濃度

##### 【評価条件】

- ・ 在室人数 180名
- ・ 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所バウンダリ内体積  m<sup>3</sup>
- ・ 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 0.066m<sup>3</sup>/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の歩行でのO<sub>2</sub>消費量）
- ・ 許容酸素濃度 18%以上（労働安全衛生規則）

##### 【評価結果】

表 11-1 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所における酸素濃度の時間変化

時間	0時間	17時間	18時間
酸素濃度	20.95%	18.0%	17.8%

## ○二酸化炭素濃度

### 【評価条件】

- ・ 在室人数 180 名
- ・ 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所バウンダリ内体積  m<sup>3</sup>
- ・ 空気流入はないものとする。
- ・ 初期二酸化炭素濃度 0.030%（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 0.030m<sup>3</sup>/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の軽作業でのCO<sub>2</sub>排出量）
- ・ 許容二酸化炭素濃度 0.5%以下（労働安全衛生規則）

### 【評価結果】

表 11-2 5号炉原子炉建屋内緊急時対策所における二酸化炭素濃度の時間変化

時間	0 時間	5 時間	6 時間
二酸化炭素濃度	0.03 %	0.43%	0.51%

以上の結果から、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所において、外気取入を遮断した場合においても、5時間程度の居住性が確保される結果となった。なお、本評価は保守的に外気取入を遮断して評価をしているが、間欠して建屋内の空気や外気を取入れること、並びに、要員を免震重要棟内緊急時対策所に分散配置することで、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所の居住環境がより長時間維持される。

## (2) 免震重要棟内緊急時対策所

免震重要棟内緊急時対策所の評価として、免震重要棟に対する、荷重評価を行ない、降下火砕物による静的負荷により機能を喪失することはないことを確認した。

$$\text{降下火砕物堆積荷重} : 8,542\text{N/m}^2 < \text{許容堆積荷重} : 14,800 \text{ N/m}^2$$

また、大気汚染に対する居住性の観点から、外気取入遮断時の免震重要棟内緊急時対策所の居住環境について「空気調和・衛生工学便覧 空調設備編」に基づき、酸素濃度及び二酸化炭素濃度について評価した。

## ○酸素濃度

### 【評価条件】

- ・ 在室人数 176 名

- ・ 免震重要棟内緊急時対策所バウンダリ内体積  m<sup>3</sup>
- ・ 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 0.066m<sup>3</sup>/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の歩行でのO<sub>2</sub>消費量）
- ・ 許容酸素濃度 18%以上（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 11-3 免震重要棟内緊急時対策所における酸素濃度の時間変化

時間	0 時間	28 時間	29 時間
酸素濃度	20.95%	18.0%	17.9%

○二酸化炭素濃度

【評価条件】

- ・ 在室人数 176 名
- ・ 免震重要棟内緊急時対策所バウンダリ内体積  m<sup>3</sup>
- ・ 空気流入はないものとする。
- ・ 初期二酸化炭素濃度 0.030%（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 0.030m<sup>3</sup>/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の軽作業でのCO<sub>2</sub>排出量）
- ・ 許容二酸化炭素濃度 0.5%以下（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 11-4 免震重要棟内緊急時対策所における二酸化炭素濃度の時間変化

時間	0 時間	9 時間	10 時間
二酸化炭素濃度	0.03 %	0.47%	0.51%

以上の結果から、免震重要棟内緊急時対策所において、外気取入を遮断した場合においても、9時間程度の居住性が確保される結果となった。なお、本評価は保守的に外気取入を遮断して評価をしているが、間欠して建屋内の空気や外気を取入れること、並びに、要員を5号炉原子炉建屋内緊急時対策所に分散配置することで、免震重要棟内緊急時対策所の居住環境がより長時間維持される。

### (3) 排気筒（非常用ガス処理系）

排気筒内に降下火砕物が侵入することにより、非常用ガス処理系配管が閉塞しないことを評価する。

#### ○評価結果

排気筒内に設置されている非常用ガス処理系の配管内には、降下火砕物が侵入する可能性があるが、配管頂部は閉止されている。また、当該系統からの空気は、配管頂部付近にある配管側面に設けられた開口より放出する構造となっており、降下火山灰は配管内に侵入しづらく、閉塞する可能性は少ないと考えられる。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

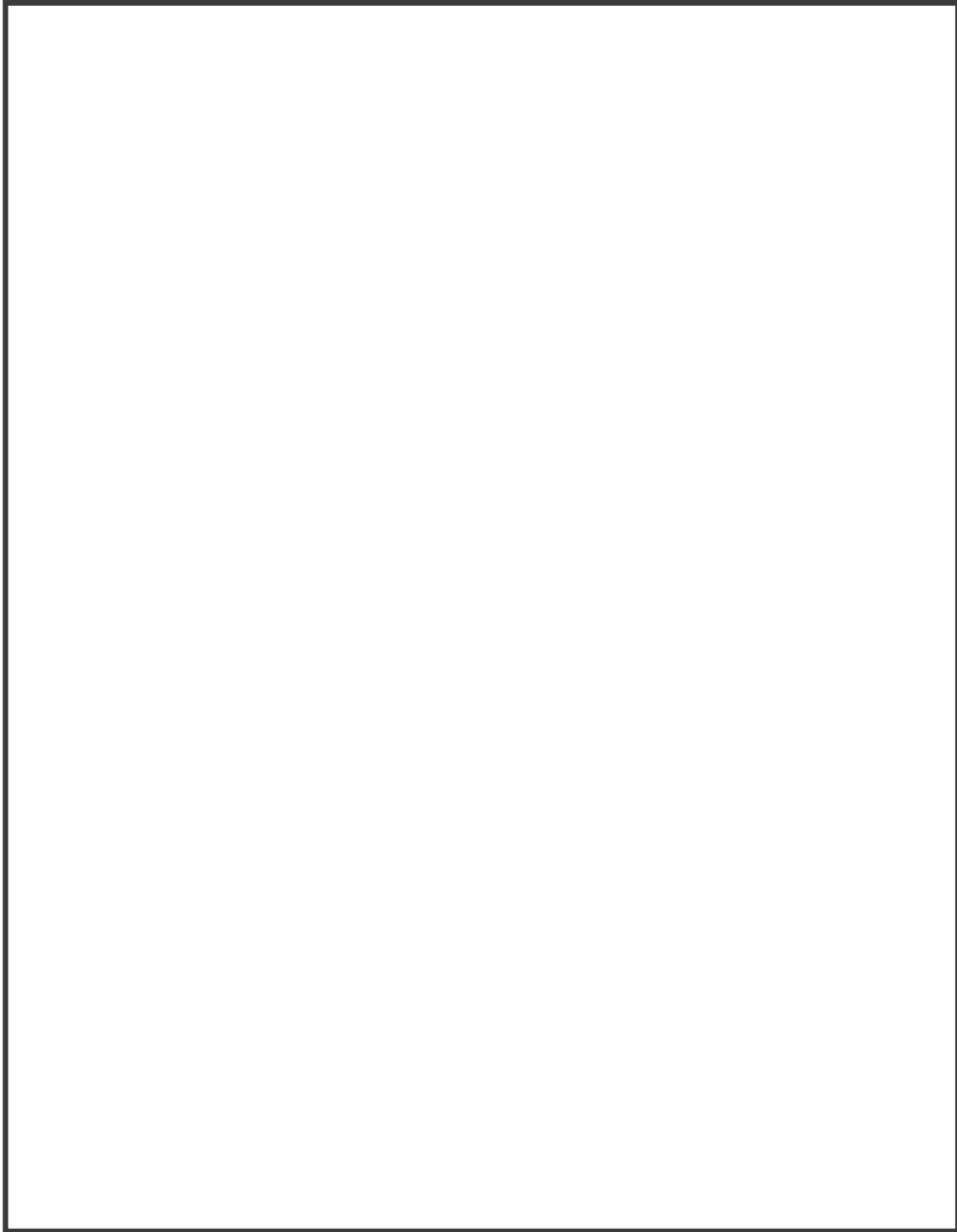


図 11-1 排気筒及び排気筒内非常用ガス処理系配管外形図

【参考】酸素消費量及び二酸化炭素排出量

○「空気調和・衛生工学便覧」成人呼吸量（酸素消費量換算に使用）

作業	呼吸数（回/min）	呼吸量（L/min）
仰が（臥）	14	5
静座	16	8
歩行	24	24
走行（150m/min）	40	64
走行（300m/min）	45	100

$$\text{酸素消費量}^* = 24(\text{L}/\text{min}) \times (0.2095 - 0.1640) = 1.092(\text{L}/\text{min}) \div 0.066(\text{m}^3/\text{h})$$

※空気調和・衛生工学便覧における酸素消費量換算式

○「空気調和・衛生工学便覧」労働強度別CO<sub>2</sub>吐出し量

作業程度	エネルギー代謝率 RMR	作業例 （産業衛生学会誌より）	CO <sub>2</sub> 吐出し量 （m <sup>3</sup> /h）
安静時	0	—	0.013
極軽作業	0～1	電話応対（座位）0.4，記帳0.5，計器監視（座位）0.5，ひずみとり（ハンマーで軽く，98回/分）0.9，自動車運転1.0	0.022
軽作業	1～2	旋盤（ヘアリング，0.83分/個）1.1，監視作業（立位）1.2，平地歩行（ゆっくり，45m/分）1.5，歩行（普通，71m/min）2.1	0.030
中等作業	2～4	丸のこ 2.5，歩行（速足，95m/分）3.5，自転車（平地，170m/分）3.4	0.046
重作業	4～7	びょう打ち（1.3本/分）4.2，階段歩行（昇り，45m/分）6.5	0.074

## 12. 火山灰の金属腐食研究

桜島火山灰による金属腐食研究結果を柏崎刈羽原子力発電所における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

火山灰による金属腐食については、主として火山ガス（ $\text{SO}_2$ ）が付着した火山灰の影響によるものである。

火山灰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、実火山灰である桜島火山灰を用いて、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（ $\text{SO}_2$ ）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り、火山灰の腐食成分濃度を高濃度で模擬した腐食試験結果であることから、柏崎刈羽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，末吉秀一他），防食技術 Vol. 39, pp. 247-253, 1990」によると、火山灰を水で洗浄し、可溶性の成分を除去した後、金属試験片に堆積させ、高濃度の  $\text{SO}_2$  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

図に示すとおり、火山灰の堆積量が多い場合は、火山灰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が、腐食量は表面厚さにして十数  $\mu\text{m}$  程度との結果が得られ、火山灰層では結露しやすいこと、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。

## (3) 試験結果からの考察

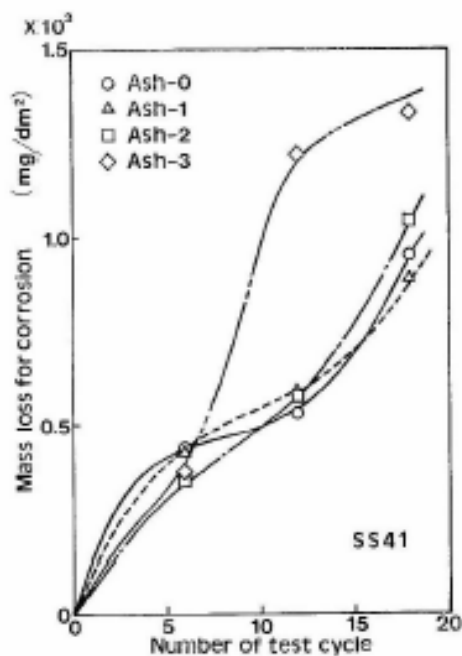
火山灰による腐食については、主として火山ガスが付着した火山灰の影響によるものであり、本研究においては、金属試験片の表面に火山灰を置き、実際の火山環境を模擬して高濃度の  $\text{SO}_2$  雰囲気中で暴露し、腐食実験を行って

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<sup>\*</sup>で金属腐食量を求めており、柏崎刈羽原子力発電所で考慮する火山灰についても十分適用可能である。

### 【※参考】

- ・ 三宅島火山の噴火口付近の観測記録：20～30ppm  
（「宅島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）



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 12-1 SS41 の腐食による腐食変化



### 13. 安全保護系計装盤への降下火砕物の影響

降下火砕物の建屋内侵入については、換気空調設備（外気取入口）からの侵入が考えられるが、バグフィルタは、粒径約  $2\mu\text{m}$  に対して 80%以上の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。

安全保護系の盤については、非常用DG/Z換気空調系または中央制御室換気空調系にて管理されており、外気取り入れ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、安全保護系の計装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盤があり、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

非常用DG/Z換気空調系及び中央制御室換気空調系の外気取入口にはバグフィルタ（主として粒径が  $2\mu\text{m}$  より大きい粒子を除去）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、概ね  $2\mu\text{m}$  以下の細かな粒子であると推定される。

#### 2. 計装盤に対する降下火砕物の影響

計装盤等において、数  $\mu\text{m}$  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、直ちに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。

## 14. 6, 7号炉の建屋及び屋外タンクの降灰除去について

火山灰の除灰に要する概算時間について、土木工事の人力作業<sup>※</sup>を参考に試算した結果を以下に示す。

表 14-1 除灰に要する概算時間

項目	評価諸元	
①堆積面積(m <sup>2</sup> )	原子炉建屋	6200
	タービン建屋 (熱交換器建屋含む)	15600
	廃棄物処理建屋	2300
	コントロール建屋	2400
	軽油タンク	400
	免震重要棟	1900
	緊急時対策所 (5号炉)	4000
	合計	32800
②堆積厚さ(m)	0.35	
③堆積量=①×②(m <sup>3</sup> )	約 11500	
④1m <sup>3</sup> 当たりの作業人工 <sup>※</sup> (人/日)	0.39	

## 1. 作業量(上記のとおり)

$$0.39 \text{ 人/日} \cdot \text{m}^3 \times 11500 \text{m}^3 = \text{約 } 4500 \text{ 人日}$$

## 2. 作業日数 (試算例)

(1) 作業人数 : 300 人 (6 人/組×50 組)

(2) 所要日数 : 約 15 日

※ : 「国土交通省土木工事積算基準 (H 2 4)」における人力掘削での人工を保守的に採用

## 15. アクセスルートにおける降下火砕物除去時間の評価について（暫定）

降下火砕物が敷地内に 35cm（設計基準）堆積することを想定した場合においても、安全施設の安全機能を確保するために、アクセスルートにおける降下火砕物の除去は不要である。しかしながら、参考として、火山灰が敷地内に 35cm 堆積した場合のアクセスルートにおける降下火砕物除去時間を評価した。

## 1. ホイールローダ仕様

- 最大けん引力 : 14.17t
- バケット全幅 : 2,700mm
- 走行速度(1速) : 前進・後進 0～8km/h

## 2. 降灰除去速度の算出

<降灰条件>

- 厚さ : 35cm
- 単位体積重量 : 1.5t/m<sup>3</sup>

<除去方法>

アクセスルート上に降り積もった火山灰を、ホイールローダで道路脇へ押し出し除去する。一回の押し出し可能量を 11.3t とし、11.3t の火山灰を集積し、道路脇へ押し出す作業 1 サイクルとして繰り返す。

1 回の集積で進める距離 X

$$= 11.3\text{t} \div (\text{火山灰厚さ } 0.35\text{m} \times \text{幅 } 2.7\text{m} \times 1.5\text{t/m}^3)$$

$$= 7.97\text{m} \approx 7.9\text{m}$$

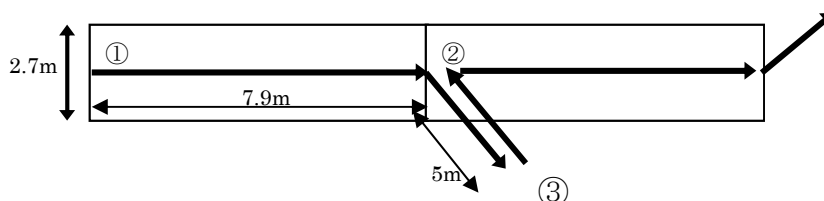
1 サイクル当りの作業時間は、1 速の走行速度(0～8km/h)の平均 4km/h で作業すると仮定して

A : 押し出し (①→②→③) :  $(7.9\text{m} + 5\text{m}) \div 4\text{km/h} = 11.6 \text{ 秒} \approx 12 \text{ 秒}$

B : ギア切り替え : 3 秒

C : 後進 : (③→②) :  $5\text{m} \div 4\text{km/h} = 4.5 \text{ 秒} \approx 5 \text{ 秒}$

1 サイクル当りの作業時間 (A + B + C) = 12 秒 + 3 秒 + 5 秒 = 20 秒



<降灰除去速度>

1 サイクル当りの除去延長÷1 サイクル当りの除去時間

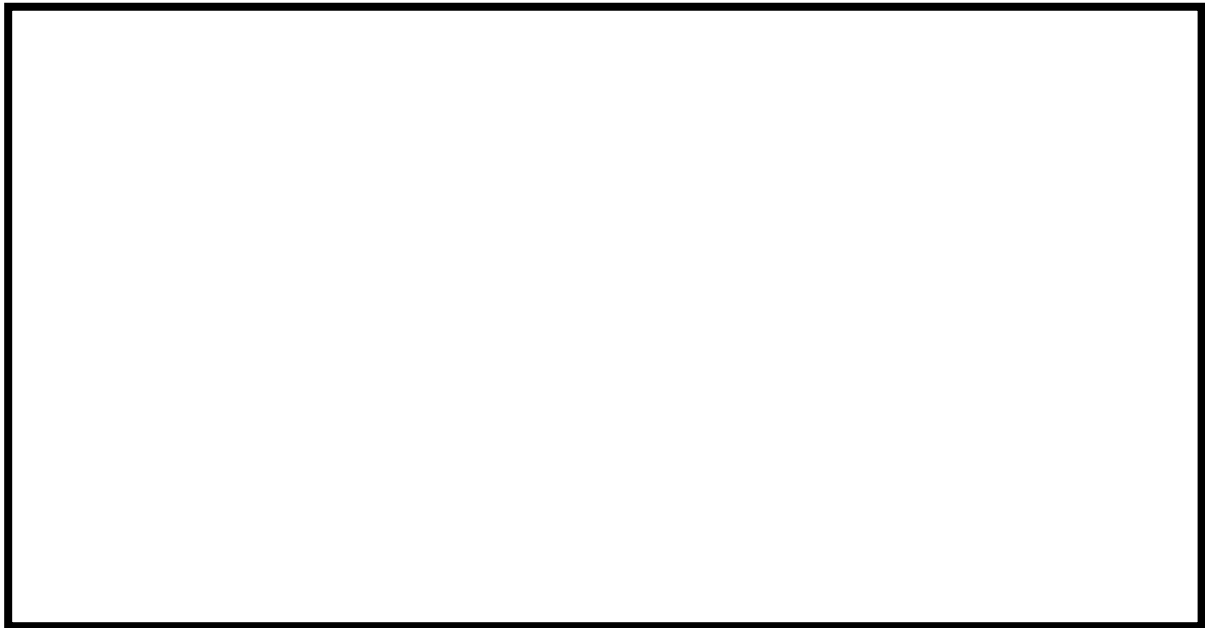
$$= 7.9\text{m} \div 20 \text{ 秒} = 0.395\text{m} / \text{秒} = 1.422\text{km} / \text{h} \approx 1.4\text{km} / \text{h}$$

### 3. まとめ

○火山灰の除灰速度について、1.4km/h とする。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

①大湊側高台保管場所からのルートで仮復旧に要する時間が最も長いルート



区間	距離(約m)	時間評価項目	速度(km/h)	所要時間(分)	累積(分)
①→②	2,895	徒歩移動	4	44	44
②→③→④	1,008	降灰除去	1.4	44	88
④→③	147	移動	15	1	89
③→⑤→⑥	300	降灰除去	1.4	13	102
⑥→⑤	157	移動	15	1	103
⑤→⑦	800	降灰除去	1.4	35	138

図 15-1 大湊側高台保管場所からの降灰除去ルート及び仮復旧時間

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

②荒浜側高台保管場所からのルートでの仮復旧に要する時間が最も長いルート



区間	距離(約m)	時間評価項目	速度(km/h)	所要時間(分)	累積(分)
①→②	1,666	徒歩移動	4	25	25
②→③→④→⑤	2,155	降灰除去	1.4	93	118
⑤→④→③	208	移動	15	1	119
③→⑥→⑦	238	降灰除去	1.4	11	130
⑦→⑥	157	移動	15	1	131
⑥→⑧	800	降灰除去	1.4	35	166

図 15-2 荒浜側高台保管場所からの降灰除去ルート及び仮復旧時間

※代替緊急時対策所からの移動・作業も想定されるが、仮復旧に要する時間が長い免震重要棟からの時間を算出した。また、参考にサブルートにおける仮復旧に要する時間を算出した結果、大湊側高台保管場所、荒浜側高台保管場所からのルートでそれぞれ 142 分、274 分であった。

## 16. 降下火砕物降灰時のバグフィルタ取替についての手順

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。

- ・フィルタの取替作業はガラリ内にて行うため、降灰の影響を受けにくいと考えられるが、保護具（マスク，めがね）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、周囲の火山灰を清掃する。
- ・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、火山灰の再浮遊の影響を低減させるため、作業エリアの火山灰は清掃する。

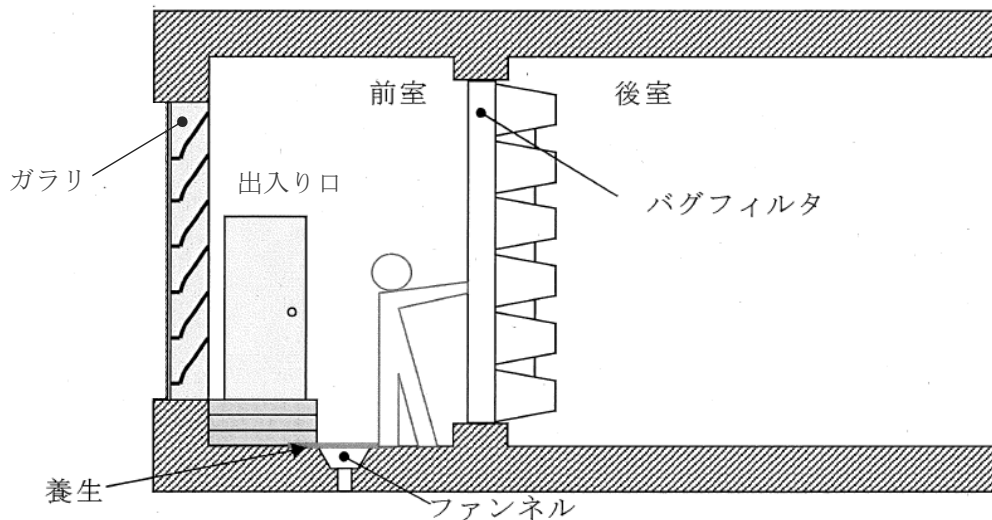


図 16-1 バグフィルタの清掃・取替イメージ

17. 観測された諸噴火の最盛期における噴出率と継続時間

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。

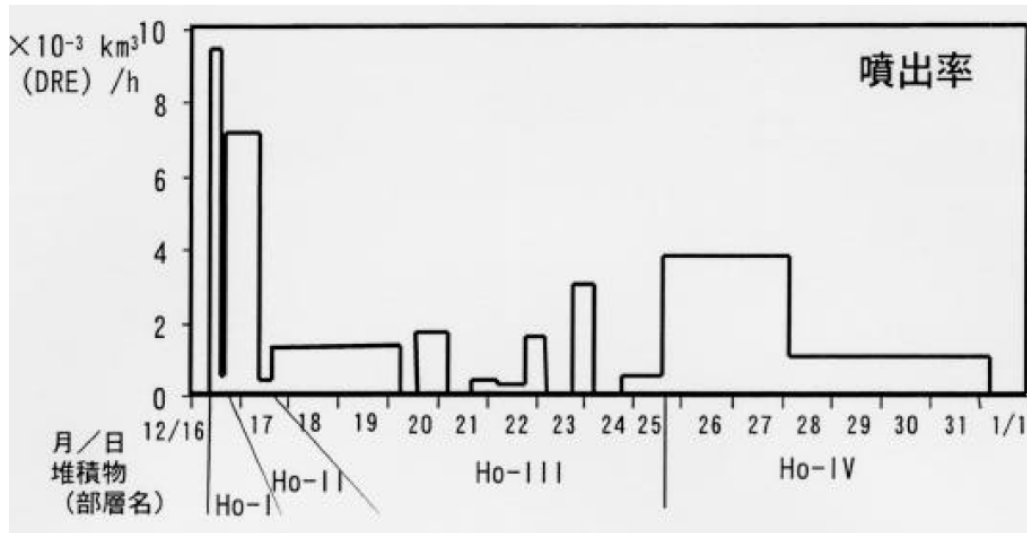


図 17-1 富士山（宝永噴火 1707 年）の噴出率の推移（宮地 他（2007））

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 17-1 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 <sup>3</sup> /s)	継続時間 (h)
Pinatubo 1991 (フィリピン)	35	250,000	9
Bezymianny 1956 (カムチャツカ)	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 ( # )	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

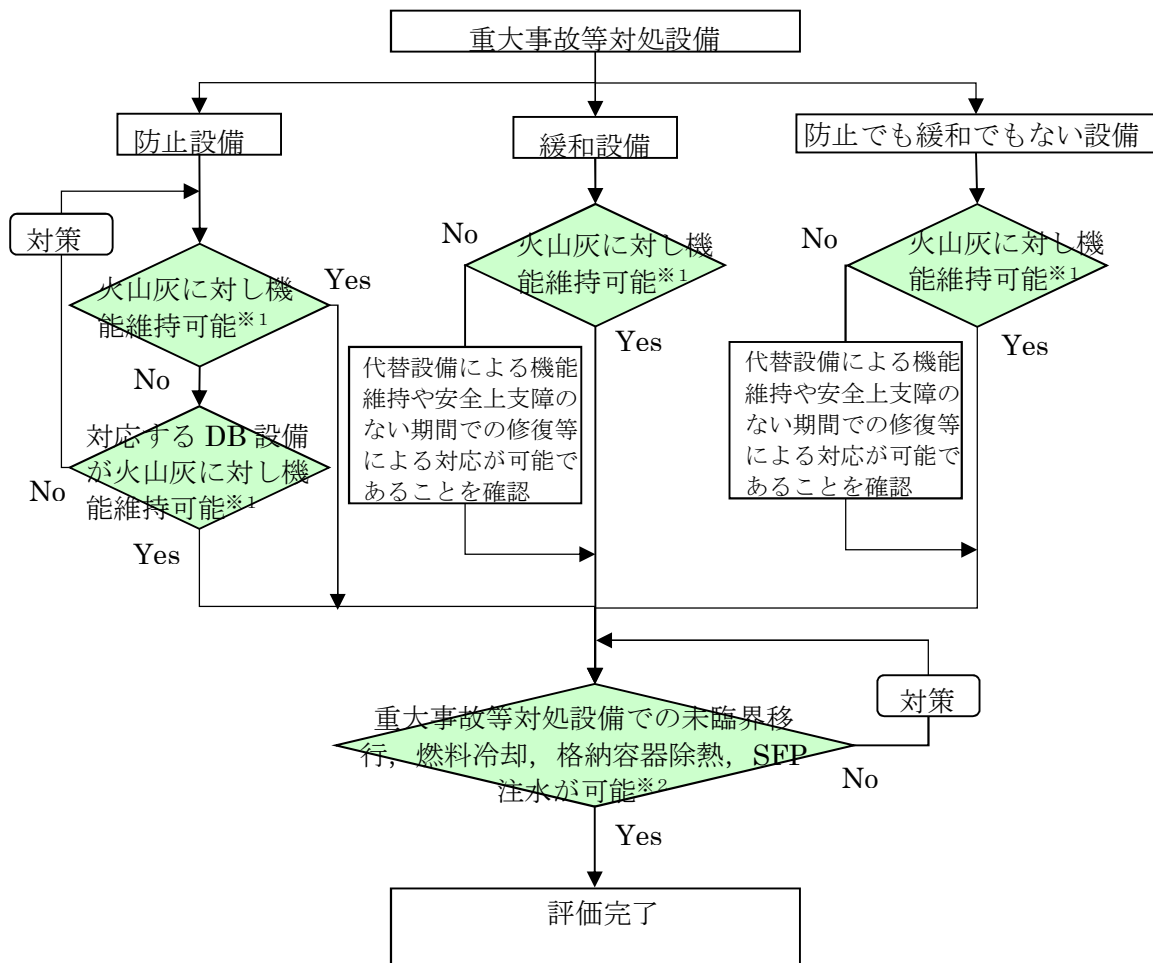


## 18. 重大事故等対処設備への考慮

設計基準事象に対して耐性を確保する必要があるのは設計基準事故対処設備であり、重大事故等対処設備ではないが、第四十三条の要求を踏まえ、設計基準事象によって、設計基準事故対処設備の安全機能と重大事故等対処設備が同時にその機能が損なわれることがないことを確認するとともに、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といった観点から、代替手段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、外部事象によって設計基準設備の安全機能と同時にその機能が損なわれる恐れのないこと
- (2) 重大事故等対処設備であって、重大事故防止設備でない設備は、代替設備もしくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること
- (3) 外部事象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（各外部事象により重大事故等対処設備と設計基準設備が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋（原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋、免震重要棟※3、5号炉緊急時対策所）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設備が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

※3：Ss地震には機能喪失する可能性は否定できないが、降下火砕物の荷重が作用した場合における健全性を確認。

図 18-1 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 18-1 重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（1 / 5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	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）	ホイールローダ	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
第 44 条（緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備）	代替制御棒挿入機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替冷却材再循環ポンプ・トリップ機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入系	防止設備	R/B	○	建屋内
第 45 条（原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	原子炉隔離時冷却系	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	高圧代替注水系	防止設備	R/B	○	建屋内
第 46 条（原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備）	代替自動減圧機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	減圧制御 [自動減圧系の起動阻止スイッチ]	防止設備	R/B	○	建屋内
	高圧窒素ガスポンプ(供給系配管含む)	防止設備	R/B	○	建屋内
第 47 条（原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	低圧代替注水系（常設） [MWC ポンプ]	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	低圧代替注水系（可搬型） [消防車]	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	低圧代替注水系（可搬型）（常設箇所） [消防車接続口、配管等]	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし
	低圧代替注水系（常設箇所） [原子炉圧力容器（注入先）、配管等]	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応する DB 設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理

表 18-1 重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価 (2 / 5)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設備設置箇所	火山		
					評価	防護方法	
第 48 条 (最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)	代替原子炉補機冷却系 (可搬部) [代替 Hx 設備一式]		防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)	
	代替原子炉補機冷却系 (常設箇所) [代替 Hx 接続口、配管等]		防止設備・緩和設備	屋外 T/B 廻り	○	影響なし	
	代替原子炉補機冷却系 (常設箇所) [原子炉補機冷却系配管、Hx 等]		防止設備・緩和設備	R/B T/B	○	建屋内	
	真空破壊弁 (S/C→D/W)		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	耐圧強化ベント系 (W/W 及び D/W)		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	格納容器圧力逃がし装置 [フィルタベント]		→50 条に記載 (うち、防止設備)		—	—	
	代替格納容器圧力逃がし装置 [地下式フィルタベント]		→50 条に記載 (うち、防止設備)		—	—	
第 49 条 (原子炉格納容器内の冷却等のための設備)	代替格納容器スプレィ冷却系 [MUWC 代替スプレィ]		防止設備・緩和設備	Rw/B R/B	○	建屋内	
第 50 条 (原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備)	格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置、よう素フィルタ、配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外	○	設計荷重に対して影響ないことを確認	
		フィルタベントライン計装 [水素濃度計、放射線モニタ等]	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	R/B, 屋外 R/B 廻り	○	建屋内 (格納容器圧力逃がし装置側水素濃度計) 及び代替設備 (耐圧強化ベント用放射線検出器)	
		格納容器圧力逃がし装置スクラパ水 ph 制御設備 (可搬型)	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)	
		窒素供給装置 (可搬型)	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)	
	代替格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置、よう素フィルタ、配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外 (地下設置)	○	影響なし (屋内・地下)	
		代替フィルタベントライン計装 [水素濃度計、放射線モニタ等]	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外 (地下設置)	○	影響なし (屋内・地下)	
		代替格納容器圧力逃がし装置葉液タンク	緩和設備	屋外 (地下)	○	影響なし (地下)	
		窒素供給装置 (可搬型)	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)	
	代替循環冷却	復水移送ポンプ		→47, 49 条に記載 (うち、緩和設備)		—	—
		代替 Hx 設備一式 (可搬部)、配管等		→48 条に記載 (うち、緩和設備)		—	—
		代替循環冷却用設備 (常設)		緩和設備	R/B, T/B, Rw/B	○	建屋内
		真空破壊弁 (S/C→D/W)		→48 条に記載 (うち、緩和設備)		—	—
	第 51 条 (原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備)	格納容器下部注水系 (常設)		緩和設備	Rw/B	○	建屋内
格納容器下部注水系 (可搬型) [消防車]		緩和設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰する。)		
格納容器下部注水系 (可搬型) (常設箇所) [消防車接続口、配管等]		緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし		
格納容器下部注水系 (常設箇所) [復水補給水系配管等]		緩和設備	R/B Rw/B	○	建屋内		
格納容器下部注水系 (常設箇所) [原子炉格納容器 (注入先)]		→49 条に記載 (うち、緩和設備)		—	—		

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応する DB 設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる (防止設備)  
 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備、防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理

表 18-1 重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価 (3 / 5)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	火山	
				評価	防護方法
第 52 条 (水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備)	格納容器内の水素濃度監視設備 [格納容器水素濃度系 (SA) 格納容器酸素濃度計]	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置	→50 条に記載		—	—
	代替格納容器圧力逃がし装置	→50 条に記載		—	—
	耐圧強化ベント系 (W/W)	→48 条に記載 (窒素供給装置 (可搬型) は 50 条に記載)		—	—
	耐圧強化ベント系 [耐圧強化ベント系放射線モニタ, フィルタ装置水素濃度計]	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
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器 [PAR]	緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋水素濃度監視設備	緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋水素濃度計	緩和設備	R/B	○	建屋内
第 54 条 (使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備)	燃料プール代替注水系 (可搬型) [消防車]	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	燃料プール代替注水系 (可搬型) (常設箇所) [消防車接続口、配管等]	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし
	燃料プール代替注水系 (常設箇所) [配管、弁等]	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プールの水位、プール水温度	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プール放射線モニタ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ	防止でも緩和でもない設備	R/B	○	建屋内
第 55 条 (工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備)	放水設備一式 [大容量送水車、放水砲]	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	放射性物質吸着剤	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	海洋への拡散抑制設備 [汚濁防止膜]	緩和設備	屋外固体廃棄物処理建屋廻り	○	影響なし (適切に除灰する。)
	海洋への拡散抑制設備 [汚濁防止膜設置のための小型船舶]	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	泡消火設備 [泡原液搬送車、泡原液混合装置]	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
第 56 条 (重大事故等の収束に必要な水の供給設備)	復水貯蔵槽	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	サプレッション・プール	緩和設備	R/B	○	建屋内
	防火水槽	— (代替淡水源)	屋外 (地下埋設)	○	影響なし (地下)
	淡水貯水池	— (代替淡水源)	淡水貯水池	○	影響なし
	淡水貯水池～ 防火水槽移送ホース	防止設備・緩和設備	地下敷設	○	影響なし (地下)
	海水	—	屋外	—	—
	海水取水ポンプ、海水ホース (可搬型代替注水ポンプ)	防止設備・緩和設備 →47 条に記載	可搬型 SA 設備保管場所 —	○ —	影響なし (適切に除灰する。) —

○: 各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応する DB 設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる (防止設備)  
又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備、防止でも緩和でもない設備)  
—: 他の項目にて整理

表 18-1 重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（4 / 5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	設備設置箇所	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〔GTG 一式〕	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機 保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	常設代替交流電源設備〔第二 GTG 一式〕	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし（適切に除灰する。）
	常設代替交流電源設備〔非常用高圧母線 C・D 系〕	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替交流電源設備〔電源車〕（移動式変圧器含む）	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	可搬型代替交流電源設備（常設箇所）〔電源車接続箇所〕	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし
	常設代替直流電源設備〔AM 用直流 125V 蓄電池〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備〔蓄電池 A 系、A-2 系〕	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備〔電源車〕	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	可搬型代替直流電源設備〔免震棟保管バッテリー〕	防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	建屋内
	代替所内電源盤	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	6-7 号炉電力融通ケーブル	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	（燃料設備（D/G 軽油タンク））	一設計基準対象施設における評価対象施設		—	—
（燃料設備（タンクローリー））	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）	
第 58 条（計装設備）	重大事故等発生時の計装（SA 時計装一式） 〔RPV 温度・圧力・水位〕 〔RPV・格納容器への注水量〕 〔格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・酸素濃度・放射線量率〕 〔未臨界監視〕 〔最終ヒートシンクによる冷却状態の確認〕 〔格納容器バイパス監視〕 〔水源の確保〕 〔原子炉建屋内水素濃度〕	防止設備・緩和設備	C/B R/B Rw/B	○	建屋内
第 59 条（原子炉制御室）	中央制御室及び生体遮蔽	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室居住性（空調機）	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室及び生体遮へい	緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室加圧用ポンペ	緩和設備	C/B	○	建屋内

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる  
又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応する DB 設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）  
又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）  
—：他の項目にて整理

表 18-1 重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価 (5 / 5)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	設備設置箇所	火山	
					評価	防護方法
第 60 条 (監視測定設備)	可搬型モニタリング・ポスト		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	放射線サーベイ機器 [可搬型ダスト・よう素サンブラ, GM 汚染サーベイメータ, NaI シンチレーションサーベイメータ, 電離箱サーベイメータ, ZnS シンチレーションサーベイメータ]		防止でも緩和でもない設備	免震重要棟 R/B (5 号炉)	○	建屋内
	小型船舶		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	可搬型気象観測装置		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	影響なし (適切に除灰する。)
	モニタリング・ポスト用発電機		防止でも緩和でもない設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰する。)
第 61 条 (緊急時対策所)	緊急時対策所 [KK5TSC] 及び生体遮蔽		防止設備・緩和設備	R/B (5 号炉)	○	建屋内
	緊急時対策所 [KK5TSC] 居住性 (空調機)		防止設備・緩和設備	R/B (5 号炉)	○	建屋内
	5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所用可搬電源設備		防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし (適切に除灰する。)
	プラントのデータ表示システム [KK5TSC データ伝送装置、SPDS 表示装置等]		防止でもない緩和でもない設備	R/B (5 号炉) (屋外設備含む)	○	建屋内 (屋外設備については代替設備 (有線系) にて機能維持可能)
	緊急時対策所 [免震重要棟 TSC] 及び生体遮蔽		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	建屋内
	緊急時対策所 (免震重要棟 TSC) 居住性 (空調機)		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	建屋内
	免震重要棟ガスタービン発電機		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	建屋内
	プラントのデータ表示システム [免震重要棟 TSC データ伝送装置、SPDS 表示装置等]		防止でも緩和でもない設備	免震重要棟 (屋外設備含む)	○	建屋内 (屋外設備については代替設備 (有線系) にて機能維持可能)
(通信連絡設備)			→62 条に記載		—	—
第 62 条 (通信連絡を行うために必要な設備)	所内通信	携帯型音声呼出電話設備	防止設備・緩和設備	R/B, T/B, C/B, Rw/B	○	建屋内
	所内外通信	衛星電話設備, 無線連絡設備 (所内通信)	防止でも緩和でもない設備	C/B, 免震棟, R/B (5 号炉) (屋外設備含む)	○	影響なし (屋外設備についても、灰が積もりにくい形状であるとともに、適切に除灰するなどの対応により機能維持可能)
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備, データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	C/B, 免震棟, R/B (5 号炉) (屋外設備含む)	○	影響なし (屋外設備についても、灰が積もりにくい形状であるとともに、適切に除灰するなどの対応により機能維持可能)

○:各外部事象に対し安全機能を維持できる  
 又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも、対応する DB 設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は各外部事象による損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —:他の項目にて整理

19. 軽油タンクからの燃料移送について

柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉の 7 日間の外部電源の喪失に対して、非常用ディーゼル発電機の燃料として、軽油タンク及び燃料デイタンクを有しており、燃料移送ポンプにより、軽油タンクから燃料デイタンクへ燃料移送される系統構成となっている。

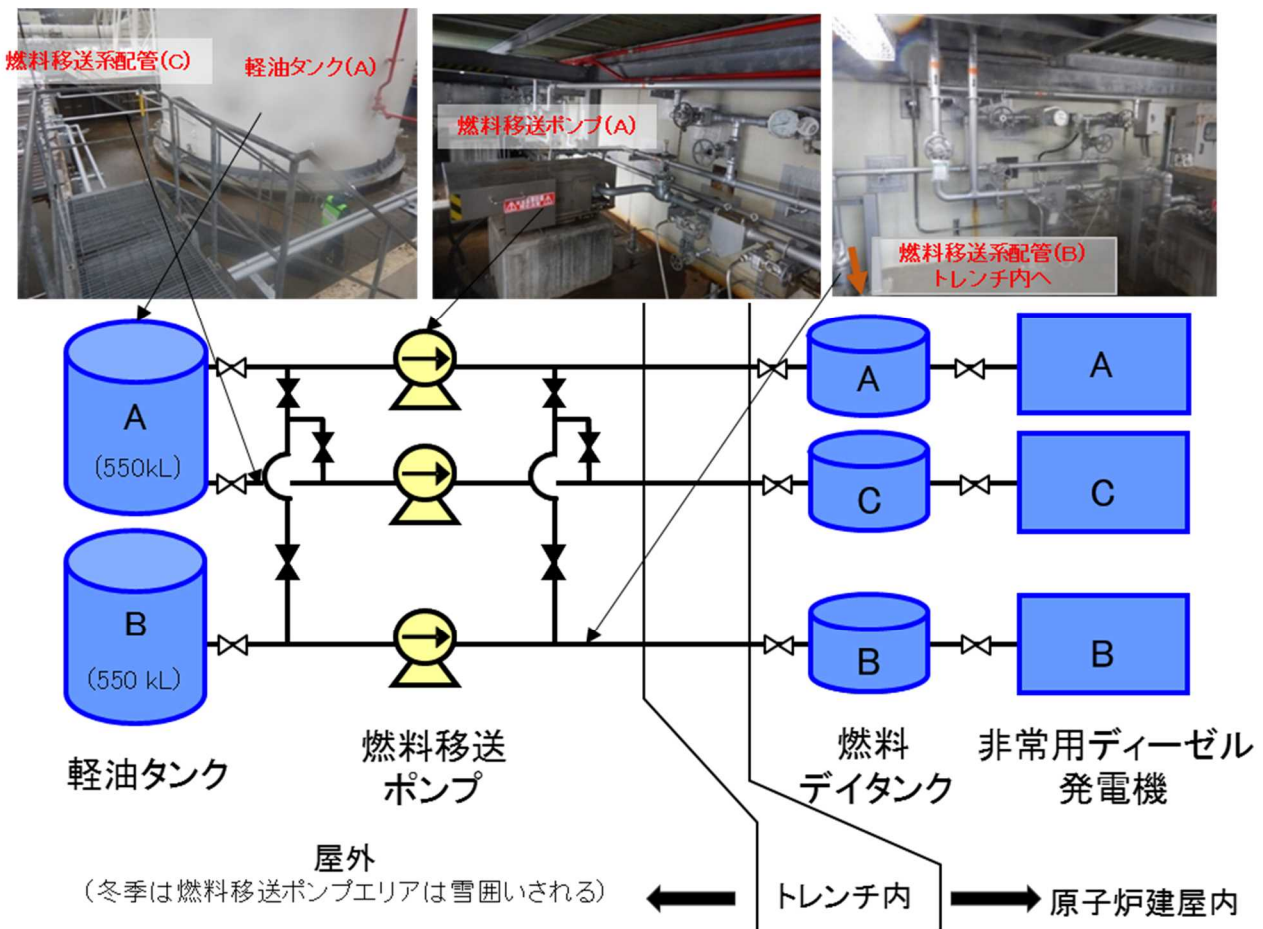


図 19-1 非常用ディーゼル発電機 燃料供給系統の構成

軽油タンク及び燃料移送ポンプは屋外設備であるが、降下火砕物の静的荷重等に対してその機能に影響がないことを確認している（個別評価-5）。また、燃料移送系の配管は、軽油タンクの取り出し口から燃料移送系配管トレンチまでは屋外に設置されているが、その形状は管状であり、その口径は 65A 以下と降下火砕物が堆積しづらい形状であることから、降下火砕物によって機能喪失することは



ない。以上のことから、7日間の外部電源喪失に対して、非常用ディーゼル発電機へ燃料供給が可能であり、原子炉の停止並びに停止後の原子炉及び燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要な電力の供給が継続できる。

20. 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

水質汚染については、降下火砕物が柏崎市水道水に混入することで、補給水等の汚染が考えられる。

図 20-1 に示す通り、市水道水は、ろ過水タンク及び純水装置を経由し純水タンクに供給される。ろ過水タンクに貯留された水は消火系及び雑用水系に供給されるが、外部事象防護対象施設は含まれていない。一方、純水タンクに貯留された純水は純水補給水系に供給される設備には、復水貯蔵槽及び原子炉補機冷却水サージタンク等への補給並びにホウ酸水注入系の封水等があるが、何れも、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ではなく、水質汚染はプラントの安全機能に影響を及ぼさない。

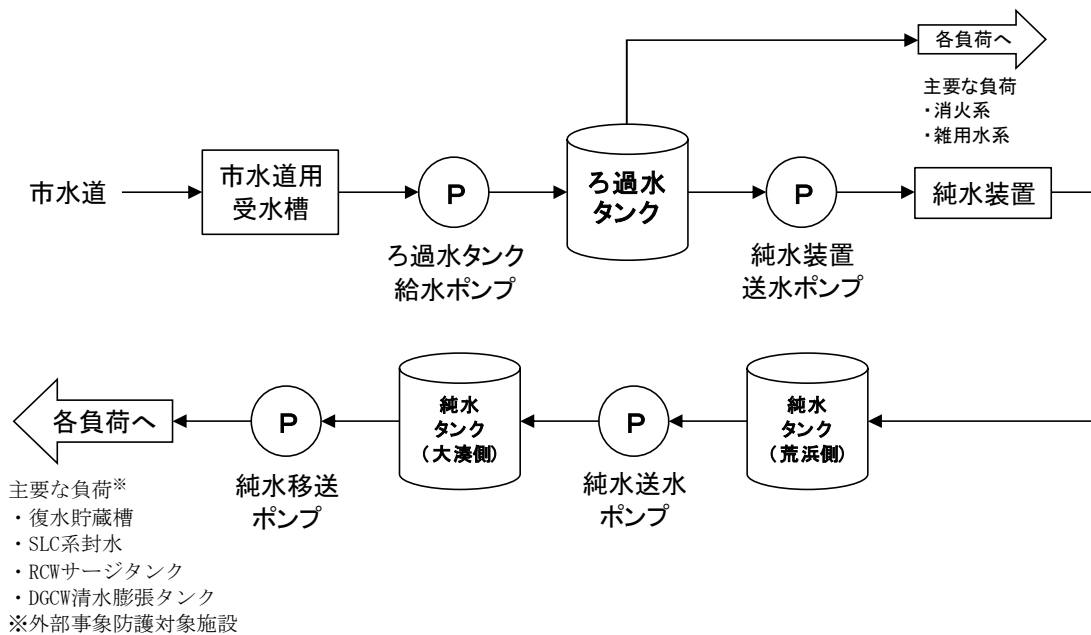


図 20-1 外部から供給される水源の概略系統図

別 添 4 - 1

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

外部火災影響評価について

第6条：外部からの衝撃による損傷の防止  
(外部火災)

目次

1. 基本方針
  - 1.1 基本事項
  - 1.2 想定する外部火災
  - 1.3 防護対象施設
2. 火災の影響評価
  - 2.1 森林火災
  - 2.2 近隣の産業施設の火災・爆発
  - 2.3 航空機墜落による火災
  - 2.4 二次的影響の評価

添付資料

1. 外部火災影響評価対象の考え方について
2. 森林火災による影響評価について
3. 石油コンビナート等の火災・爆発について
4. 燃料輸送車両の火災・爆発について
5. 漂流船舶の火災・爆発について
6. 敷地内における危険物タンクの火災について
7. 原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災について
8. ばい煙および有毒ガスの影響評価について

<概要>

1. において、想定する外部火災及び評価内容を整理するとともに、外部火災からの防護対象施設を整理する。
2. において、想定する外部火災の影響評価結果について説明する。

## 1. 基本方針

### 1.1 基本事項

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。）又は人為事象（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とされている。

このため、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド（以下、評価ガイドという。）」に基づき、外部火災影響評価を行い、外部火災により、発電用原子炉施設へ影響を与えないこと及び発電所敷地外で発生する火災の二次的影響に対する適切な防護対策が施されていることを評価する。

### 1.2 想定する外部火災

設置許可基準規則第六条において、敷地及び敷地周辺から想定される自然現象又は人為事象として森林火災、近隣の産業施設の火災・爆発、飛来物（航空機墜落）を挙げている。

このことから、想定する外部火災は以下のとおりとする。

- (1) 森林火災
- (2) 近隣の産業施設の火災・爆発
- (3) 航空機墜落による火災

また、具体的な評価内容等については、以下のとおりである。

第1.2-1表 外部火災評価内容

火災種別	考慮すべき火災	評価内容	評価項目
森林火災	発電所敷地外10km圏内に発火点を設定した発電所に迫る森林火災	<ul style="list-style-type: none"> <li>森林火災シミュレーション解析コード（FARSITE）を用いた森林火災評価</li> <li>森林火災評価に基づく防護対象施設の熱影響評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>防火帯幅評価</li> <li>熱影響評価</li> <li>危険距離評価</li> </ul>
近隣の産業施設の火災・爆発	発電所敷地外10km圏内の石油コンビナート等の火災・爆発	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電所敷地外の石油コンビナート等について発電所との距離等を考慮した危険距離及び危険限界距離評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>危険距離評価</li> <li>危険限界距離評価</li> </ul>
	発電所敷地内の危険物貯蔵設備の火災	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電所敷地内の危険物貯蔵設備火災による熱影響評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱影響評価</li> </ul>
航空機墜落による火災	敷地への航空機墜落時の火災	<ul style="list-style-type: none"> <li>墜落を想定する航空機に相当する火災を想定した防護対象施設の熱影響評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱影響評価</li> </ul>

### 1.3 防護対象施設（添付資料－1）

安全施設に対して、外部火災の影響を受けた場合、原子炉の安全性を確保するために必要な設計上の要求機能を喪失し、安全性の確保が困難となるおそれがあることから、安全機能を有する設備について外部火災に対し安全機能を損なわない設計とする。

安全機能を有する設備は、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（以下「重要度分類審査指針」という。）において、安全機能を有するクラス1，2，3に該当する構築物，系統及び機器とする。

また、設計基準事象に対して耐性を確保する必要があるのは設計基準対象施設であり、重大事故等対処施設ではないが、設計基準を超える事象が発生した場合に使用する重大事故等対処施設が、その前段の設計基準事象の自然現象によって機能喪失することは回避するべきであることから、原則防火帯の内側に配置し外部火災の熱影響を回避する。

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

6条-別添4(外火)-1-5



第 1.3-1 図 発電所構内全体図



## 2. 火災の影響評価

### 2.1 森林火災（添付資料－2）

#### 2.1.1 評価内容

発電所敷地外で発生する森林火災が，発電所へ迫った場合でも発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを以下の項目により評価した。

- (1) 火炎の到達時間の評価
- (2) 防火帯幅の評価
- (3) 熱影響の評価
- (4) 危険距離の評価

#### 2.1.2 評価要領

森林火災の解析にあたっては，「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」において推奨されている森林火災シミュレーション解析コードFARSITEを使用し，以下の設定により解析した。

- ・土地利用データは，現地状況をできるだけ模擬するため，国土数値情報（国土交通省）の100m メッシュの土地利用データを用いた。
- ・植生データは，森林の現状を把握するため，樹種や生育状況に関する情報を有する自然環境保全基礎調査 植生調査データの空間データを入手し，その情報を元に植生調査を実施した。その結果から，保守的な可燃物パラメータを設定し，土地利用データにおける森林領域を，樹種・林齢によりさらに細分化した。
- ・地形データは，基盤地図情報（国土地理院）の10mメッシュの標高データを使用した。
- ・気象データは，森林火災の発生件数が多い3～5月の過去10年間のデータを調査し，森林火災の延焼を拡大させる観点から，最小湿度，最高気温及び最大風速を設定した。
- ・風向は最大風速記録時と卓越風向として，南南東および南東側に発火点を設定した。
- ・発火点は以下の3地点を設定した。

##### （ケース1）

発電所近隣からの発火の方が防火帯周辺に火災が到達するまでの時間が短くなることから，防火帯までの距離が短くなる南南東方向の国道352号線沿いに発火点を選定する。（防火帯から約0.6km）

##### （ケース2）

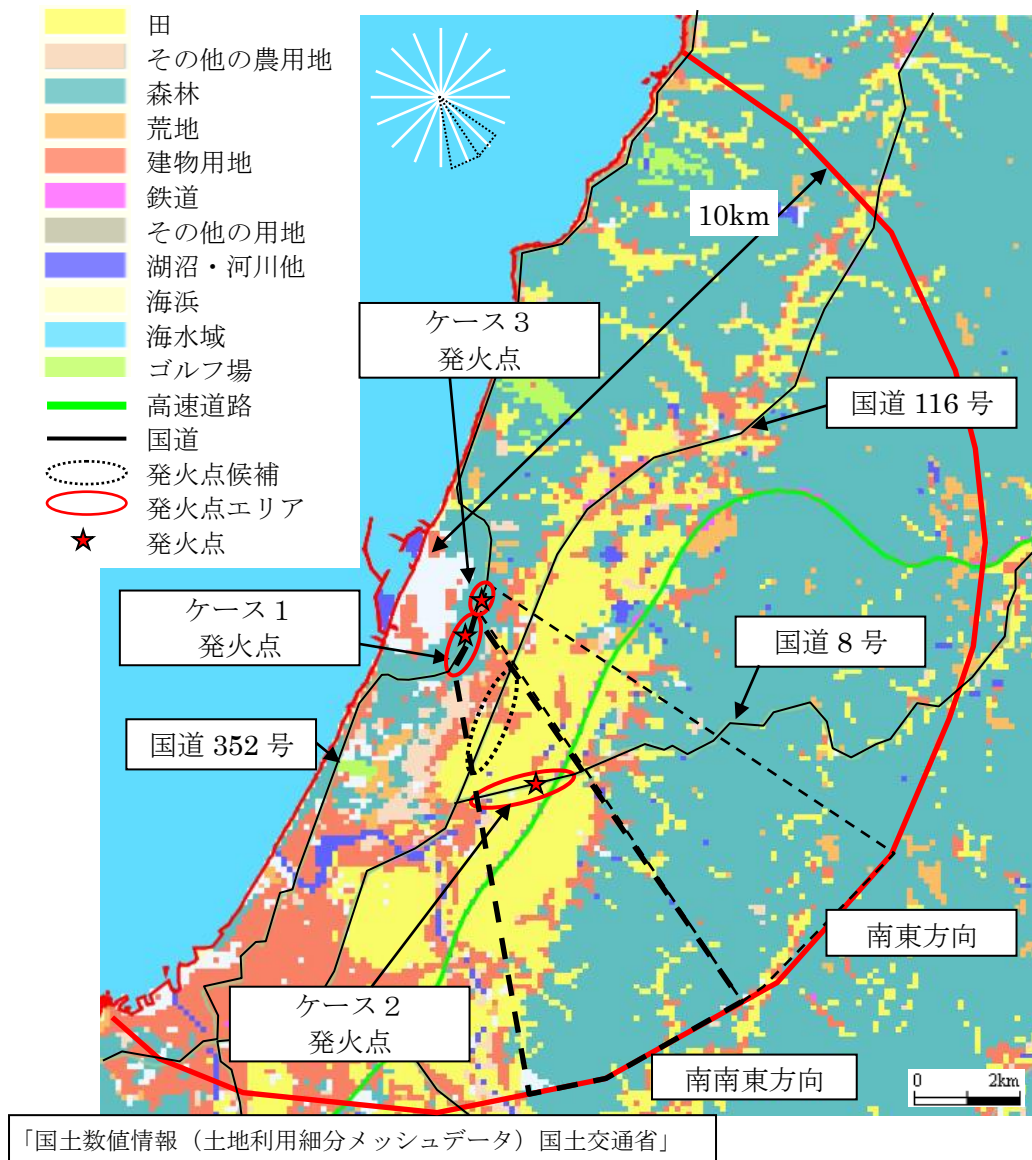
発電所遠方からの発火の方が火災の規模が大きくなる（火災前線が広がり，発電所構内を同時期に取り囲むような火災となる）ことから，火入れ・

たき火などによる火災も考慮し、家屋・田畑がある南南東方向で発電所遠方の国道8号線沿いに発火点を選定する。（防火帯から約3km）

（ケース3）

卓越風向として南東方向からの風も一部存在すること、および防火帯までの距離が南南東方向より短くなることから、参考のため防火帯までの距離が短くなる南東方向の国道352号線沿いに発火点を選定する。（防火帯から約0.4km）

- ・評価対象範囲は、西側が海岸という発電所周辺の地形を考慮し、発電所から東12km、西9km、南12km、北15kmとした。



第2.1.2-1図 発火点位置

## 2.1.3 評価結果

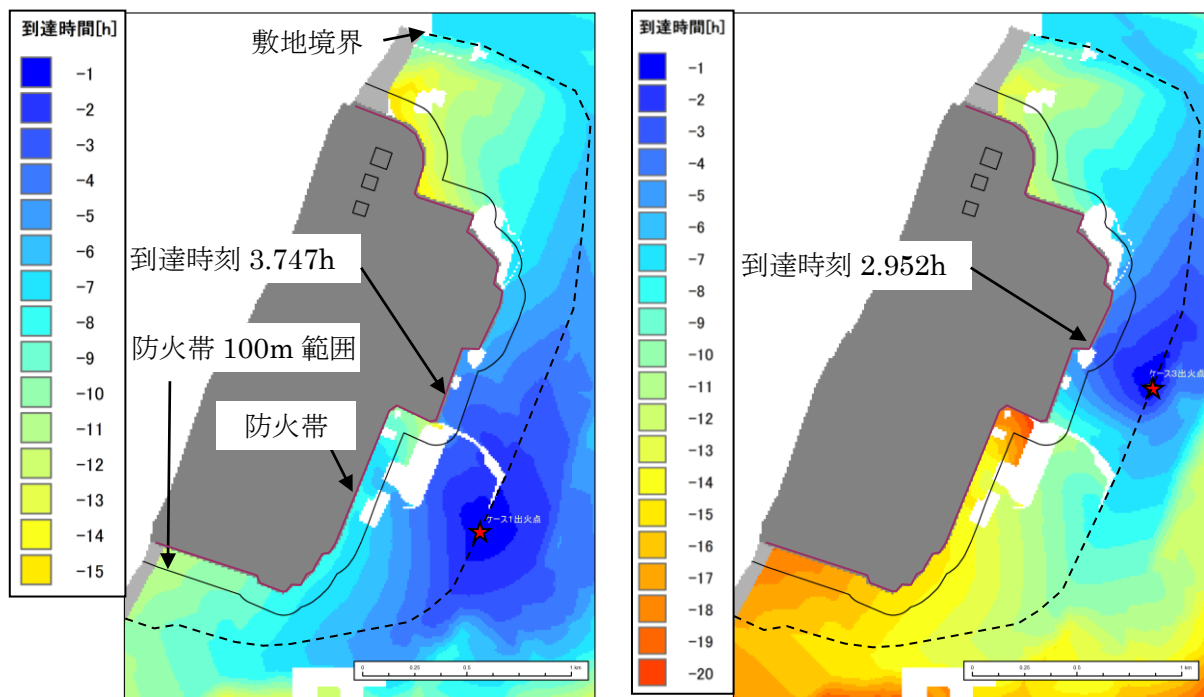
### 2.1.3.1 火炎の到達時間の評価

#### (1) 火炎到達時間

想定される森林火災による防火帯境界までの火炎到達時間は、到達時間が短いケース3で約3時間程度であることを確認した。

第2.1.3.1-1表 火炎到達時間

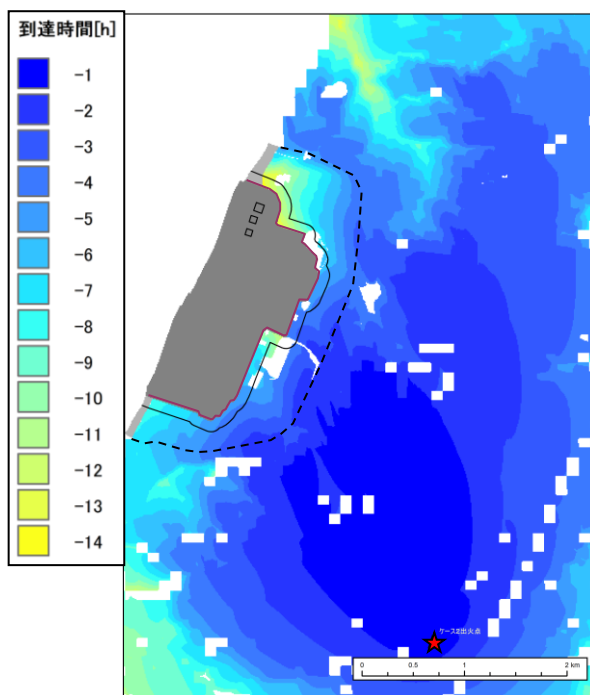
評価項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
火炎の到達時間[hour]	3.747	3.503	2.952



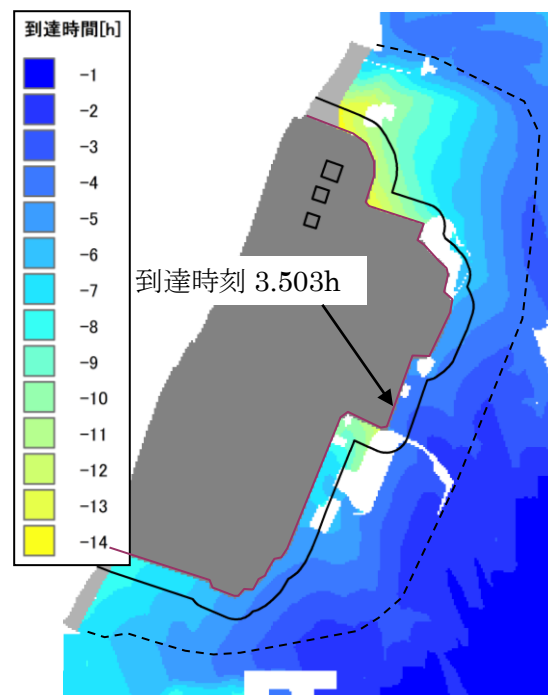
(ケース 1)

(ケース 3)

第 2.1.3.1-1(a)図 火炎到達時刻分布



(ケース 2)



(ケース 2) 拡大図

第 2. 1. 3. 1-1 (b) 図 火炎到達時刻分布

(2) 予防散水活動及び体制

発電所の自衛消防隊の初期消火班員（10人以上）が24時間常駐しており，早期に予防散水体制を確立することができることから，防火帯付近での予防散水は可能である。

また，自衛消防隊による予防散水は，外部電源の喪失時においても，ディーゼル駆動消火ポンプが運転可能であることから，屋外消火栓及び消防車を用いて予防散水が可能である。

なお，防火帯の外側に設置されているモニタリングポスト及び気象観測装置（クラス3）については，可搬型モニタリングポスト及び可搬型気象観測装置による代替測定を実施する。

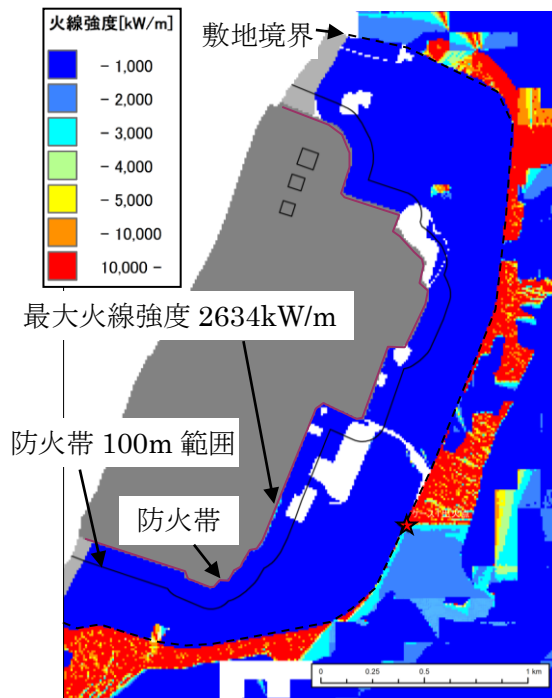
2. 1. 3. 2 防火帯幅の評価

(1) 最大火線強度

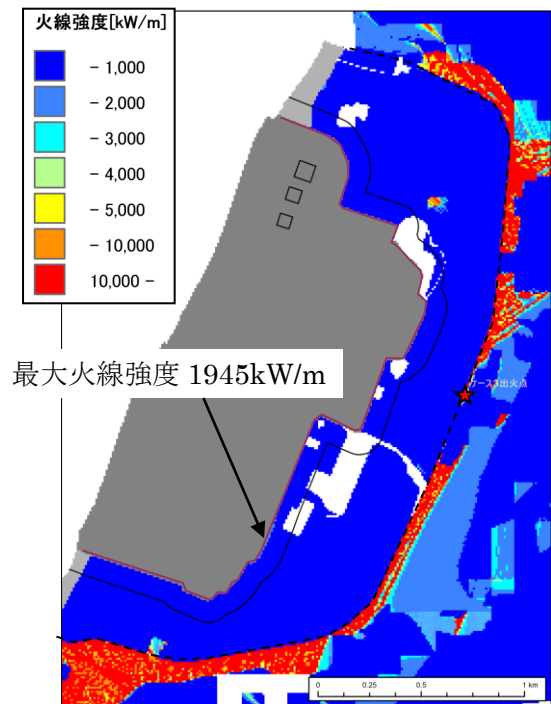
想定される森林火災による防火帯周辺100m範囲での最大火線強度は，火線強度が大きいケース2で約3000kW/m程度であることを確認した。

第2. 1. 3. 2-1表 最大火線強度

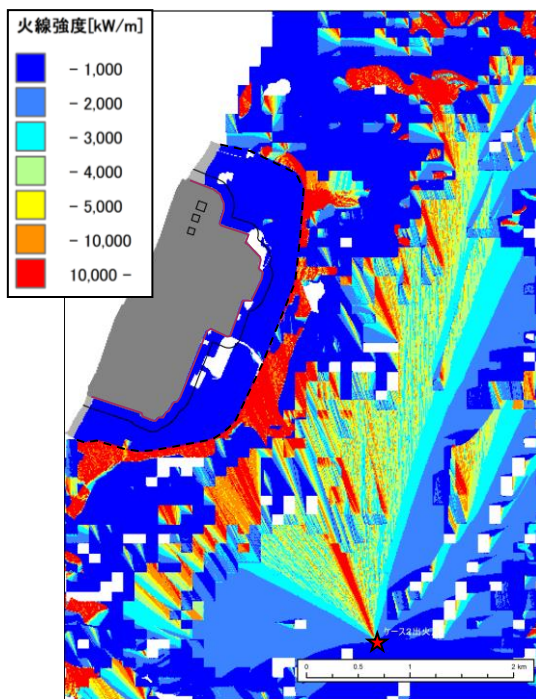
評価項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
最大火線強度[kW/m]	2634	2948	1945



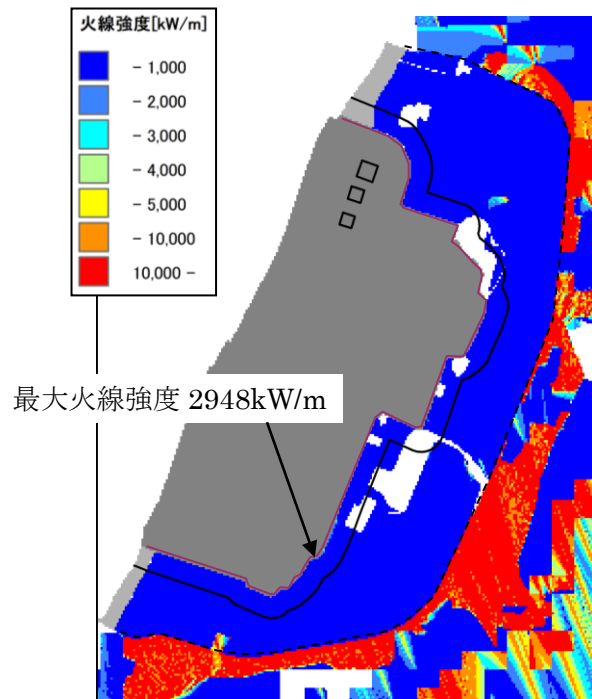
(ケース 1)



(ケース 3)



(ケース 2)



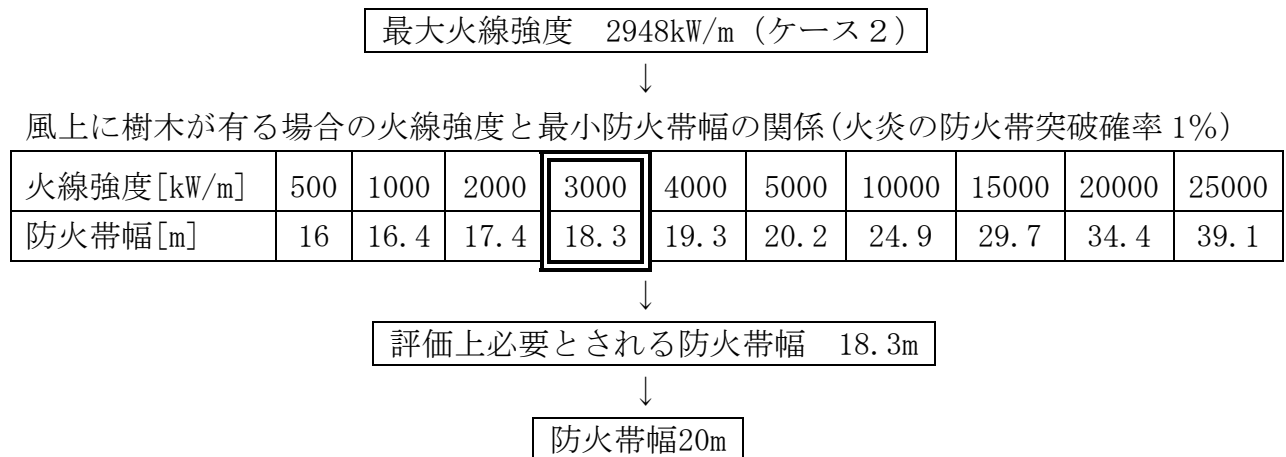
(ケース 2) 拡大図

第 2.1.3.2-1 図 火線強度分布

(2) 防火帯幅

外部火災影響評価ガイドに基づき、防火帯周辺の最大火線強度（2948kW/m）から「Alexander and Fogartyの手法（風上に樹木がある場合）」を用いて、必要な防火帯幅を算出した結果、森林部と防護対象施設間に必要な防火帯幅は18.3mとな

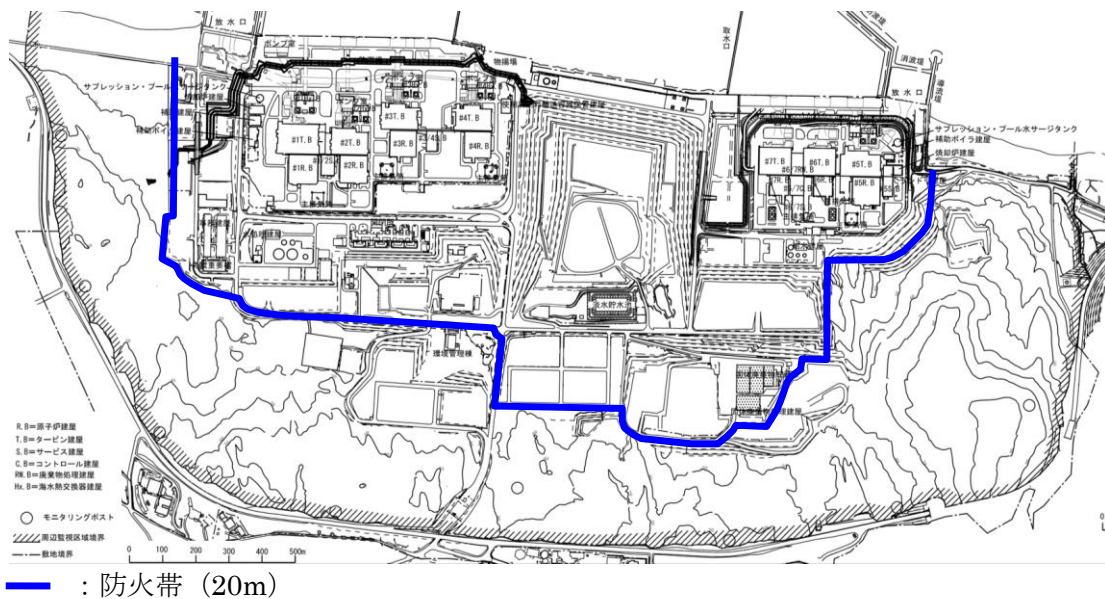
った。これに対して、森林火災の延焼を防止するために、森林伐採を実施し、20mの防火帯幅を確保し、延焼による防護対象施設への影響がないことを確認した。



第 2. 1. 3. 2-2 図 防火帯幅の設定

### (3) 防火帯設定の考え方

- 森林火災評価結果に基づき、森林火災による防護対象施設への延焼防止対策として、防火帯（幅20m）を設定する。
- 防火帯は、防護対象施設および重大事故等対処設備を原則防護するように設定する。（第2. 1. 3. 2-3図）
- 防火帯は、発電所設備及び駐車場の配置状況を考慮し、干渉しないように設定する。
- 防火帯の設定にあたっては、草木を伐採する等、可燃物を排除する。その後、除草剤の散布やモルタル吹付け等を行い、草木の育成を抑制し、可燃物が無い状態を維持する。



第2.1.3.2-3図 防火帯位置

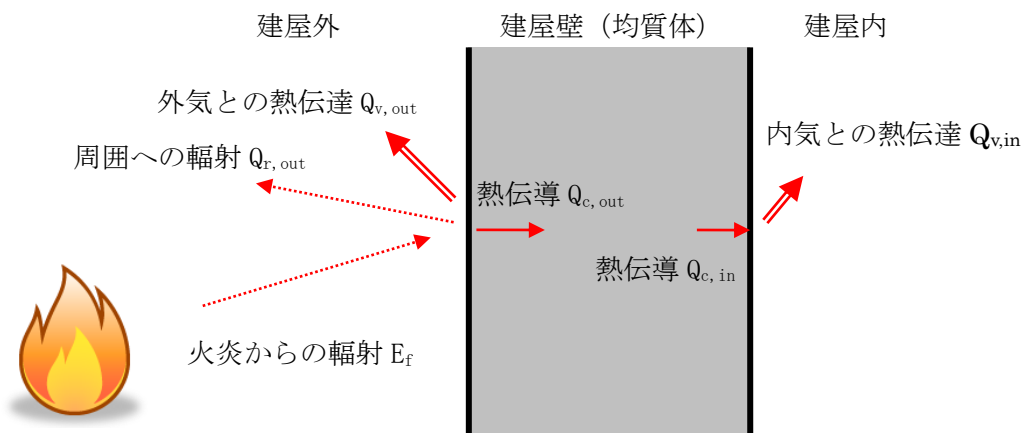
### 2.1.3.3 発電用原子炉施設の熱影響評価

#### (1) 発電用原子炉施設外壁

森林火災シミュレーション解析コード (FARSITE) の出力より得られた火炎長や到達時間等より、発電用原子炉施設外壁のコンクリート表面温度を評価した。熱影響評価の結果、原子炉建屋外壁のコンクリート表面温度は、最大でも約55℃であり、許容温度200℃ (火災時における短期温度上昇を考慮した場合において、コンクリート圧縮強度が維持される保守的な温度) 以下であることを確認した。

第2.1.3.3-1表 発電用原子炉施設外壁のコンクリート表面温度

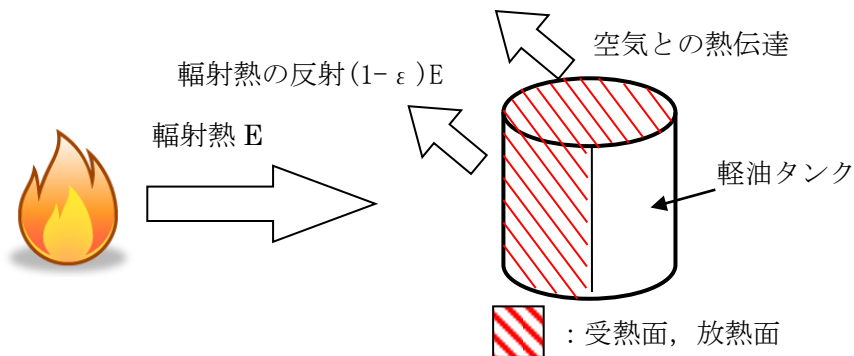
号炉	ケース1		ケース2		ケース3	
	6号炉	7号炉	6号炉	7号炉	6号炉	7号炉
温度[℃]	52.6	52.3	54.3	54.1	52.0	51.7
許容温度[℃]	200					



第2.1.3.3-1図 発電用原子炉施設外壁の熱影響評価（概念図）

(2) 軽油タンク

森林火災シミュレーション解析コード (FARSITE) の出力より得られた火炎長や到達時間等より，コンクリートの熱影響評価の結果最も温度上昇の大きいケース2について軽油タンクの温度を評価した。熱影響評価の結果，軽油タンクおよび軽油の温度は，最大でも約40℃であり，許容温度225℃（軽油の発火点温度）以下であることを確認した。

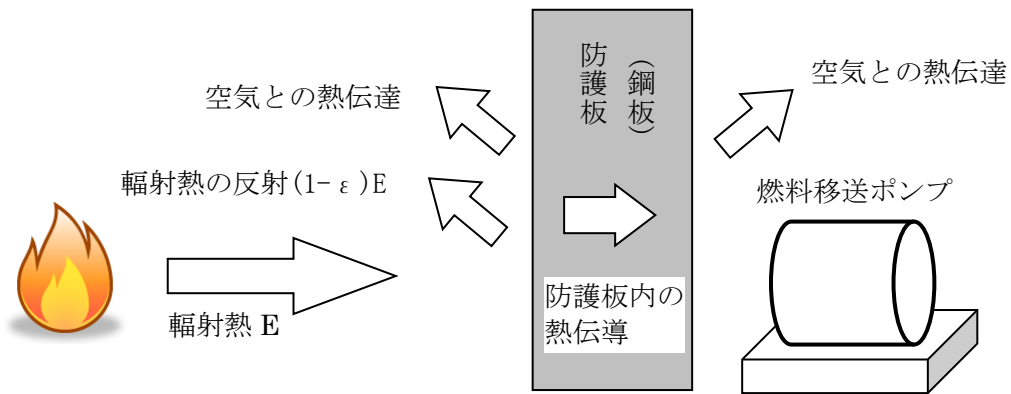


第2.1.3.3-2図 軽油タンクの熱影響評価（概念図）

(3) 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））

森林火災シミュレーション解析コード (FARSITE) の出力より得られた火炎長や到達時間等より，コンクリートの熱影響評価の結果最も温度上昇の大きいケース2について燃料移送ポンプの温度を評価した。熱影響評価の結果，防護板（鋼板）の温度は，最大でも約72℃（燃料移送ポンプの許容温度である端子ボックスパッキンの耐熱温度100℃以下）であることから，防護板（鋼板）の内側に設置されている燃料移送ポンプに対して熱影響はない。



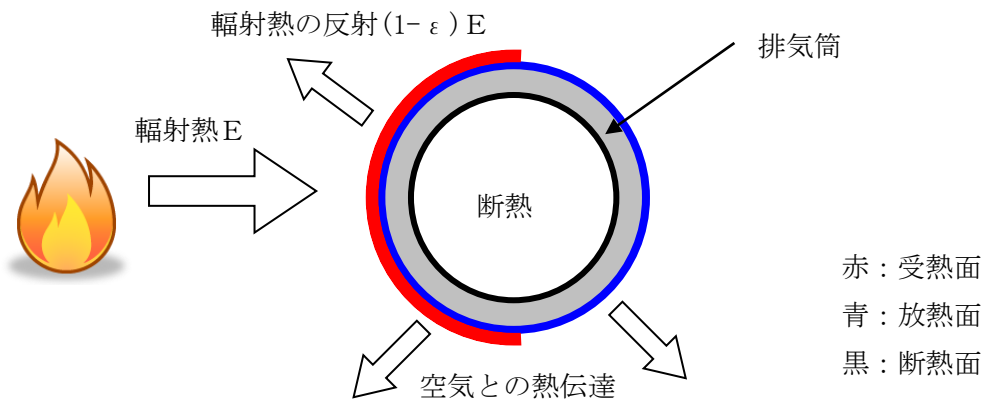


第2.1.3.3-3図 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の熱影響評価（概念図）

(4) 排気筒

森林火災シミュレーション解析コード (FARSITE) の出力より得られた火炎長や到達時間等より、コンクリートの熱影響評価の結果最も温度上昇の大きいケース2について排気筒の温度を評価した。熱影響評価の結果、排気筒の温度は、最大でも約80℃であり、許容温度325℃（「建築火災のメカニズムと火災安全設計，日本建築センター」鋼材の制限温度）以下であることを確認した。

なお、排気筒は、筒身と支持構造物で構成されており、材料の物性値が同一（軟鋼）であることから、防火帯外縁との距離が近い支持構造物の熱影響評価を実施することで筒身の熱影響評価は包絡される。



第2.1.3.3-4図 排気筒の熱影響評価（概念図）

#### 2.1.3.4 危険距離の評価

##### (1) 発電用原子炉施設外壁

想定される森林火災に対して、建屋外壁のコンクリート表面温度が許容温度200℃を超えない危険距離を算出して評価した。

危険距離評価の結果、発電用原子炉施設外壁における危険距離が一番厳しいケース2の場合でも約20mであり、防火帯外縁から発電用原子炉施設外壁までの離隔距離（約202m）が危険距離以上であることを確認した。

第2.1.3.4-1表 危険距離の評価結果

	ケース1	ケース2	ケース3
危険距離[m]	17.9	19.9	13.4
離隔距離[m]	202		

##### (2) 軽油タンク

想定される森林火災に対して、軽油タンクの温度が許容温度225℃を超えない危険距離を算出して評価した。

危険距離評価の結果、軽油タンクにおける危険距離が一番厳しいケース2の場合でも約2mであり、防火帯外縁から軽油タンクまでの離隔距離（約135m）が危険距離以上であることを確認した。

##### (3) 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））

想定される森林火災に対して、燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度が許容温度100℃を超えない危険距離を算出して評価した。

危険距離評価の結果、燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））における危険距離が一番厳しいケース2の場合でも約89mであり、防火帯外縁から燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））までの離隔距離（約233m）が危険距離以上であることを確認した。

##### (4) 排気筒

想定される森林火災に対して、排気筒の温度が許容温度325℃を超えない危険距離を算出して評価した。

危険距離評価の結果、排気筒における危険距離が一番厳しいケース2の場合でも約27mであり、防火帯外縁から排気筒までの離隔距離（約246m）が危険距離以上であることを確認した。

## 2.2 近隣の産業施設の火災・爆発（添付資料－3，4，5，6）

### 2.2.1 評価内容

発電所敷地外10km内に設置されている石油コンビナート，危険物施設，燃料輸送車両及び漂流船舶の火災やガス爆発が発電所に隣接する地域で起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価した。

また，発電所敷地内における危険物タンクの火災が，発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価した。

### 2.2.2 評価結果

#### 2.2.2.1 石油コンビナート等の影響評価

石油コンビナート等災害防止法で規制される新潟県内の特別防災区域は「直江津地区」「新潟西港地区」「新潟東港地区」の三カ所存在するが，これらは，それぞれ発電所から約39km，約72km及び約84kmであり，いずれも発電所から10km以遠である（第2.2.2.1-1図）。また，コンビナート等保安規則で規制される特定製造事業所が評価対象範囲に存在しないことを新潟県防災局に確認した。以上より，評価対象範囲内に石油コンビナート等は存在せず，発電用原子炉施設に影響を及ぼすことはない。

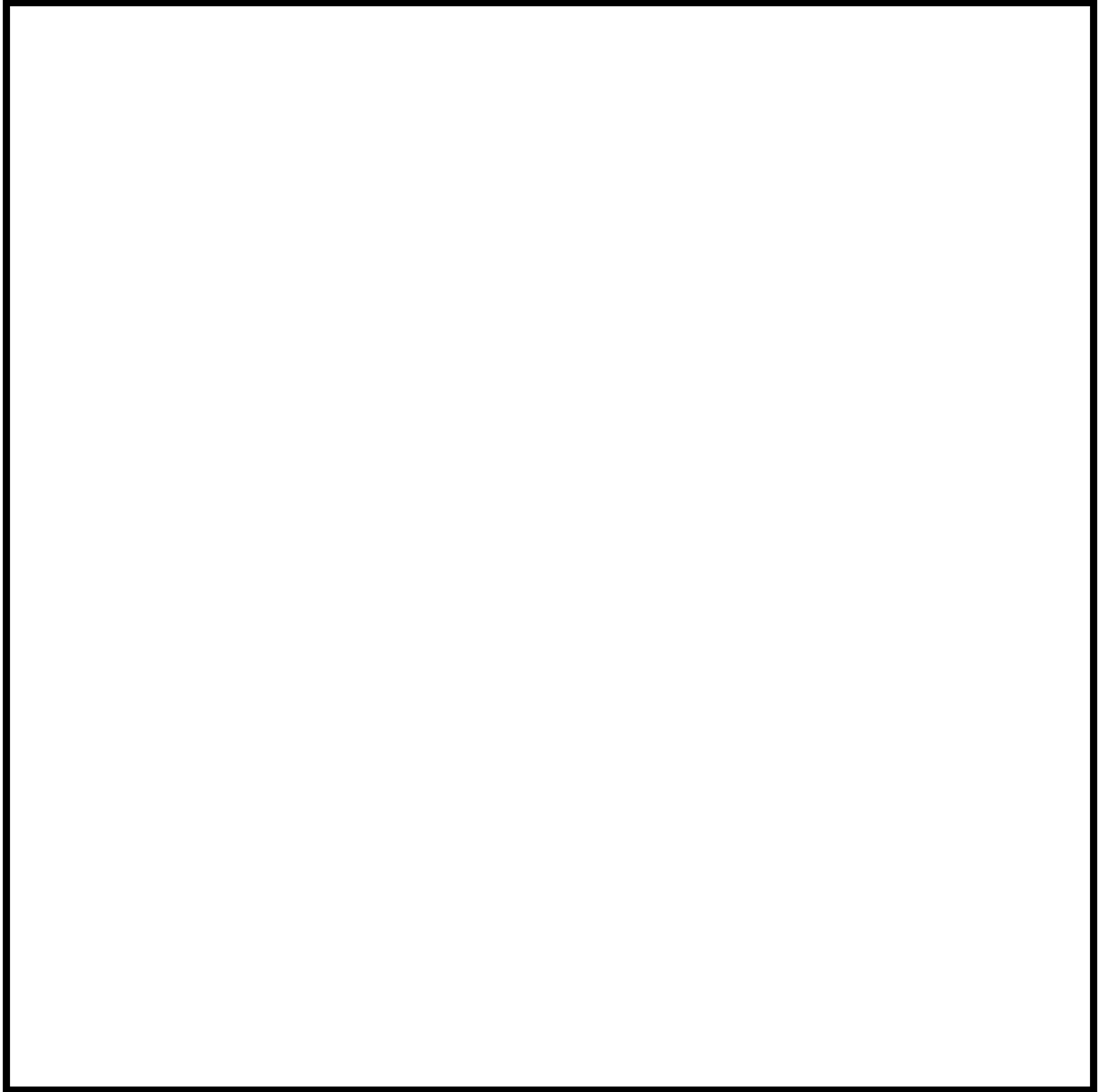


第2.2.2.1-1 図 新潟県内の石油コンビナート等特別防災区域の位置と発電所までの距離

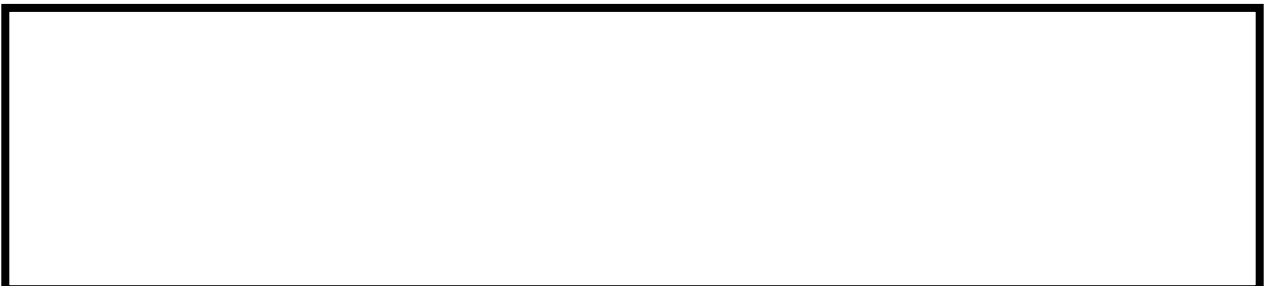
## 2.2.2.2 敷地外危険物施設等の影響評価

### (1) 敷地外危険物施設の影響評価

発電所敷地外の半径10kmの消防法および高圧ガス保安法に基づき設置している施設を抽出し、最短距離の危険物施設（危険物貯蔵施設、高圧ガス貯蔵施設、ガスパイプライン）に最大貯蔵量が有ったと仮定し、影響評価を実施した。



第 2.2.2.2-1 図 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設



a. 火災の影響評価

発電所敷地外で燃料保有量が最も多い施設において評価を行ったところ、評価上必要とされる危険距離に対し、最短距離の危険物貯蔵施設から発電用原子炉施設までの離隔距離が危険距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-1表 危険物貯蔵施設における危険距離の評価結果

事業所名	種類	貯蔵量	危険距離	離隔距離
	原油		建屋：約56m 軽油タンク：約20m	約2.3km
	メチルアルコール		燃料移送ポンプ：約134m 排気筒：約36m	

b. ガス爆発の影響評価

発電所敷地外で高圧ガス貯蔵量が最も多い施設において評価を行ったところ、評価上必要とされる危険限界距離に対し、最短距離の高圧ガス貯蔵施設から発電用原子炉施設までの離隔距離が危険限界距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-2表 高圧ガス貯蔵施設における危険限界距離の評価結果

事業所名	種類	貯蔵量	危険限界距離	離隔距離
	プロパン			約5km

c. 二次的影響（飛来物）の影響

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」（平成25年3月 消防庁特殊災害室）に基づき、高圧ガス貯蔵施設における飛来物飛散距離を確認する。

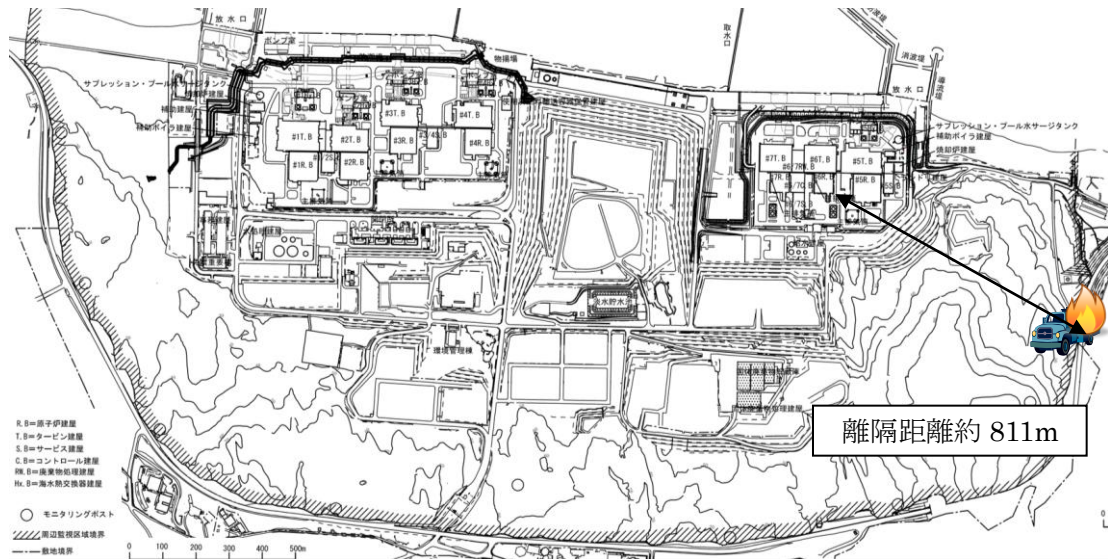
発電所敷地外で高圧ガス貯蔵量が最も多い施設において最も大きな貯蔵タンクの破損による飛散範囲の評価を行ったところ、最短距離の高圧ガス貯蔵施設から発電用原子炉施設までの離隔距離が飛来物飛散距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-3表 高圧ガス貯蔵施設における飛散距離の評価結果

事業所名	種類	貯蔵量	飛散距離	離隔距離
	プロパン			約5km

(2) 燃料輸送車両の影響評価

発電所敷地外10km圏内の施設において液化石油ガス輸送車両が許可申請されていることから、最大規模の液化石油ガス輸送車両が発電所敷地周辺道路で火災・爆発を起こした場合を想定した。燃料積載量は液化石油ガス輸送車両の中で最大クラスのもの（16トン）とした。火災・爆発の発生場所は、発電所敷地外の道路において、発電用原子炉施設に最も近い場所を想定した。



第 2.2.2.2-2 図 燃料輸送車両の離隔距離

a. 火災の影響評価

最大規模の燃料輸送車両において評価を行ったところ、評価上必要とされる危険距離に対し、発電所敷地境界から発電用原子炉施設までの離隔距離が危険距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-4表 燃料輸送車両における危険距離の評価結果

種類	貯蔵量	危険距離	離隔距離
プロパン	16 トン	建屋：約13m 軽油タンク：約4m 燃料移送ポンプ：約26m 排気筒：約12m	約811m

b. ガス爆発の影響評価

最大規模の燃料輸送車両において評価を行ったところ、評価上必要とされる危険限界距離に対し、発電所敷地境界から発電用原子炉施設までの離隔距離が危険限界距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-5表 燃料輸送車両における危険限界距離の評価結果

種類	貯蔵量	危険限界距離	離隔距離
プロパン	16 トン	約88m	約811m

c. 二次的影響（飛来物）の影響

燃料輸送車両からの飛来物を想定した上での評価を実施したところ、離隔距離（約811m）が最大飛散距離（約550m）を上回る結果となった。したがって、発電所周辺道路で燃料輸送車両が事故等により爆発し、なおかつその飛来物が発電用原子炉施設に衝突することはなく、影響はない。

(3) 漂流船舶の影響評価

漂流船舶は新潟県内で輸送実績が多く、柏崎刈羽原子力発電所前面の海域に航路がある液化石油ガス輸送船舶のうち、港湾内に入港可能な大きさで実際に存在する最大の船舶（積載量1021トン）を想定した。発電所港湾内において港湾内に進入できる最大規模の船舶が火災・爆発をした場合を想定し影響評価を実施した。火災・爆発の発生場所は、発電所港湾内において、発電用原子炉施設に最も近い場所を想定した。



第 2.2.2.2-3 図 漂流船舶の離隔距離

a. 火災の影響評価

港湾内に進入できる最大規模の漂流船舶において評価を行ったところ、評価上必要とされる危険距離に対し、港湾から発電用原子炉施設までの離隔距離が危険距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-6表 漂流船舶における危険距離の評価結果

種類	貯蔵量	危険距離	離隔距離
プロパン	1021 トン	建屋：約66m 軽油タンク：約17m 燃料移送ポンプ：約148m 排気筒：約53m	約273m

b. ガス爆発の影響評価

港湾内に進入できる最大規模の漂流船舶において評価を行ったところ、評価上必要とされる危険限界距離に対し、港湾から発電用原子炉施設までの離隔距離が危険限界距離以上あることを確認した。

第2.2.2.2-7表 漂流船舶における危険限界距離の評価結果

種類	貯蔵量	危険限界距離	離隔距離
プロパン	1021 トン	約176m	約273m

c. 二次的影響（飛来物）の影響

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」（平成25年3月 消防庁特殊災害室）に基づき、港湾内に進入できる最大規模の漂流船舶における飛来物飛散距離を確認したところ、離隔距離（約273m）が最大飛散距離（約1,855m）以下であるが、発電所遠方で漂流した船舶が飛散距離である1,855m以内に流れ着いた後に爆発し、なおかつその飛来物が発電用原子炉施設に衝突する可能性は非常に低いことから、想定した漂流船舶の飛来物の発電所への影響はない。

2.2.2.3 敷地内危険物タンク等の影響評価

(1) 軽油タンクの火災影響評価

発電所敷地内に位置している屋外の危険物タンクの火災を想定し、建屋外壁の熱影響評価等を実施した。

熱影響評価を実施する危険物施設は、各号炉の軽油タンクとした。なお、敷地内の危険物施設のうち、直接輻射熱を受けない建屋内に設置している設備および地下貯蔵タンクなどについては評価対象外とした。





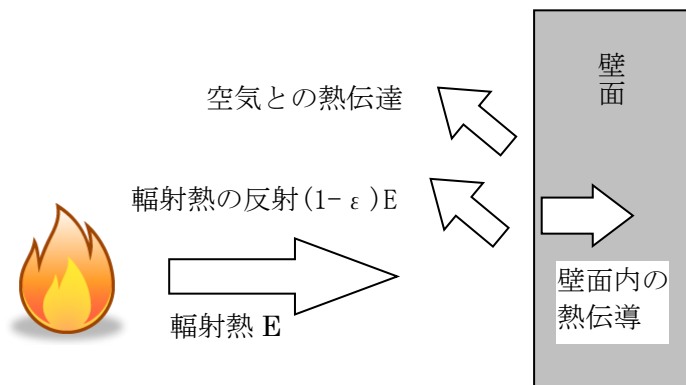
第2.2.2.3-1図 危険物タンクおよび危険物保存庫の位置

a. 建屋外壁の熱影響評価

各号炉の軽油タンクについて、火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で原子炉建屋外壁が昇温されるものとして、コンクリートの表面の温度上昇を評価した結果、建屋外壁の表面の温度は約119℃となり、許容温度200℃（火災時における短期温度上昇を考慮した場合において、コンクリート圧縮強度が維持される保守的な温度）を下回ることを確認した。

第2.2.2.3-1表 原子炉建屋外壁の温度評価結果

想定火災	燃料量	建屋までの距離	評価結果 (建屋外壁表面温度)
軽油タンク	565kl	46.8m	119℃

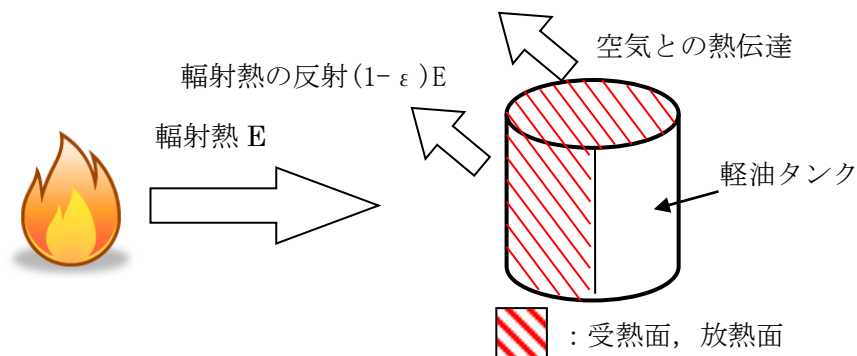


第2.2.2.3-2図 建屋温度評価体系図

b. 屋外の評価対象施設への熱影響評価

(a) 軽油タンク

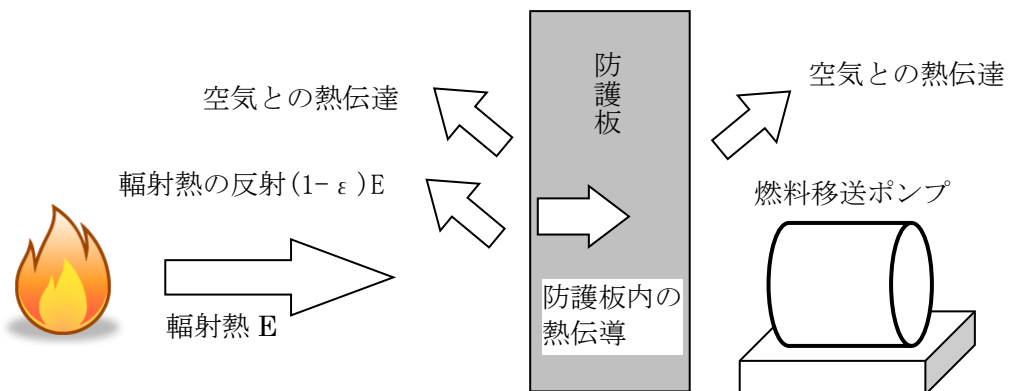
隣接軽油タンクについて温度上昇を評価した結果、軽油の温度は約179℃となり、軽油の発火点225℃を下回ることを確認した。



第2.2.2.3-3図 軽油タンク温度評価体系図

(b) 燃料移送ポンプ

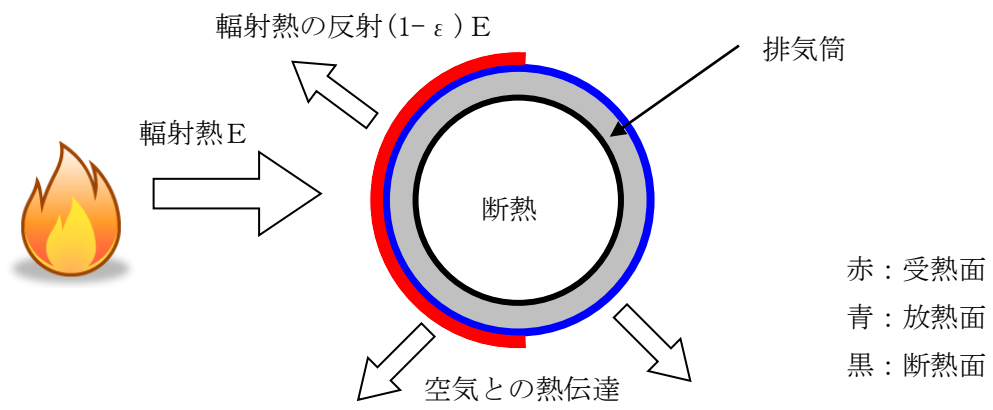
燃料移送ポンプ（エリア）について温度上昇を評価した結果、燃料移送ポンプ（エリア）の温度は約41℃となり、燃料移送ポンプ端子ボックスパッキンの耐熱温度100℃を下回ることを確認した。



第2.2.2.3-4図 燃料移送ポンプ温度評価体系図

(c) 排気筒

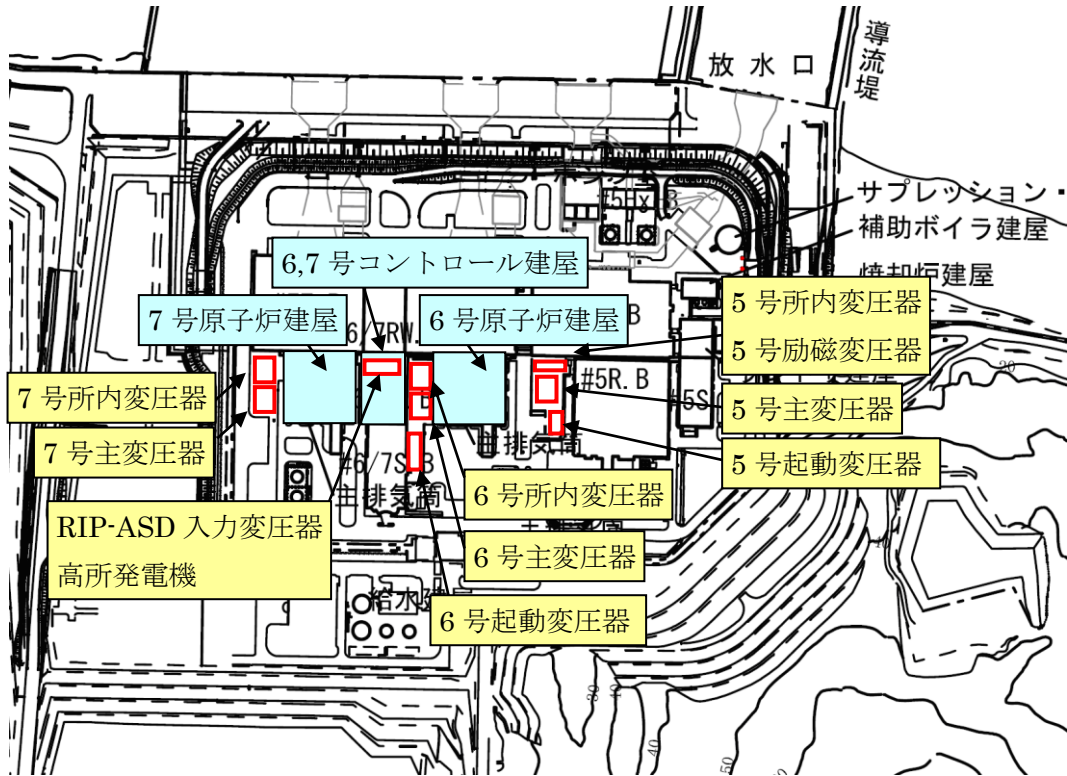
排気筒について温度上昇を評価した結果、排気筒の温度は約83℃となり、排気筒鋼材の許容温度325℃を下回ることを確認した。



第2.2.2.3-5図 排気筒温度評価体系図

(2) 変圧器の火災影響評価

発電所敷地内の変圧器の火災を想定し、建屋外壁の熱影響評価等を実施した。熱影響評価を実施する変圧器は、各号炉の主変圧器とした。



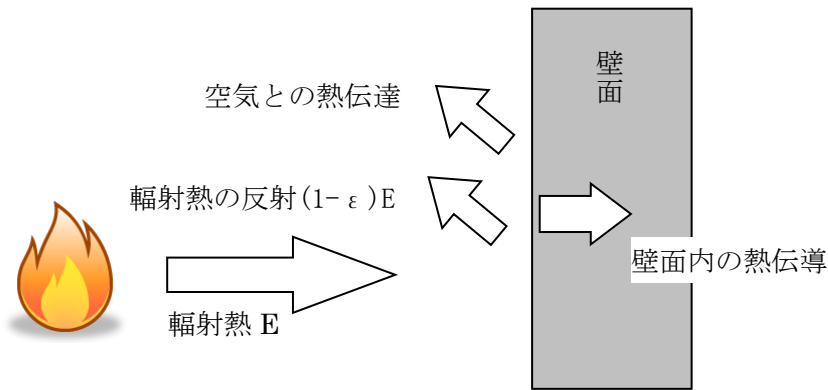
第2.2.2.3-6図 変圧器の位置

a. 建屋外壁の熱影響評価

各号炉の主変圧器について、火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度でコントロール建屋外壁が昇温されるものとして、コンクリートの表面の温度上昇を評価した結果、建屋外壁の表面の温度は約184℃となり、許容温度200℃（火災時における短期温度上昇を考慮した場合において、コンクリート圧縮強度が維持される保守的な温度）を下回ることを確認した。

第2.2.2.3-2表 原子炉建屋外壁の温度評価結果

想定火災	燃料量	建屋までの距離	評価結果 (建屋外壁表面温度)
主変圧器	200k1	13m	184℃

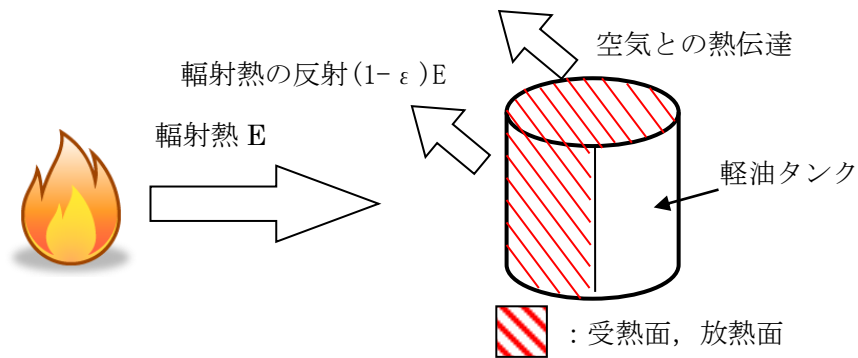


第2.2.2.3-7図 建屋温度評価体系図

b. 屋外の評価対象施設への熱影響評価

(a) 軽油タンク

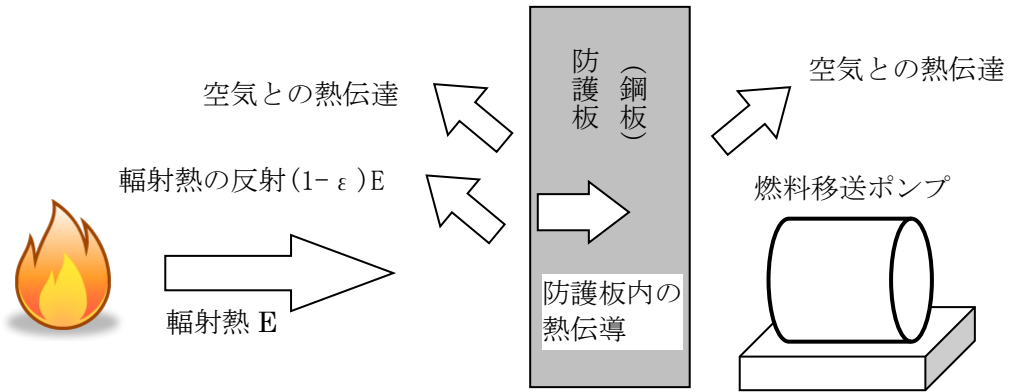
軽油タンクについて温度上昇を評価した結果、軽油の温度は約 $42^{\circ}\text{C}$ となり、軽油の発火点 $225^{\circ}\text{C}$ を下回ることを確認した。



第2.2.2.3-8図 軽油タンク温度評価体系図

(b) 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））

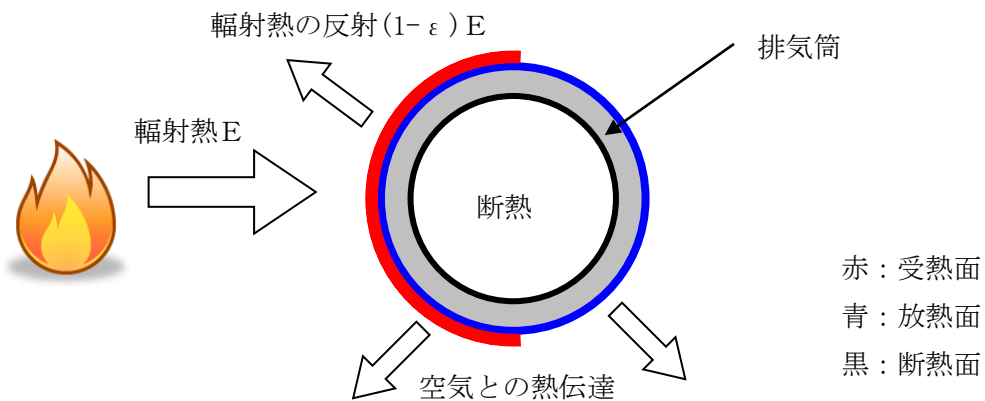
燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））について温度上昇を評価した結果，燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度は約71℃となり，燃料移送ポンプ端子ボックスパッキンの耐熱温度100℃以下であることから，防護板（鋼板）の内側に設置されている燃料移送ポンプに対して熱影響はない。



第2.2.2.3-9図 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））温度評価体系図

(c) 排気筒

排気筒について温度上昇を評価した結果，排気筒の温度は約132℃となり，排気筒鋼材の許容温度325℃を下回ることを確認した。

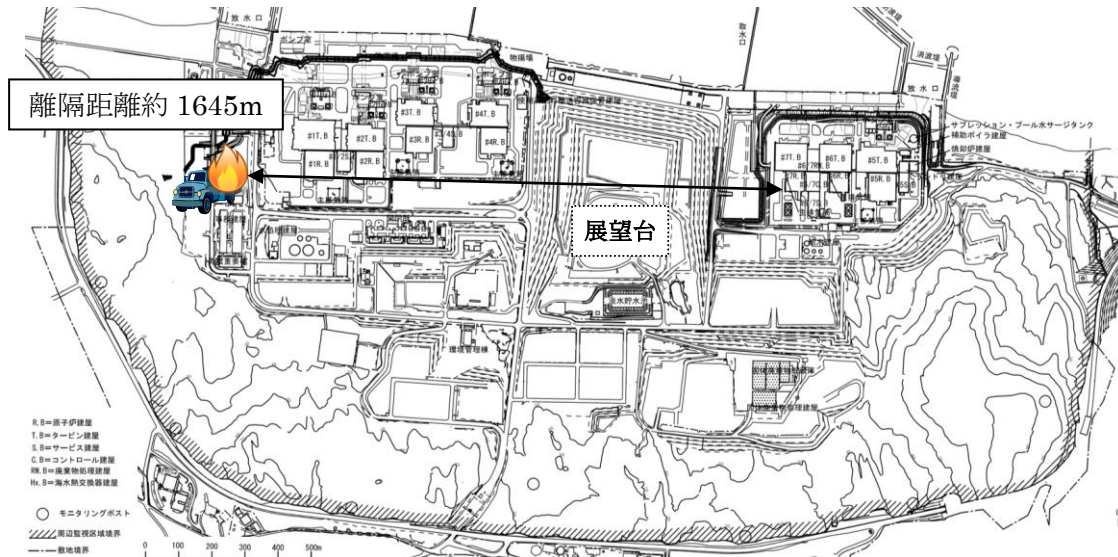


第2.2.2.3-10図 排気筒温度評価体系図

### (3) 水素トレーラーの火災影響評価

1号炉へ水素を供給する水素トレーラーは、1号炉の運転中以外であれば、発電所敷地内に配備されることはないが、発電所敷地内の水素トレーラーの火災を想定し、発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価した。

水素トレーラーの火災では、展望台等により、6、7号炉の発電用原子炉施設は輻射熱を受けないことから爆発による影響評価のみとした。



第2.2.2.3-11図 水素トレーラーの離隔距離

ガス爆発による影響を評価した結果、評価上必要とされる危険限界距離に対し、水素トレーラーから発電用原子炉施設までの離隔距離が危険限界距離以上あることを確認した。

なお、水素トレーラーから最も近い位置にある緊急時対策所についても、離隔距離が約404mあることから爆風圧による影響はない。

第2.2.2.3-3表 水素トレーラーにおける危険限界距離の評価結果

種類	積載量	危険限界距離	離隔距離
水素	13987m <sup>3</sup>	約85m	約1645m

## 2.3 航空機墜落による火災(添付資料-7)

### 2.3.1 評価内容

発電所敷地への航空機の墜落で発生する火災に対して、より一層の安全性向上の観点から、その火災が発電所の敷地内で起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを確認した。

### 2.3.2 評価結果

#### 2.3.2.1 評価方法

航空機墜落確率評価では、評価手法及び対象航空機の大きさの違いを考慮して落下確率を求めている。対象航空機の燃料積載量に火災の影響は大きく依存することから、大型航空機と小型航空機に分類し、また、民間航空機と自衛隊航空機又は米軍航空機(以下、軍用航空機とする)に分類し以下のカテゴリ毎に火災影響を評価する。

- ・大型民間航空機
- ・小型民間航空機
- ・大型軍用航空機
- ・小型軍用航空機

航空機の落下確率が $10^{-7}$ [回/炉・年]に相当する面積より、航空機落下確率評価で標的面積として考慮している発電用原子炉施設からの離隔距離(墜落地点)を求め、そこで発生する火災による発電用原子炉施設の表面温度を評価し、許容温度を超えないことを確認する。

#### 2.3.2.2 離隔距離の算出

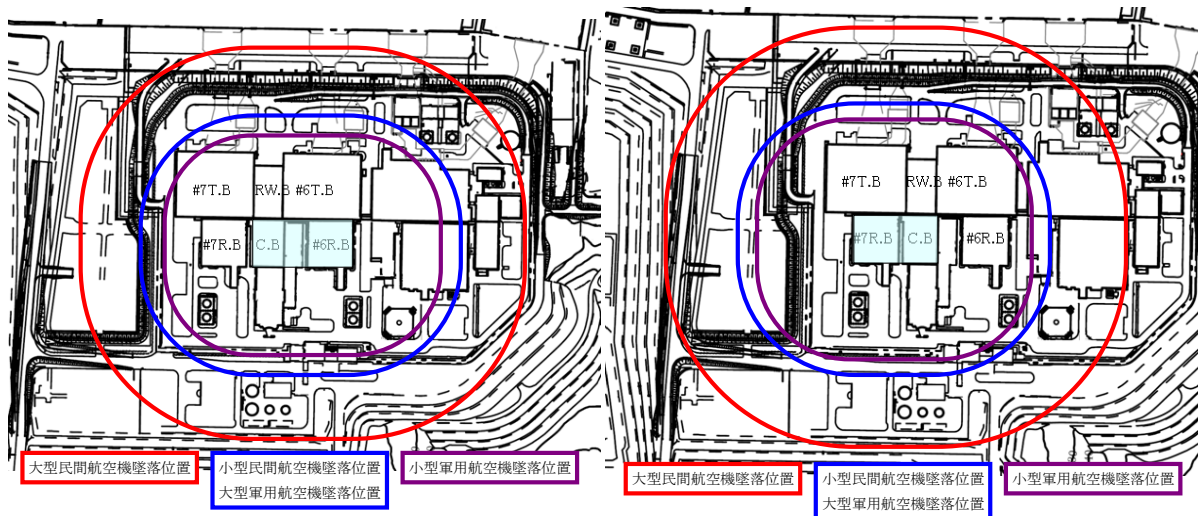
防護対象となる発電用原子炉施設(原子炉建屋及びコントロール建屋)を考慮し、落下確率 $10^{-7}$ [回/炉・年]に相当する面積より、カテゴリ毎の離隔距離を算出した。

第2.3.2.2-1表 航空機カテゴリ別の離隔距離

カテゴリ	対象航空機	離隔距離[m]	輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]
大型民間航空機	B747-400	218	50	351.48
小型民間航空機	Do228-200	134	50	—※
大型軍用航空機	KC-767	133	58	500.96
小型軍用航空機	AH-1S	109	58	34.79

※：小型民間航空機は大型軍用航空機と比べ輻射発散度が小さく、燃料タンク面積も小さく、離隔距離も離れていることから大型軍用航空機の評価に包絡される。



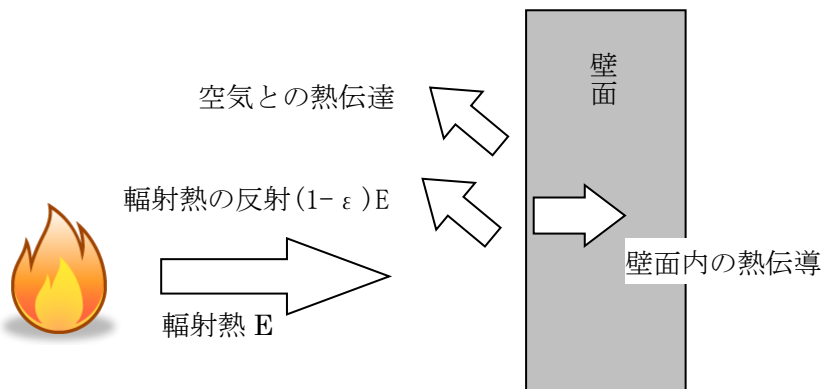


第2.3.2.2-1図 各航空機の墜落位置（左：6号炉，右：7号炉）

### 2.3.2.3 火災影響評価結果

#### (1) 建屋外壁面温度評価

航空機落下により発電所の敷地内で火災が発生した場合を想定したとしても、発電用原子炉施設外壁の温度が許容温度200℃（火災時における短期温度上昇を考慮した場合において、コンクリート圧縮強度が維持される保守的な温度）を超えないことを確認した。



第2.3.2.3-1図 建屋温度評価体系図

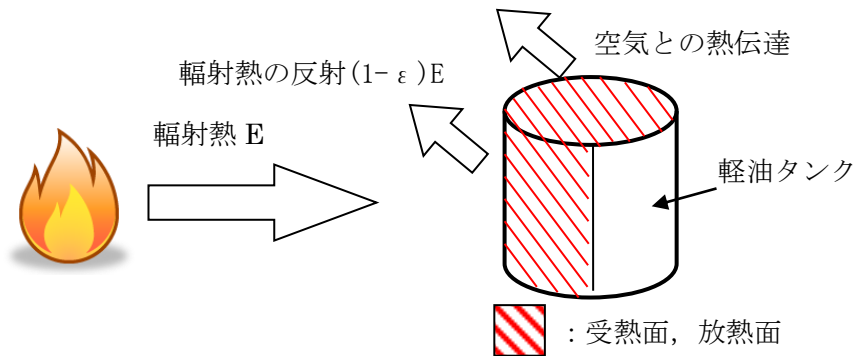
第2.3.2.3-1表 航空機墜落火災時の原子建屋外壁温度評価結果

カテゴリ	燃料タンク 投影面積[m <sup>2</sup> ]	輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	燃料継続時 間[h]	評価温度 [℃]	許容温度 [℃]
大型民間航空機	606	351.48	1.49	57	200
小型民間航空機	大型軍用航空機の評価に包絡される				
大型軍用航空機	281	500.96	2.14	60	200
小型軍用航空機	12	34.79	0.33	51	200

(2) 屋外の評価対象施設への熱影響評価

(a) 軽油タンク

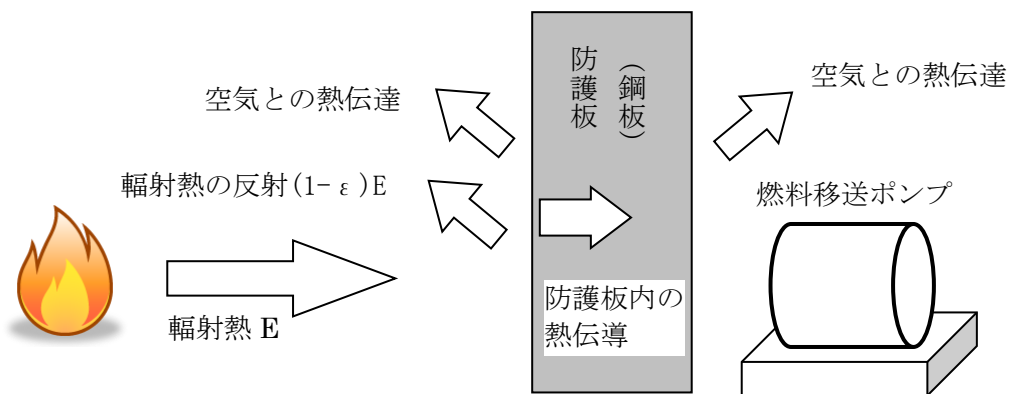
軽油タンクについて温度上昇を評価した結果、外壁面の温度評価で最も厳しい大型軍用航空機の場合において、軽油の発火点 $225^{\circ}\text{C}$ に至る輻射強度( $107\text{kW}/\text{m}^2$ )より航空機燃料の輻射発散度( $58\text{kW}/\text{m}^2$ )が低いことから軽油が発火しないことを確認した。



第 2.3.2.3-2 図 軽油タンク温度評価体系図

(b) 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））

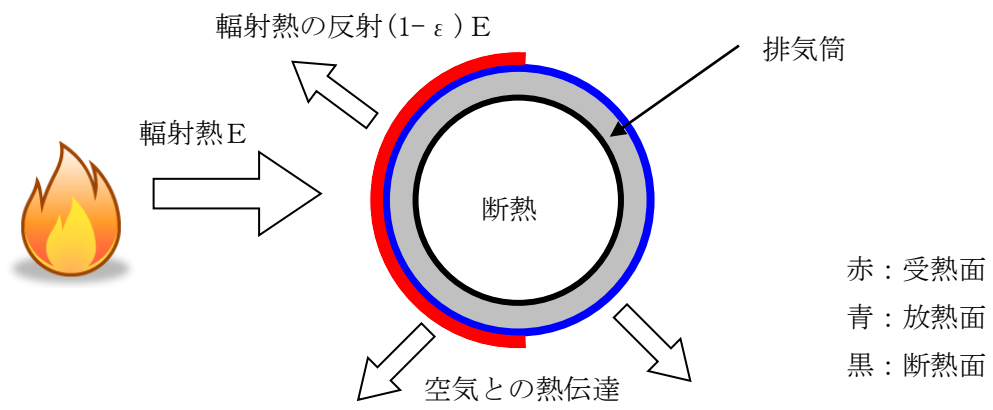
燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））について温度上昇を評価した結果、燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度は約 $87^{\circ}\text{C}$ となり、燃料移送ポンプ端子ボックスパッキンの耐熱温度 $100^{\circ}\text{C}$ 以下であることから、防護板（鋼板）の内側に設置されている燃料移送ポンプに対して熱影響はない。



第 2.3.2.3-3 図 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））温度評価体系図

(c) 排気筒

排気筒について温度上昇を評価した結果、排気筒の温度は約 $62^{\circ}\text{C}$ となり、排気筒鋼材の許容温度 $325^{\circ}\text{C}$ を下回ることを確認した。



第 2.3.2.3-4 図 排気筒温度評価体系図

(3) 危険物タンクとの重畳について

a. 重畳する危険物タンクの選定

(2)に記載の通り、航空機墜落位置より内側にある軽油タンクが航空機墜落により発火することは無いため、航空機墜落との重畳を考慮する危険物タンクは、航空機墜落位置より外側の危険物タンクとする。

6号炉では、航空機墜落確率が $10^{-7}$ [回/炉・年]以上となる範囲にある危険物タンクは5号炉の軽油タンクとなる(第2.3.2.3-5図)。7号炉では、航空機墜落確率が $10^{-7}$ [回/炉・年]以上となる範囲にある危険物タンクは5号炉および6号炉の軽油タンクとなる(第2.3.2.3-6図)。

(a) 6号炉の影響評価対象

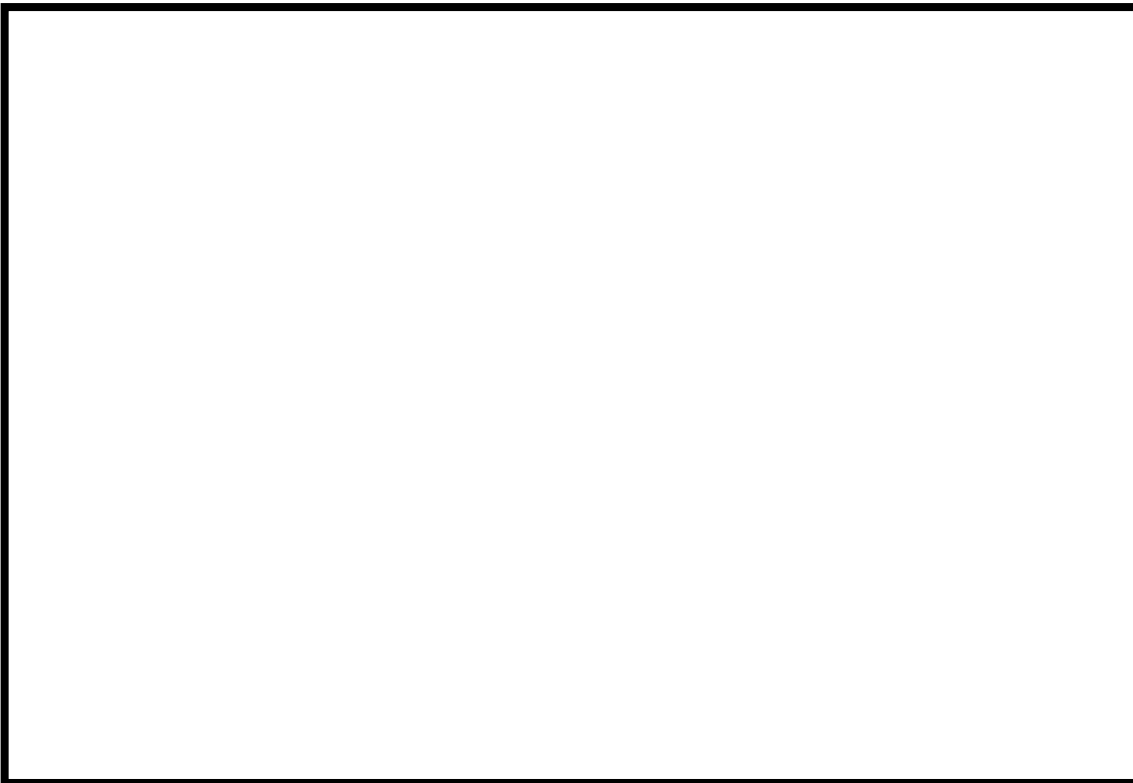
6号炉に対する影響評価を考えると、5号炉軽油タンクは海側に設置されており、小型軍用航空機、小型民間航空機および大型軍用航空機が5号炉軽油タンク位置に航空機が墜落したとしても、6号炉の原子炉建屋およびコントロール建屋への輻射熱はタービン建屋により遮蔽されるため影響はない。ただし、6号炉タービン建屋1階の非常用電気品室は、5号炉軽油タンクの熱影響を受ける位置にあることから、燃料積載量・燃料タンク投影面積が大きい大型軍用航空機(KC-767)が5号炉軽油タンク周辺に墜落し、5号炉軽油タンク2台火災と航空機墜落火災が重畳した場合の熱影響評価を実施する。なお、航空機墜落位置は、航空機墜落火災による影響が最も厳しくなるよう墜落確率が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる位置とする。

(b) 7号炉の影響評価対象

7号炉に対する影響評価を考えると、5号炉軽油タンクは海側に設置されており、大型民間航空機が5号炉軽油タンクに墜落したとしても、7号炉の原子炉建屋、コントロール建屋およびタービン建屋1階の非常用電気品室は6号炉タービン建屋により輻射熱が遮られることから影響は無い。6号炉軽油タンクは山側に設置されていることから、小型軍用航空機(AH-1S)が6号炉軽油タンク周辺に墜落し、6号炉軽油タンク2台火災と航空機墜落火災が重畳した場合の熱影響評価を実施する。なお、航空機墜落位置は、航空機墜落火災による影響が最も厳しくなるよう墜落確率が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる位置とする。



第 2.3.2.3-5 図 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置（6号炉）



第 2.3.2.3-6 図 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置（7号炉）

b. 熱影響評価結果

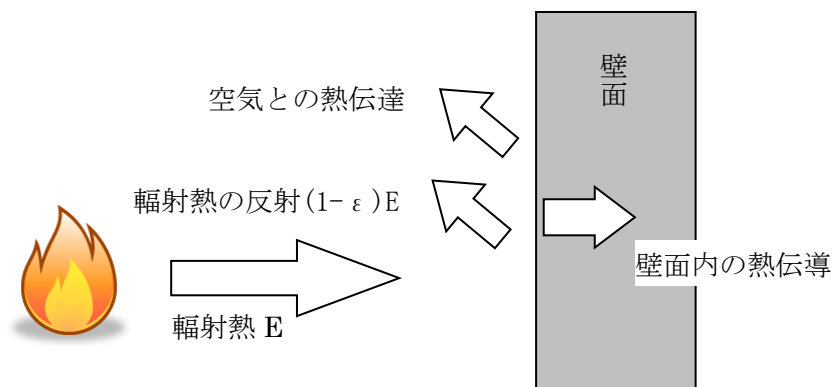
6号炉タービン建屋1階の非常用電気品室および7号炉コントロール建屋の熱影響評価を実施する。航空機落下および危険物タンク火災が発生した場合を想定したとしても、発電用原子炉施設外壁の温度が許容温度200℃（火災時における短期温度上昇を考慮した場合において、コンクリート圧縮強度が維持される保守的な温度）を超えないことを確認した。

第2.3.2.3-2表 航空機墜落火災時のタービン建屋外壁温度評価結果

6号炉タービン建屋1F 非常用電気品室評価	
項目	危険物タンクと大型軍用航空機（KC-767）の重畳
コンクリート表面温度[℃]	102
許容温度[℃]	200

第2.3.2.3-3表 航空機墜落火災時のコントロール建屋外壁温度評価結果

7号炉コントロール建屋評価	
項目	危険物タンクと小型軍用航空機（AH-1S）の重畳
コンクリート表面温度[℃]	77.8
許容温度[℃]	200



第2.3.2.3-7図 建屋温度評価体系図

2.4 二次的影響の評価(添付資料-8)

2.4.1 評価内容

森林火災，近隣の産業施設の火災・爆発及び航空機墜落による火災において発生するばい煙等に対して，影響が想定される機器，施設について評価を実施した。

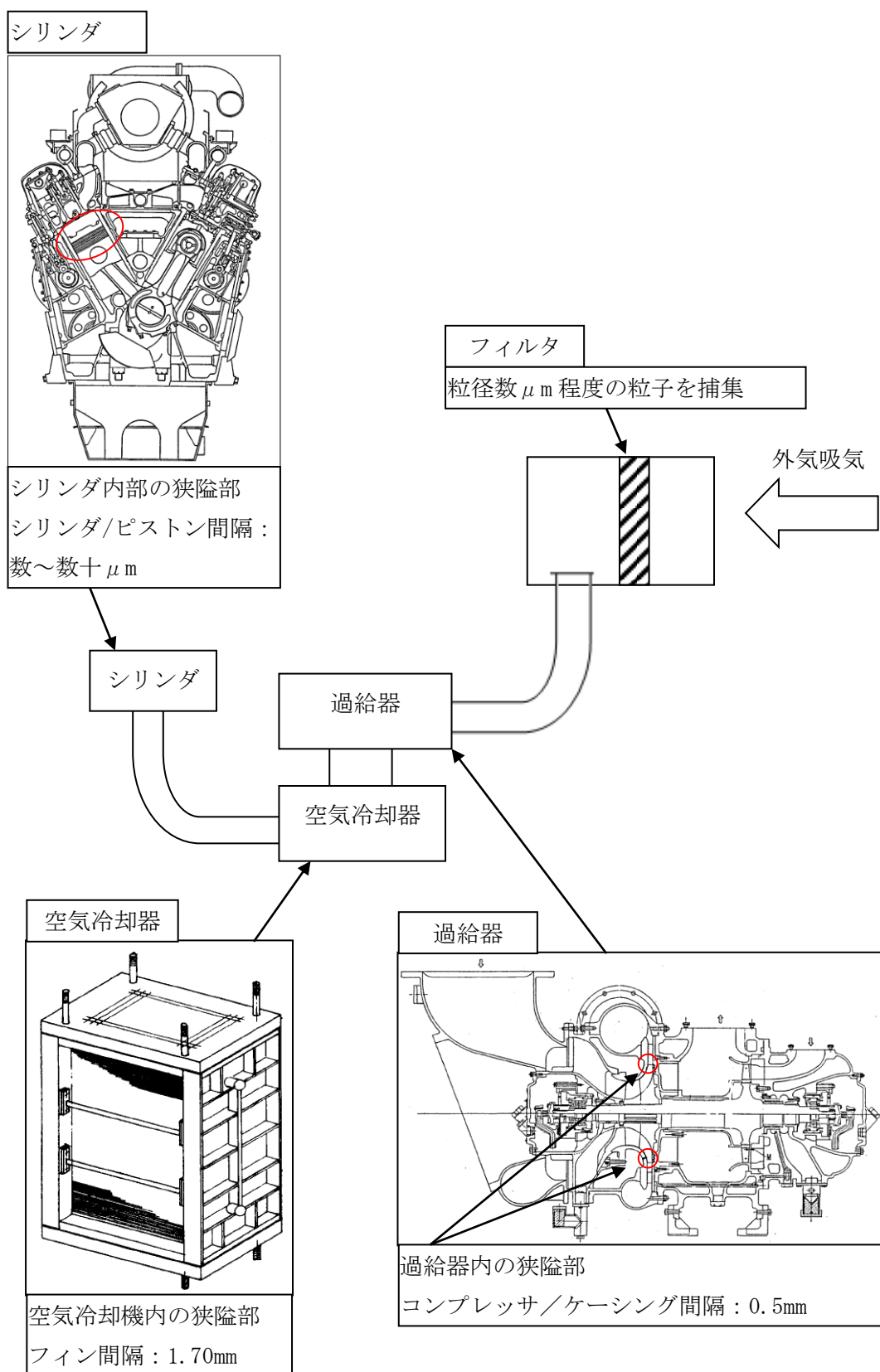
## 2.4.2 評価結果

ばい煙等による評価対象施設に対する影響及び居住性に影響を及ぼさないことを以下のとおり確認した。

第2.4.2-1表 評価対象施設に対する影響評価結果

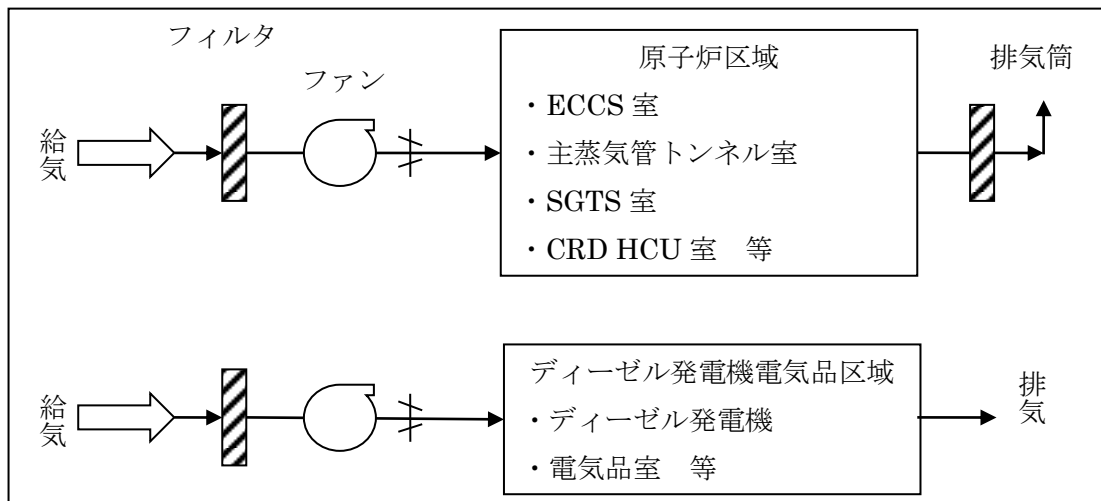
分類	対象設備	評価結果
機器への影響	外気を直接設備内に取り込む機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・当該設備の運転時において、ばい煙を機関内に吸い込むおそれがあるが、シリンダまでの通気経路の間隔よりばい煙の粒径が小さいため、通気経路が閉塞することなく、運転に影響はない。(第2.4.2-1図)</li> <li>・通常運転においても燃料油(軽油)の燃焼に伴うばい煙が発生していることから、機関に損傷を与えることや運転機能を阻害することはない。</li> </ul>
	外気を取り込む空調系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外気取り入れ運転を行っている換気空調設備は、外気取入口にはフィルタを設置しているため、一定以上の粒径のばい煙を捕集するとともに、外気取入ダンパを閉止又は空調系停止や循環運転により、建屋内へのばい煙の侵入を阻止することが可能である。(第2.4.2-2(a)(b)(c)図)</li> </ul>
	屋外設置機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電動機本体は、ばい煙が侵入しない密閉構造であり機能への影響はない。(第2.4.2-3図)</li> </ul>
	屋外部に開口部を有する設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ばい煙が配管等の内部に侵入した場合においても、その動作時には侵入したばい煙は吹き出されることから、その機能に影響はない。(第2.4.2-4図)</li> </ul>
居住性への影響	中央制御室	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外気取入ダンパを閉止し閉回路循環運転により、酸素濃度及び炭酸ガス濃度を考慮しても長時間室内へのばい煙侵入を阻止することが可能である。(第2.4.2-5(a)(b)図, 第2.4.2-2表)</li> <li>・外気取入口での有毒ガス濃度が判定基準(IDLH<sup>*</sup>)以下であることから、中央制御室の居住性に影響はない。</li> </ul>

※：30分暴露によって生命及び健康に対する即時の危険な影響を与える濃度限度値

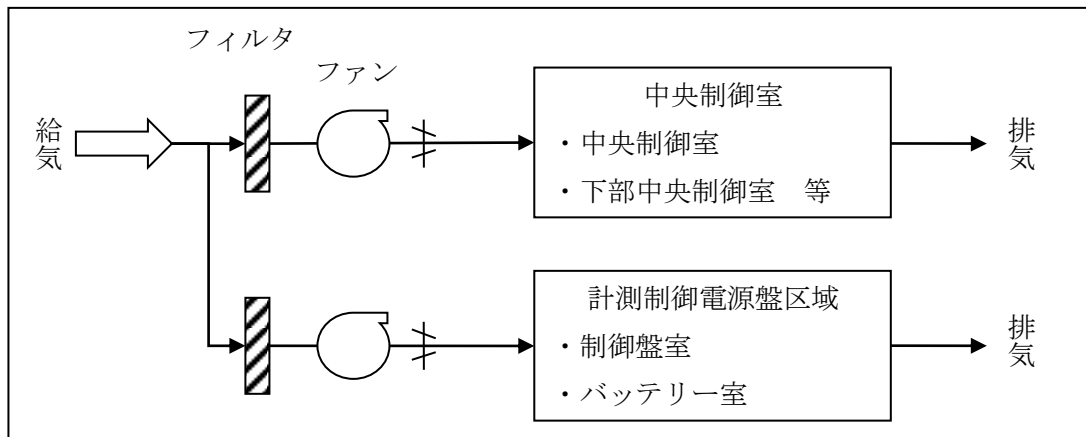


第 2.4.2-1 図 非常用ディーゼル発電機関

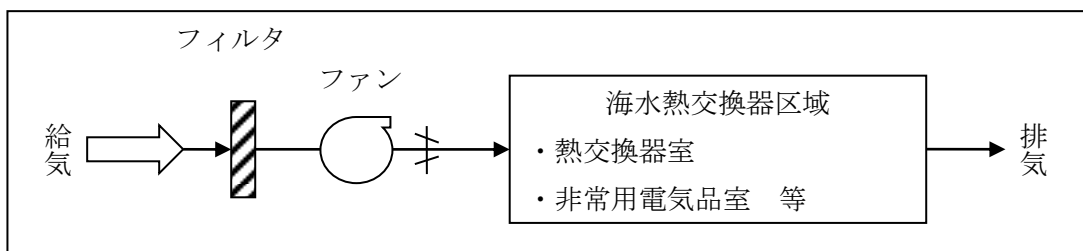




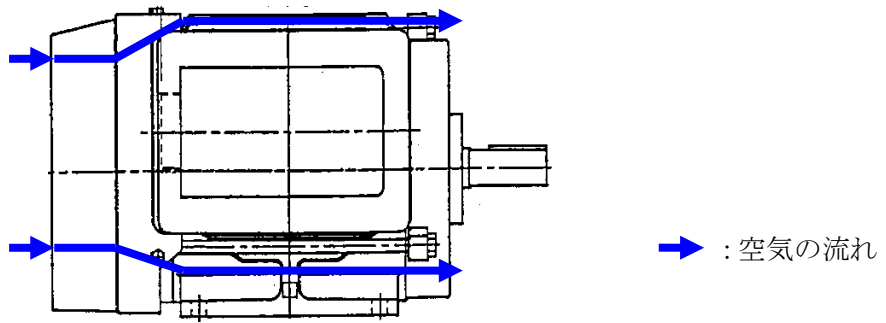
第 2.4.2-2(a) 図 原子炉建屋換気空調系



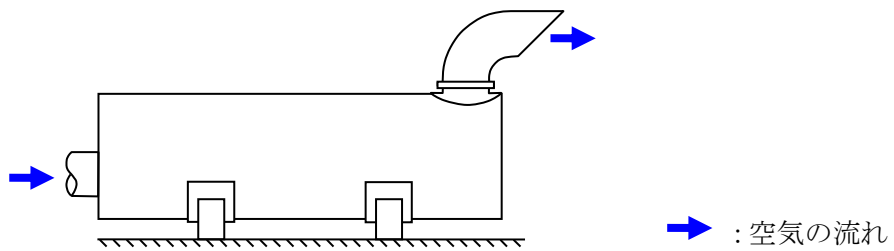
第 2.4.2-2(b) 図 コントロール建屋換気空調系



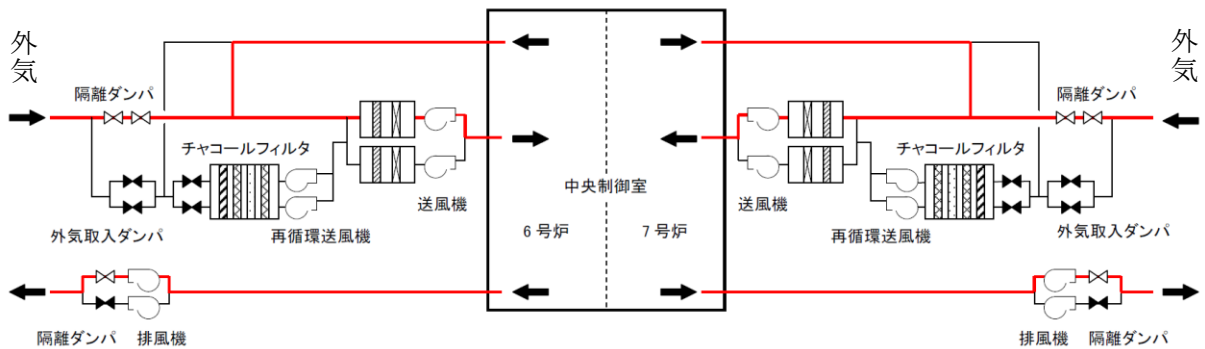
第 2.4.2-2(c) 図 タービン建屋換気空調系



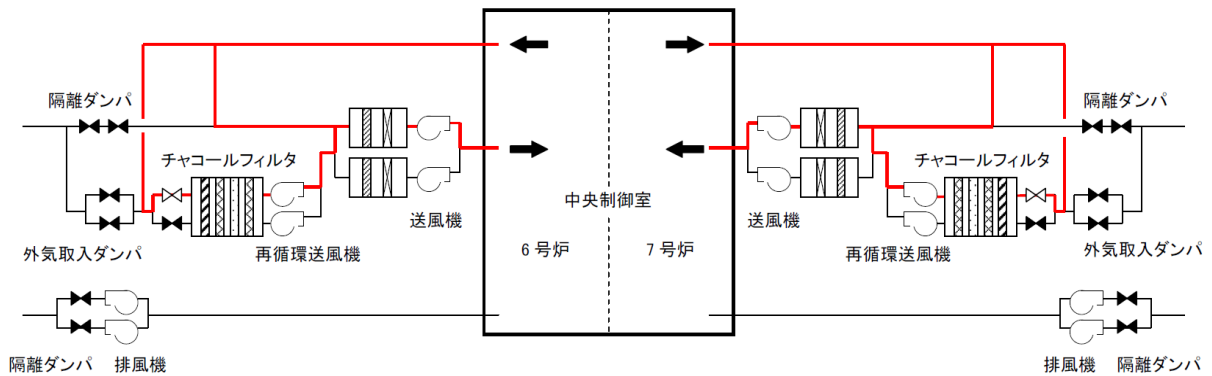
第 2.4.2-3 図 燃料移送ポンプ電動機外形図



第 2.4.2-4 図 非常用ディーゼル発電機排気口外形図



第 2.4.2-5(a) 図 通常モードの状態 (中央制御室)



第 2.4.2-5(b) 図 非常時モードの状態 (中央制御室)

第 2.4.2-2 表 外気遮断時の中央制御室の酸素・二酸化炭素濃度

時間	6 時間	12 時間	24 時間	許容濃度
二酸化炭素濃度 [%]	0.07	0.11	0.18	0.5
酸素濃度 [%]	20.8	20.8	20.7	18

以上

外部火災影響評価対象の考え方について

## 1. 外部火災影響評価対象の考え方

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下、設置許可基準規則という。）」第6条及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下、技術基準規則という。）」第7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。）又は人為事象（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とされている。

このため、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド（以下、「評価ガイド」という。）」に基づき、外部火災影響評価を行い、外部火災により、発電用原子炉施設へ影響を与えないこと及び二次的影響に対する適切な防護対策が施されていることを評価する。

外部火災の影響を受けた場合、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な設計上の要求事項を喪失し、安全性の確保が困難となるおそれがあることから、防護対象は「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」において安全機能を有するクラス1, 2, 3に該当する構築物、系統及び機器とする。今回、防護対象とした構築物、系統及び機器については、外部火災発生時には、原則防火帯の内側で防護し、対象施設周辺の消火活動等により影響を及ぼさないよう防護する。

### (1) 外部事象防護対象施設

外部火災に係る影響評価においては、外部事象防護対象施設として、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器（原子炉停止、炉心冷却、使用済燃料プール冷却に必要な異常の発生防止の機能若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備）又はそれを内包する建屋に対して、消火活動等の防護手段を期待しない条件のもと、火元からの離隔で防護するため、想定される外部火災に対して熱影響評価を実施する。（第4-2表）

### (2) その他の安全施設

その他の安全施設は、原則防火帯により防護し、建屋内の設備は建屋による防護、屋外設備は代替手段等で安全機能に影響がないことを確認する。屋外に設置してあり代替手段がない設備（排気筒）については、個別に熱影響評価を実施する。（第4-3表）

なお、防火帯による防護が出来ない設備は、送電線、通信線、モニタリングポストおよび気象観測装置となるが、これらが機能喪失した場合であっても、防火帯の内側で防護する非常用ディーゼル発電機、無線通信設備、可搬型モニタリングポストおよび可搬型気象観測装置により安全機能は維持される。

### (3) 重大事故等対処設備

設計基準事象に対して耐性を確保する必要があるのは設計基準対象施設であり、重大事故等対処施設ではないが、設計基準を超える事象が発生した場合に使用する重大事故等対処施設が、その前段の設計基準事象の自然現象によって機能喪失することは回避するべきであることから、原則防火帯の内側に配置し外部火災の熱影響を回避する。(第 4-4 表)

防火帯による防護が出来ない設備として、モニタリングポスト、気象観測装置、代替気象観測装置があるが、これらが機能喪失した場合であっても、防火帯の内側で防護する可搬型モニタリングポスト、可搬型気象観測装置により安全機能は維持される。

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

## 2. 影響評価内容

### (1) 熱影響評価について

外部事象防護対象施設のうち、外部火災の影響を受ける評価対象施設については、評価ガイドに基づき、建屋の外側（コンクリート、鋼、扉、貫通部で形成される障壁）の熱影響に対する耐性評価を実施する。選定フロー（第 3-1 図）に基づき抽出した施設のうち、屋内設置の外部事象防護対象施設については、内包する建屋により防護するとし、評価対象施設として抽出された建屋側面のコンクリート壁の温度評価を実施し、建屋内の外部事象防護対象施設に影響を及ぼさないことを確認する。また、屋外の評価対象施設については、各機器について熱影響評価を実施する。(第 3-1 表)

### (2) 二次的影響評価

外部火災の二次的影響を受ける評価対象施設については、ばい煙等による安全上重要な設備に対する影響評価として、非常用ディーゼル発電機等について影響評価を実施する。

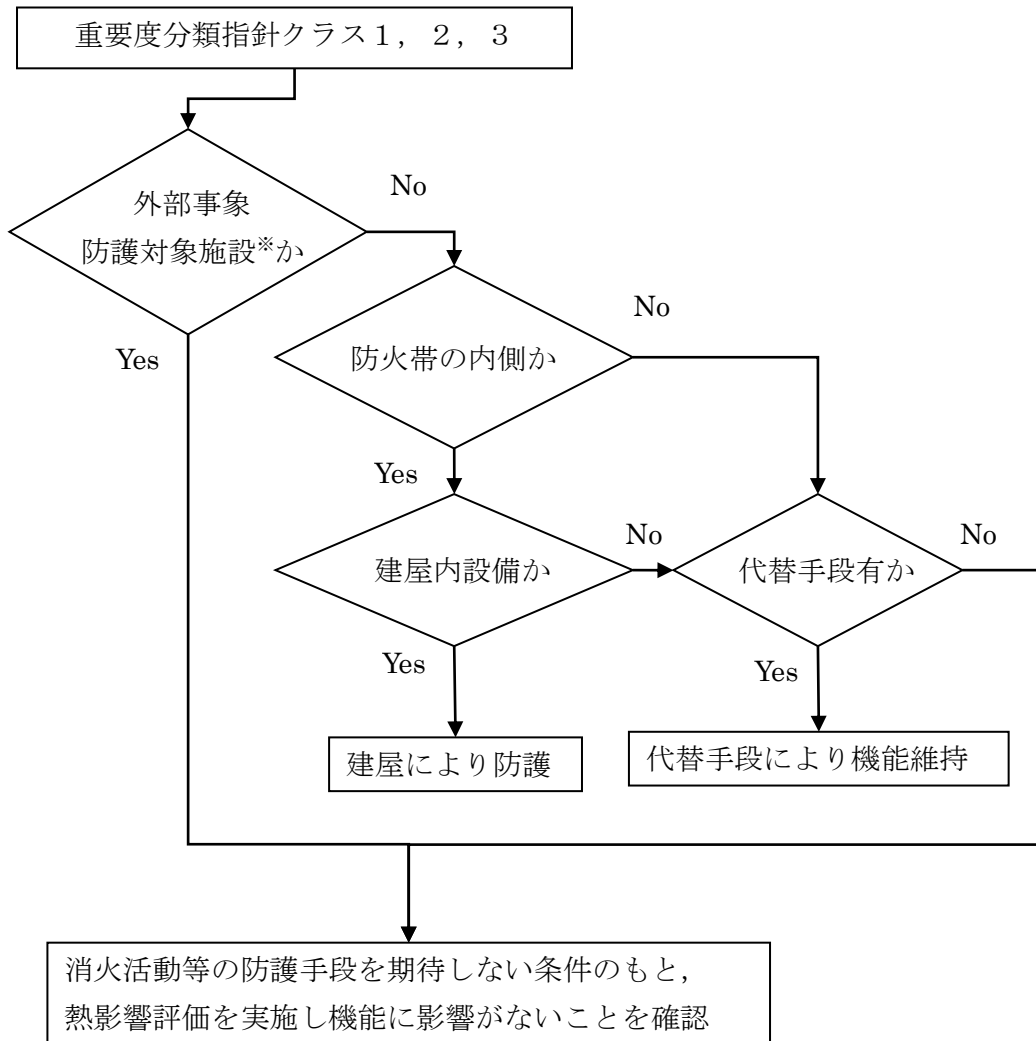
選定フロー（第 3-2 図）に基づき、ばい煙等による影響評価の評価対象施設を抽出し、評価を実施した。

- a. 屋外設備で外気を内部に取り込む設備（対象無し）
- b. 屋外設備で開口部のある設備
  - ・ 非常用ディーゼル発電機排気口
- c. 屋内設備で外気を直接取り込む設備
  - ・ 換気空調系（原子炉建屋、ディーゼル発電機電気品区域、中央制御室、コントロール建屋計測制御電源盤区域、海水熱交換器区域）
  - ・ 非常用ディーゼル発電機

また、外部火災発生時のばい煙等による居住性評価の観点から、中央制御室の影響評価を実施し、煙や埃に対して脆弱な設備として安全保護系について影響評価を実施した。

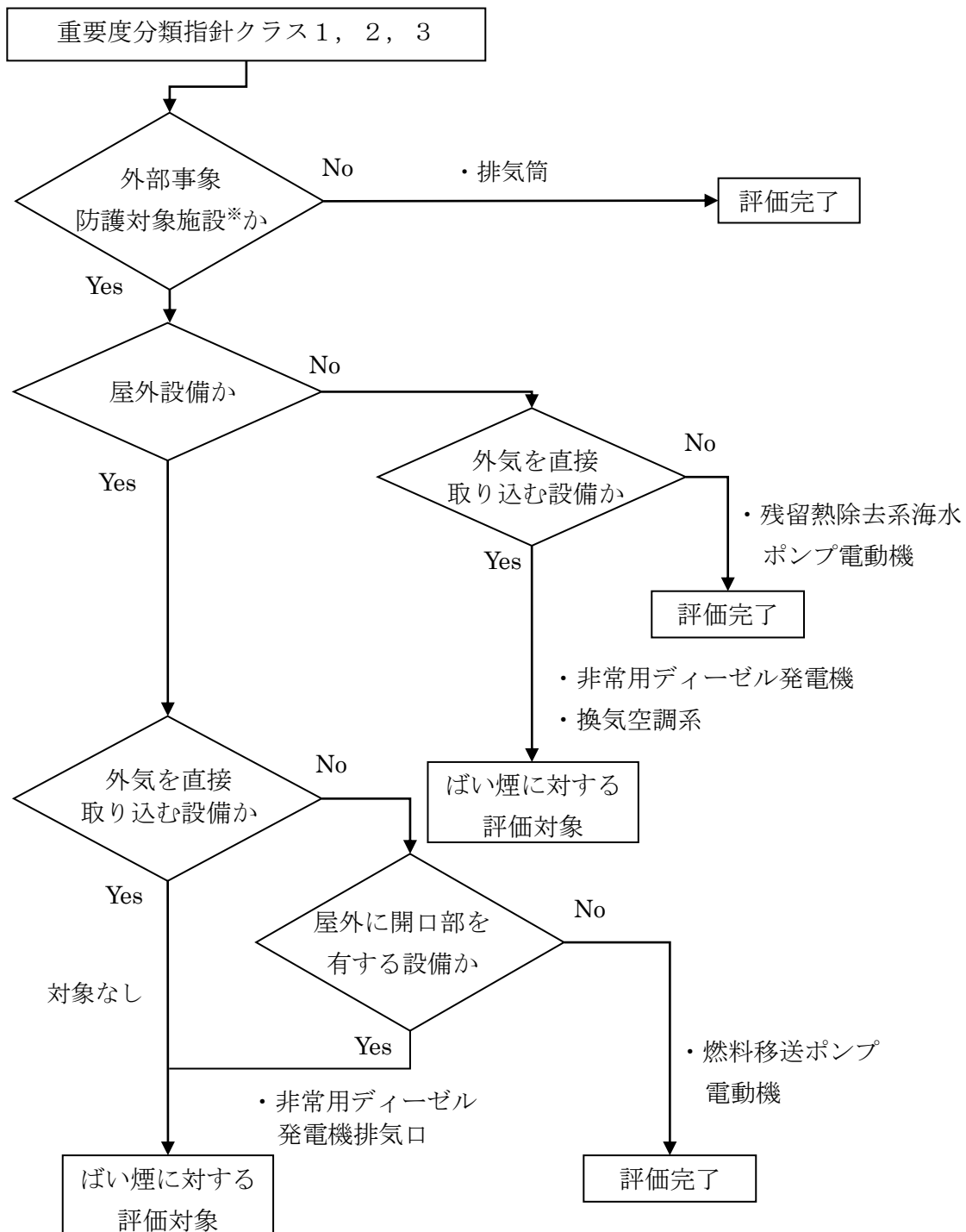
### 3. 重大事故等対処設備に対する考慮

第 3-6 図の外部火災に対する重大事故等対処設備の評価フローに基づき、外部火災に対し、必要な安全機能を維持できることを確認した。



※：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（原子炉停止，炉心冷却，使用済燃料プール冷却に必要な異常の発生防止の機能，若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備）又はそれを内包する建屋

第 3-1 図 熱影響評価を実施する施設の選定フロー図



※：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（原子炉停止，炉心冷却，使用済燃料プール冷却に必要な異常の発生防止の機能，若しくは異常の影響緩和の機能を有する設備）又はそれを内包する建屋

第 3-2 図 ばい煙に対する影響評価を実施する施設の選定フロー図



第 3-1 表 防護対象及び防護方法

防護対象		防護方法	評価対象施設等 <sup>※1</sup>
外部事象防護対象施設	外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器を内包する建屋	防火帯の内側に設置 消火活動による防護手段を期待しない条件のもと、火元からの離隔距離で防護 (熱影響評価を実施)	原子炉建屋 コントロール建屋 タービン建屋 <sup>※2</sup> 廃棄物処理建屋 <sup>※3</sup>
	外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器に属する屋外施設		軽油タンク 燃料移送ポンプ
その他の安全施設		防火帯の内側に原則設置 屋内設備は、建屋による防護。 屋外設備は、代替手段等で安全機能に影響がないことを確認。	排気筒 <sup>※4</sup> 固体廃棄物貯蔵庫 開閉所 モニタリングポスト他
重大事故等対処設備			電源車、消防車 格納容器圧力逃がし装置他

※ 1 : 破線内は評価対象施設である。

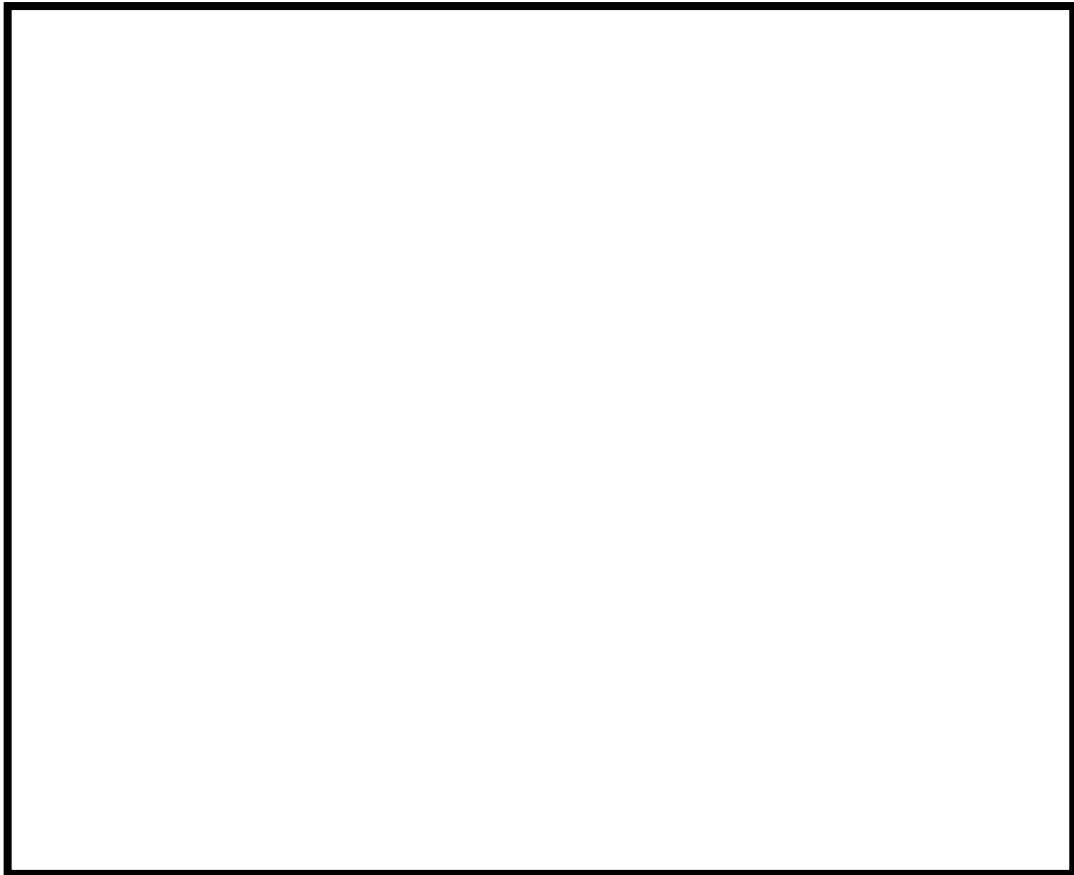
※ 2 : タービン建屋には原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系及び非常用電源の一部がある。原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系は、地下階に位置することから熱影響はない。非常用電源の一部は1階に位置することから、個別に熱影響評価を実施する(第 3-3 図)。ただし、タービン建屋は海側に設置していることから、直接輻射熱が届く火災は、構内危険物タンク火災および航空機墜落火災となることから、それらについて熱影響評価を実施する。

※ 3 : 廃棄物処理建屋には復水貯蔵槽がある。復水貯蔵槽の配置は第 2-4 図に示すとおり、復水貯蔵槽は地下階から1階にかけて設置されているが、屋外から2枚以上の壁を隔てた位置に設置されていることから、復水貯蔵槽への外部火災の影響はないが、直接輻射熱が届く航空機墜落火災について熱影響評価を実施する。

※ 4 : 排気筒は、防火帯の内側にあるが、屋外設置で代替手段が無いことから、個別に熱影響評価を実施する。



第3-3図 6, 7号炉の建屋配置

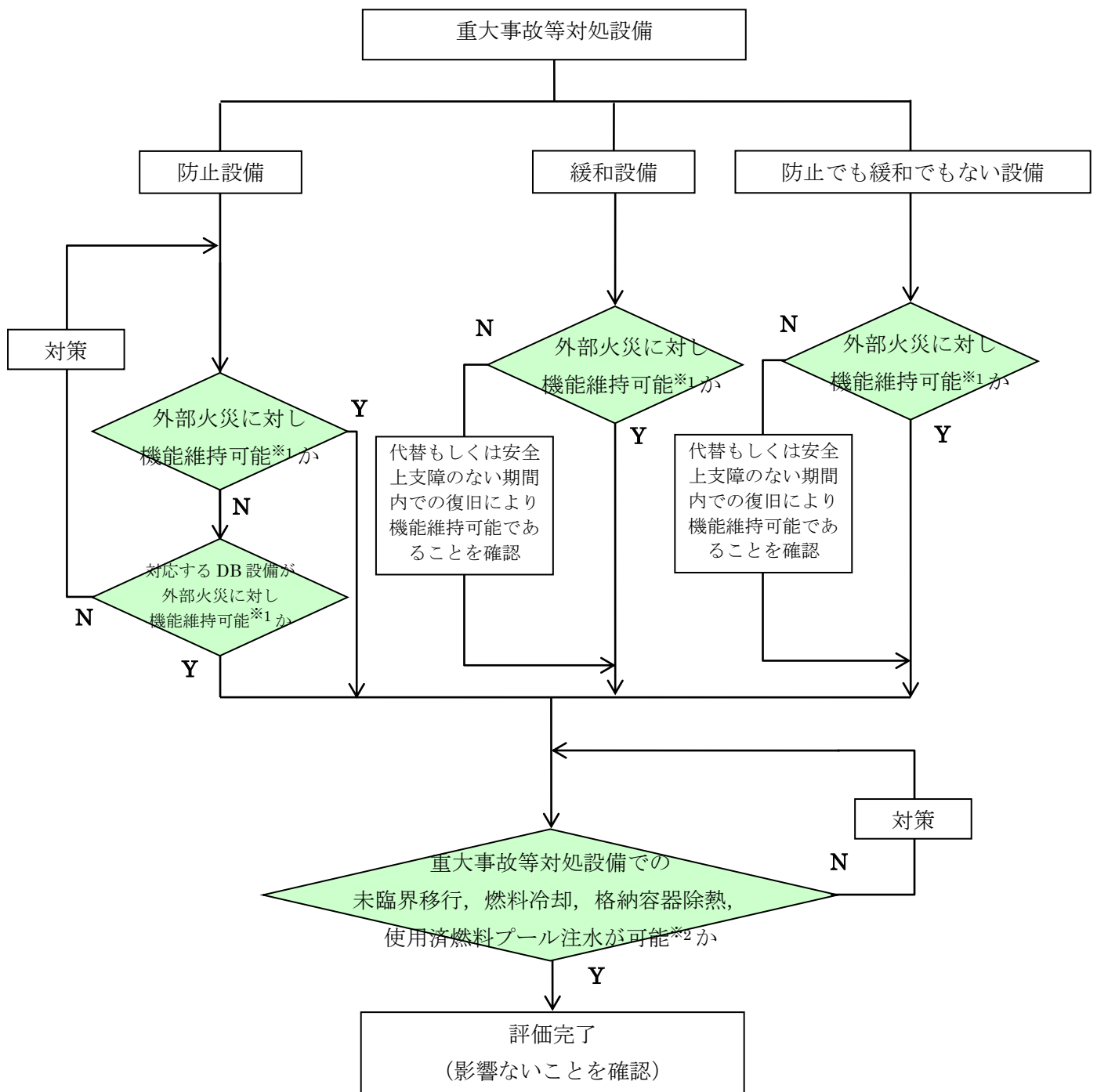


第3-4図 廃棄物処理建屋復水貯蔵槽の位置

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

6条-別添4(外火)-1-添付1-8

第3-5図 発電所構内全体



- ※1 : ばい煙を取り込む, もしくは取り込んでも機能維持可能なことを確認している。
- ※2 : 外部火災により重大事故等対処設備と設計基準設備が同時に損なわれることはないが, 安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

第3-6図 外部火災に対する重大事故等対処施設への評価フロー

#### 4. 設備を防護する建屋の離隔距離

外部事象防護対象施設および重大事故等対処設備を内包する各建屋について、防火帯外縁からの離隔距離を下表に示す。

この離隔距離は想定される森林火災において、評価上必要とされる危険距離（約20m）以上あることから、外部事象防護対象施設および重大事故等対処設備に対して、森林火災が熱影響をおよぼすことはないと評価できる（添付資料－2 3. 危険距離および温度評価 参照）。

なお、防火帯に最も近く森林火災時の外壁面の温度上昇が大きい固体廃棄物貯蔵庫（壁厚：0.58m）、ならびに防火帯に近く壁厚の薄い免震重要棟（壁厚：0.18m）については内気の温度評価を実施する。固体廃棄物処理建屋（壁厚：0.3m）については、免震重要棟と離隔距離が同等であるが、壁厚が厚いことから免震重要棟の評価に包絡される。

第4-1表 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離

設備を防護する建屋	離隔距離※
6号炉 原子炉建屋	約 202m
7号炉 原子炉建屋	約 256m
6号炉 タービン建屋	約 263m
7号炉 タービン建屋	約 303m
コントロール建屋	約 230m
廃棄物処理建屋	約 286m
補助ボイラ建屋	約 129m
水処理建屋	約 195m
給水建屋	約 105m
固体廃棄物貯蔵庫	約 41m
固体廃棄物処理建屋	約 50m
免震重要棟	約 50m
5号炉 原子炉建屋	約 151m

※：防火帯外縁から建屋までの最短距離

第 4-2 表 外部事象防護対象施設 (1 / 2)

分類	機能	構築物, 系統又は機能※1	場所※2	影響評価
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	R/B	熱影響評価
	過剰反応度の印加防止機能	制御棒カップリング・制御棒駆動機構	R/B	熱影響評価
	炉心形状の維持機能	炉心支持構造物, 燃料集合体	R/B	熱影響評価
MS-1	原子炉の緊急停止機能	原子炉停止系の制御棒による系 (制御棒, 制御棒駆動系)	R/B	熱影響評価
	未臨界維持機能	原子炉停止系 (制御棒駆動系, ほう酸水注入系)	R/B	熱影響評価
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	逃がし安全弁 (安全弁としての開機能)	R/B	熱影響評価
	原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統 (残留熱除去系, 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心注水系, 逃がし安全弁, 自動減圧系), 原子炉格納容器 (サブプレッションプール)	R/B	熱影響評価
		復水補給水系 (復水貯蔵槽)	Rw/B	熱影響評価
	炉心冷却機能	非常用炉心冷却系 (残留熱除去系, 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心注水系, 自動減圧系), 原子炉格納容器 (サブプレッションプール)	R/B	熱影響評価
		復水補給水系 (復水貯蔵槽)	Rw/B	熱影響評価
	放射性物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管, 残留熱除去系	R/B	熱影響評価
		原子炉建屋	R/B	熱影響評価
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系	C/B	熱影響評価 ばい煙による影響評価

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

※2 : R/B : 原子炉建屋, C/B : コントロール建屋, Rw/B : 廃棄物処理建屋, T/B : タービン建屋

第 4-2 表 外部事象防護対象施設 (2 / 2)

分類	機能	構築物, 系統又は機能※	場所	影響評価
MS-1	安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系	R/B, C/B, T/B	熱影響評価
		非常用ディーゼル発電機	R/B	熱影響評価 ばい煙による影響 評価
		軽油タンク, 非常用ディーゼル発電機燃料移送系	屋外	熱影響評価
		中央制御室及びその遮へい・非常用換気空調系	C/B	熱影響評価 ばい煙による影響 評価
		原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	T/B	熱影響評価
		直流電源系・計測制御電源系	R/B, C/B	熱影響評価
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能 (ただし, 原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く)	原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分), 主蒸気系, 原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	熱影響評価
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	逃がし安全弁 (吹き止まり機能に関連する部分)	R/B	熱影響評価
MS-2	燃料プール水の補給機能	残留熱除去系	R/B	熱影響評価
	放射性物質放出の防止機能	燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	熱影響評価
		原子炉建屋原子炉棟	R/B	熱影響評価
	事故時のプラント状態の把握機能	事故時監視計器の一部 (格納容器エリアモニタ)	C/B	熱影響評価
	制御室外からの安全停止機能	制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	R/B	熱影響評価

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

第 4-3 表 その他の安全施設 (1 / 4)

分類	機能	構築物, 系統又は機能※1	場所	防護
MS-1	放射性物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	非常用ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
		排気筒	屋外	防火帯による防護 熱影響評価※3
PS-2	原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって, 放射性物質を貯蔵する機能	使用済燃料プール(使用済燃料貯蔵ラックを含む), 新燃料貯蔵庫(臨界を防止する機能)	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
		放射性気体廃棄物処理系(活性炭式希ガスホールドアップ装置)	T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	燃料を安全に取り扱う機能	燃料交換機, 原子炉建屋クレーン	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
MS-2	放射性物質放出の防止機能	放射性気体廃棄物処理系(オフガス系) 隔離弁	T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
		排気筒(非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分)	屋外	防火帯による防護 熱影響評価※3
		非常用ガス処理系, 空調機(間接関連系:MS-2)	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2

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

※2: 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

※3: 代替手段が無く建屋による防護も期待できないため熱影響評価を実施



第 4-3 表 その他の安全施設 (2 / 4)

分類	機能	構築物, 系統又は機能※1	場所	防護
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1, PS-2 以外のもの)	原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管, 弁	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	原子炉冷却材の循環機能	原子炉再循環系	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	放射性物質の貯蔵機能	サプレッションプール水サージタンク	屋外	防火帯による防護 遮へい壁による防護
		復水貯蔵槽, 液体廃棄物処理系, 固体廃棄物処理系	Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
		固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶)	固体廃棄物貯蔵庫	防火帯による防護
		固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	建屋による防護※2
		新燃料貯蔵庫, 新燃料貯蔵ラック	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	電源供給機能 (非常用を除く)	タービン, 発電機及び励磁装置, 復水系, 給水系, 循環水系	T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2 安全機能は MS-1 の「安全上特に重要な関連機能」で機能維持可能
		送電線	屋外送電線	防火帯による防護はできないが, 安全機能は MS-1 の「安全上特に重要な関連機能」で機能維持可能
		変圧器, 開閉所	屋外	防火帯による防護 安全機能は MS-1 の「安全上特に重要な関連機能」で機能維持可能

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

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-3 表 その他の安全施設 (3 / 4)

分類	機能	構築物, 系統又は機能※1	場所	防護
PS-3	プラント計測・制御機能(安全保護機能を除く)	原子炉制御系 (RWM 含む), 原子炉核計装, 原子炉プロセス計装	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	プラント運転補助機能	補助ボイラ設備	補助ボイラ 建屋	防火帯による防護 建屋による防護※2
		計装用圧縮空気系	T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放散防止機能	燃料被覆管	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	原子炉冷却材の浄化機能	原子炉冷却材浄化系	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
		復水浄化系	T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能	逃がし安全弁 (逃がし弁機能)	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
		タービンバイパス弁	T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	出力上昇の抑制機能	原子炉冷却材再循環系 (再循環ポンプトリップ機能), 制御棒引抜監視装置	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	原子炉冷却材の補給機能	制御棒駆動水圧系, 原子炉隔離時冷却系	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	原子炉冷却材再循環ポンプ MG セット	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2

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

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-3 表 その他の安全施設 (4 / 4)

分類	機能	構築物, 系統又は機能※1	配置場所	防護	
MS-3	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	原子力発電所緊急時対策所	免震重要棟, R/B (5号炉)	防火帯による防護 建屋による防護※ 代替緊急時対策所により機能維持	
		試料採取系	R/B	防火帯による防護, 建屋による防護※	
		通信連絡設備	所外通信	マイクロ波無線鉄塔, 送電鉄塔	防火帯により防護できないが, 分散配置された代替設備により機能維持
			所内外通信	免震重要棟, R/B (5号炉), 屋外 (PHS 基地局他)	防火帯による防護, 建屋による防護※ 屋外設備は防火帯による防護と共に代替設備及び復旧 (PHS 基地局) により機能維持
			所内通信	各建屋, 屋外 (PHS 基地局他)	防火帯による防護, 建屋による防護※ 屋外設備は防火帯による防護と共に代替設備及び復旧 (PHS 基地局) により機能維持
		放射能監視設備 (モニタリングポスト)	屋外	防火帯による防護はできないが, 可搬型モニタリングポストで機能維持可能	
		放射線監視設備 (放射能観測車)	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価	
		事故時監視計器の一部	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※	
			気象観測装置	防火帯による防護はできないが, 可搬型気象観測装置で機能維持可能	
		消火系	給水建屋 水処理建屋	防火帯による防護 建屋による防護※	
			ろ過水タンク	防火帯による防護 防火水槽により機能維持可能	
			泡消火設備	防火帯による防護 消防車により機能維持可能	
安全避難通路, 非常照明	各建屋内	防火帯による防護, 建屋による防護※			

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

※2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (1 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価および防護
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)	ホイールローダ	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護
第 44 条 (緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備)	代替制御棒挿入機能	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	代替冷却材再循環ポンプ・トリップ機能	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	ほう酸水注入系	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
第 45 条 (原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	原子炉隔離時冷却系	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	高圧代替注水系	防止設備	R/B	建屋による防護※2

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (2 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
第 46 条 (原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備)	代替自動減圧機能	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	減圧制御[自動減圧系の起動阻止スイッチ]	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	高圧窒素ガスポンベ(供給系配管含む)	防止設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
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) [MUWC ポンプ]	防止設備・緩和設備	Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	低圧代替注水系 (可搬型) [消防車]	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	低圧代替注水系 (可搬型) (常設箇所) [消防車接続口, 配管等]	防止設備・緩和設備	屋外 Rw/B 廻り	防火帯による防護
	低圧代替注水系 (常設箇所) [原子炉圧力容器 (注入先), 配管等]	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (3 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
第 48 条 (最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)	代替原子炉補機冷却系 (可搬部) [代替 Hx 設備一式]	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	代替原子炉補機冷却系 (常設箇所) [代替 Hx 接続口, 配管等]	防止設備・緩和設備	屋外 T/B 廻り	防火帯による防護
	代替原子炉補機冷却系 (常設箇所) [原子炉補機冷却系配管, Hx 等]	防止設備・緩和設備	R/B T/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	真空破壊弁 (S/C→D/W)	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	耐圧強化ベント系 (W/W 及び D/W)	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	格納容器圧力逃がし装置 [フィルタベント]	→50 条に記載 (うち、防止設備)		—
	代替格納容器圧力逃がし装置 [地下式フィルタベント]	→50 条に記載 (うち、防止設備)		—

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (4 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	場所※1	影響評価及び防護
第 49 条 (原子炉格納容器内の冷却等のための設備)	代替格納容器スプレイ冷却系 [MUWC 代替スプレイ]		防止設備・緩和設備	Rw/B R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
第 50 条 (原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備)	格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置, よう素フィルタ, 配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外	防火帯による防護
		フィルタベントライン計装 [水素濃度計, 放射線モニタ等]	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	R/B, 屋外 R/B 廻り	防火帯による防護 熱影響評価
		格納容器圧力逃がし装置 スクラバ水 ph 制御設備 (可搬型)	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護
		窒素供給装置 (可搬型)	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護
	代替格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置, よう素フィルタ, 配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外 (地下設置)	地下構造のため火災の輻射熱を受けない
		代替フィルタベントライン計装 [水素濃度計, 放射線モニタ等]	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外 (地下設置)	地下構造のため火災の輻射熱を受けない
		代替格納容器圧力逃がし装置薬液タンク	緩和設備	屋外 (地下)	地下構造のため火災の輻射熱を受けない
		窒素供給装置 (可搬型)	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (5 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所	影響評価及び防護	
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	復水移送ポンプ		→47, 49 条に記載 (うち, 緩和設備)	—
		代替 Hx 設備一式 (可搬部), 配管等		→48 条に記載 (うち, 緩和設備)	—
		代替循環冷却用設備 (常設)	緩和設備	R/B, T/B, Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※
		真空破壊弁 (S/C→D/W)		→48 条に記載 (うち, 緩和設備)	—
第 51 条 (原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備)		格納容器下部注水系 (常設)	緩和設備	Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※
		格納容器下部注水系 (可搬型) [消防車]	緩和設備	屋外	防火帯による防護
		格納容器下部注水系 (可搬型) (常設箇所) [消防車接続口, 配管等]	緩和設備	屋外 R/B 廻り	防火帯による防護
		格納容器下部注水系 (常設箇所) [復水補給水系配管等]	緩和設備	R/B Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※
		格納容器下部注水系 (常設箇所) [原子炉格納容器 (注入先)]		→49 条に記載 (うち, 緩和設備)	—

※: 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載



第 4-4 表 重大事故等対処設備 (6 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所	影響評価及び防護
第 52 条(水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備)	格納容器内の水素濃度監視設備 [格納容器水素濃度系 (S A) 格納容器酸素濃度計]	緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※
	格納容器圧力逃がし装置	→50 条に記載		—
	代替格納容器圧力逃がし装置	→50 条に記載		—
	耐圧強化ベント系 (W/W)	→48 条に記載 (窒素供給装置 (可搬型) は 50 条に記載)		—
第 53 条(水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備)	耐圧強化ベント系 [耐圧強化ベント系放射線モニタ, フィルタ装置水素濃度計]	防止設備・ 緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※
	静的触媒式水素再結合器 [PAR]	緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※
	原子炉建屋水素濃度監視設備	緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※
	原子炉建屋水素濃度計	緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※

※：各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (7 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
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 (可搬型) [消防車]	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	燃料プール代替注水系 (可搬型) (常設箇所) [消防車接続口, 配管等]	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	防火帯による防護 建屋による防護※2
	燃料プール代替注水系 (常設箇所) [配管, 弁等]	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護
	使用済燃料貯蔵プールの水位, プール水温度	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	使用済燃料貯蔵プール放射線モニタ	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ	防止でも緩和でもない設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
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)	放水設備一式 [大容量送水車, 放水砲]	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	放射性物質吸着剤	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	海洋への拡散抑制設備 [汚濁防止膜]	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護
	海洋への拡散抑制設備 [汚濁防止膜設置のための小型船舶]	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護
	泡消火設備 [泡原液搬送車, 泡原液混合装置]	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (8 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
第 56 条 (重大事故等の収束に必要となる水の供給設備)	復水貯蔵槽	防止設備・緩和設備	Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	サプレッション・プール	緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	防火水槽	— (代替淡水源)	屋外(地下埋設)	—
	淡水貯水池	— (代替淡水源)	淡水貯水池	—
	淡水貯水池～ 防火水槽移送ホース	防止設備・緩和設備	地下敷設	地下構造のため火災の輻射熱を受けない
	海水	—	屋外	—
	海水取水ポンプ, 海水ホース	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	防火帯による防護
	(可搬型代替注水ポンプ)	→47 条に記載		—

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (9 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
第 57 条 (電源設備)	常設代替交流電源設備 [GTG 一式]	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	常設代替交流電源設備 [第二 GTG 一式]	防止設備・緩和設備	屋外 T/B 廻り	防火帯による防護 熱影響評価
	常設代替交流電源設備 [非常用高圧母線 C・D 系]	防止設備・緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	可搬型代替交流電源設備 [電源車] (移動式変圧器含む)	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	可搬型代替交流電源設備 (常設箇所) [電源車接続箇所]	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	防火帯による防護
	常設代替直流電源設備 [AM 用直流 125V 蓄電池]	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	常設代替直流電源設備 [蓄電池 A 系, A-2 系]	防止設備・緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	可搬型代替直流電源設備 [電源車]	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (10 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
第 57 条 (電源設備)	代替所内電源盤	防止設備・緩和設備	R/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	6-7 号炉電力融通ケーブル	防止設備・緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	(燃料設備 (D/G 軽油タンク))	→設計基準対象施設における評価対象施設		—
	(燃料設備 (タンクローリー))	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
第 58 条 (計装設備)	重大事故等発生時の計装 (SA 時計装一式) [RPV 温度・圧力・水位] [RPV・格納容器への注水量] [格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・酸素濃度・放射線量率] [未臨界監視] [最終ヒートシンクによる冷却状態の確認] [格納容器バイパス監視] [水源の確保] [原子炉建屋内水素濃度]	防止設備・緩和設備	C/B R/B Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
第 59 条 (原子炉制御室)	中央制御室及び生体遮蔽	防止設備・緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	中央制御室居住性 (空調機)	防止設備・緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	中央制御室待避室及び生体遮へい	緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2
	中央制御室待避室加圧用ポンペ	緩和設備	C/B	防火帯による防護 建屋による防護※2

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (11 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所※1	影響評価及び防護
第 60 条 (監視測定設備)	可搬型モニタリング・ポスト	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	放射線サーベイ機器 [可搬型ダスト・よう素サン プラ, GM 汚染サーベイメータ, NaI シンチレーシ ョンサーベイメータ, 電離箱サーベイメータ, ZnS シンチレーションサーベイメータ]	防止でも緩和でもない設備	免震重要棟 R/B (5 号炉)	防火帯による防護 建屋による防護※2
	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	防火帯による防護 熱影響評価
	可搬型気象観測装置	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	防火帯による防護 熱影響評価
	モニタリング・ポスト用発電機	防止でも緩和でもない設備	屋外	防火帯による防護 熱影響評価

※ 1 : 可搬型 SA 設備保管場所 : 可搬型重大事故等対処設備保管場所

※ 2 : 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (1 2 / 1 3)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	場所	影響評価及び防護
第 61 条 (緊急時対策所)	緊急時対策所 [KK 5 T S C] 及び生体遮蔽	防止設備・緩和設備	R/B (5 号炉)	防火帯による防護 建屋による防護※
	緊急時対策所 [KK 5 T S C] 居住性 (空調機)	防止設備・緩和設備	R/B (5 号炉)	防火帯による防護 建屋による防護※
	5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所用可 搬電源設備	防止設備・緩和設備	屋外	防火帯による防護
	プラントのデータ表示システム [KK 5 T S C データ伝送装置, SPDS 表示装置等]	防止でもない 緩和でもない 設備	R/B (5 号炉) (屋外設備含 む)	防火帯による防護 建屋による防護※
	緊急時対策所 [免震重要棟 TSC] 及び生体遮蔽	防止設備・緩和設備	免震重要棟	防火帯による防護 建屋による防護※
	緊急時対策所 (免震重要棟 TSC) 居住性 (空調機)	防止設備・緩和設備	免震重要棟	防火帯による防護 建屋による防護※
	免震重要棟ガスタービン発電機	防止設備・緩和設備	免震重要棟	防火帯による防護 建屋による防護※
	プラントのデータ表示システム [免震重要棟 TSC データ伝送装置, SPDS 表示装置等] (通信連絡設備)	防止でも緩和 でもない設備	免震重要棟 (屋外設備含 む)	防火帯による防護 建屋による防護※
		→62 条に記載	—	

※：各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載

第 4-4 表 重大事故等対処設備 (13 / 13)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	場所	影響評価及び防護
第 62 条 (通信連絡を行うために必要な設備)	所内通信	携帯型音声呼出電話設備	防止設備・緩和設備	R/B, T/B, C/B, Rw/B	防火帯による防護 建屋による防護※
	所内外通信	衛星電話設備, 無線連絡設備 (所内通信)	防止でも緩和でもない設備	C/B, 免震棟, R/B(5号炉) (屋外設備含む)	防火帯による防護 建屋による防護※ 建屋内設備は影響なし。屋外設備は分散配置された代替設備 (有線系, 無線系, 衛星系) により機能維持可能
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備, データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	C/B, 免震棟, R/B(5号炉) (屋外設備含む)	防火帯による防護 建屋による防護※ 建屋内設備は影響なし。屋外設備は分散配置された代替設備 (有線系, 衛星系) により機能維持可能

※: 各建屋の防火帯外縁からの離隔距離を第 4-1 表に記載



森林火災による影響評価について

## 1. はじめに

本評価は、発電所敷地外で発生する火災に対して安全性向上の観点から、森林火災が発電所へ迫った場合でも発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。2章にて火炎の到達時間および防火帯幅の評価、3章にて危険距離および温度評価を実施する。

## 2. 火炎の到達時間および防火帯幅の評価

### 2.1 森林火災の想定

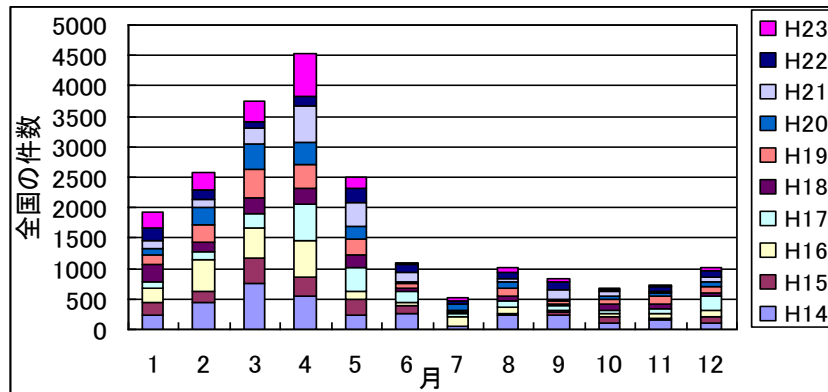
森林火災の想定は以下の通りである。

- ・ 植生データは、森林の現状を把握するため、樹種や生育状況に関する情報を有する自然環境保全基礎調査 植生調査データの空間データを入手し、その情報を元に植生調査を実施した。その結果から、保守的な可燃物パラメータを設定し、土地利用データにおける森林領域を、樹種・林齢によりさらに細分化した。
- ・ 気象条件は過去10年間(2003～2012年)を調査し、森林火災の発生件数の多い3～5月の最小湿度、最高気温、及び最大風速の組合せとする(第2.1-1図)。
- ・ 風向は最大風速観測時の風向および卓越方向とし、発電所の風上に発火点を設定する。気象条件を第2.1-1表に示す。
- ・ 発電所からの直線距離10kmの間で設定する。
- ・ 発火源は最初に人為的行為を考え、道路沿いを発火点とする。発火点位置を第2.1-4図、第2.1-5図に示す。
- ・ 放水などによる消火活動は期待しない。

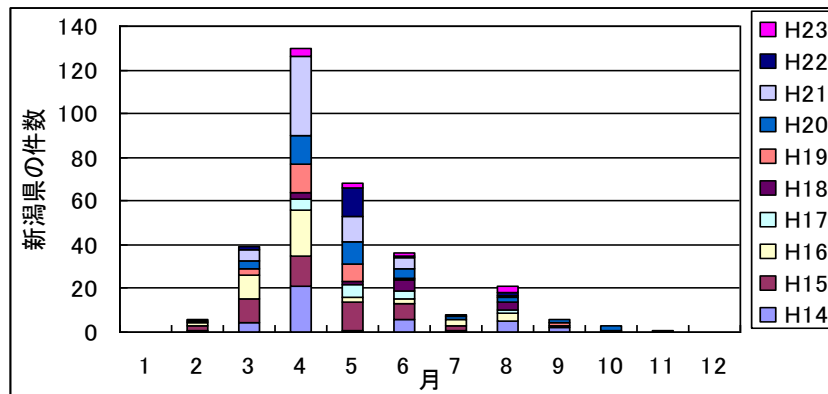
第2.1-1表 気象条件

	風向 [16方位]	3～5月 最大風速[m/s]	3～5月 最高気温[℃]	3～5月 最小湿度[%]
ケース1	南南東	16.0	31.9	12
ケース2	南南東	16.0	31.9	12
ケース3	南東	16.0	31.9	12

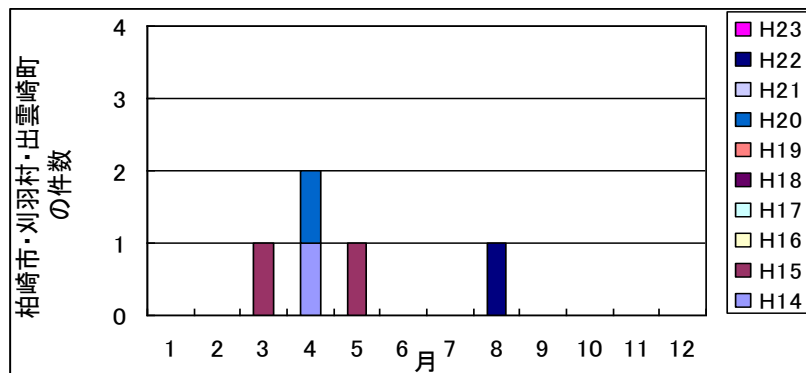
過去10年間の全国、新潟県及び柏崎市・刈羽村・出雲崎町における森林火災発生件数の調査を行い、3～5月にかけて森林火災の発生件数が多いことを確認した。



全国の森林火災発生件数 (平成14～23年)



新潟県の森林火災発生件数 (平成14～23年)



柏崎市・刈羽村・出雲崎町の森林火災発生件数 (平成14～23年)

<出典>

全 国：平成15～24年度版 消防白書（消防庁）より作成

新潟県：平成15～24年度版 消防防災年報（新潟県）より作成

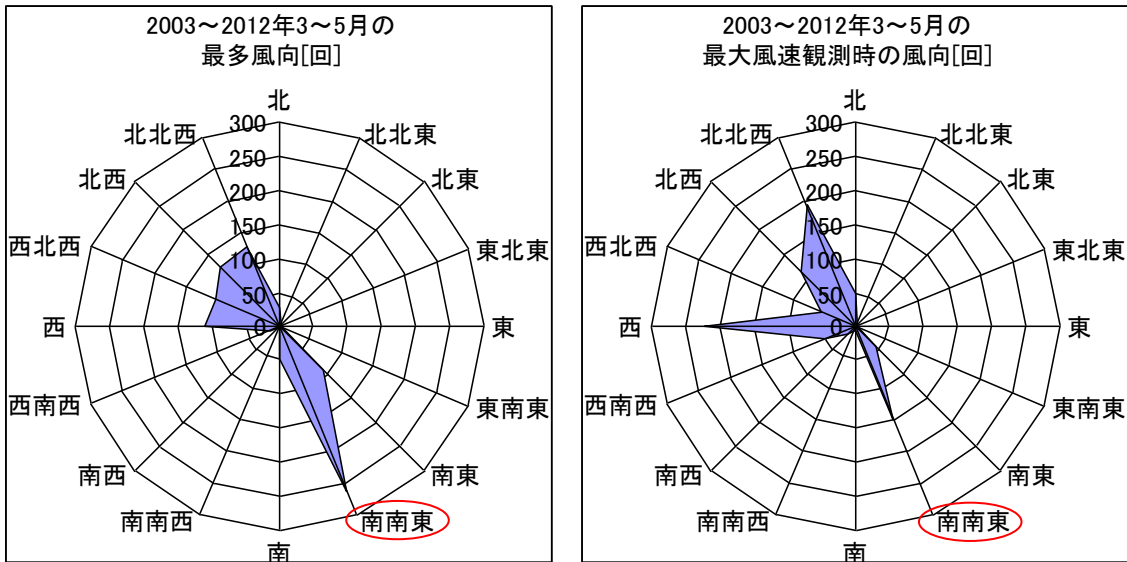
柏崎市：平成15～24年度版 消防年報（柏崎市）より作成

第2.1-1図 森林火災の多い月の調査

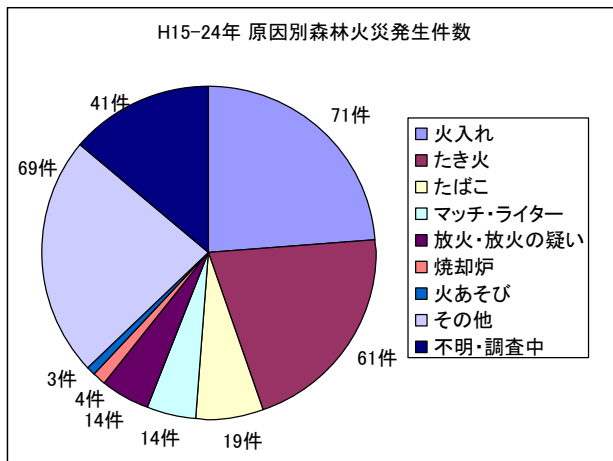
(1) 発火点の設定方針

- ・ 発電所からの直線距離 10km の間に設定する。
- ・ 陸側方向（発電所の西側が海）の発電所風上を選定する。
- ・ 風向は、最大風速記録時の風向と卓越風向の風である南南東を選定する（第 2.1-2 図）。
- ・ 人為的行為を考え、交通量が多く火災の発生頻度が高いと想定される国道沿いを選定する。

なお、平成 15～24 年度の新潟県の林野火災の主な発生原因は、第 2.1-3 図に示すとおり、件数の多い順で火入れ 71 件、たき火 61 件、たばこ 19 件となっている。いずれの発生原因も、民家、田畑周辺あるいは道路沿いで発生する人為的行為となっている。



第 2.1-2 図 最多風向および最大風速観測時の風向



新潟県報道資料「全火災の総合出火原因別・主な経過別損失状況及び月別出火件数」より作成

第 2.1-3 図 新潟県の森林火災の出火原因割合（H15～24 年）

## (2) 立地条件を考慮した発火点の設定

### (ケース 1)

発電所近隣からの発火の方が防火帯周辺に火災が到達するまでの時間が短くなることから、発電所敷地境界周辺の国道 352 号線沿いの発火を想定する。防火帯までの距離が短くなる南南東方向の国道 352 号線沿いに発火点を選定する。(防火帯から約 0.6km)

### (ケース 2)

発電所遠方からの発火の方が火災の規模が大きくなる(火災前線が広がり、発電所構内を同時期に取り囲むような火災となる)ことから、国道 8 号線沿いの発火を想定する。火入れ・たき火などによる火災も考慮し、家屋・田畑がある南南東方向の国道 8 号線沿いに発火点を選定する。(防火帯から約 3.4km)

### (ケース 3)

卓越風向として南東方向からの風も一部存在すること、および防火帯までの距離が南南東方向より短くなることから、参考のため防火帯までの距離が短くなる南東方向の国道 352 号線沿いに発火点を選定する。(防火帯から約 0.4km)

なお、国道 116 号からの発火については、火災が到達する時間はケース 1 およびケース 3 の方が短くなり、火災の規模はケース 2 の方が大きくなることから、評価は包絡される。

## (3) 森林火災評価における発火点の妥当性

### (ケース 1, 3)

ケース 1, 3 の発火点周辺は、マツ 40 年生以上(評価では 10 年生のデータを入力)の植生が広がっており発電所に向けて下り勾配である。敷地周辺道路沿いで発火地点をずらした場合においても植生及び傾斜に差がないことから評価結果に違いが出ることはない。

### (ケース 2)

ケース 2 の発火点周辺は、水田が広がっており平坦な地形である。国道沿いで発火地点をずらした場合においても、植生及び傾斜に差がないことから評価結果に違いは出ることはない。発電所に向けて上り勾配であり、上り勾配の方が火災の規模が大きくなることから保守的な設定である。

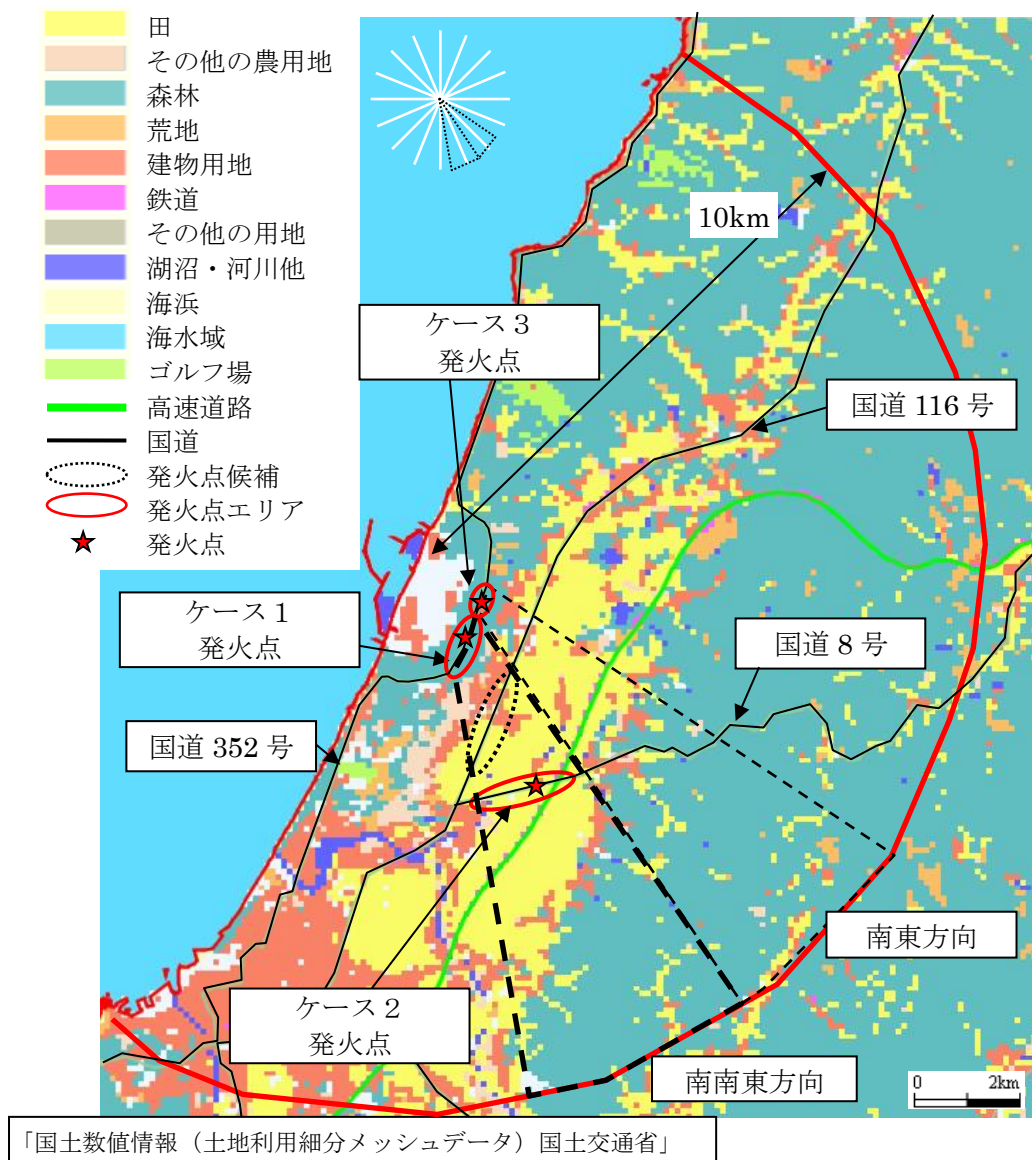
また、南東方向遠方については、以下の理由から評価対象外とした。

ケース 2 において火災の規模が大きくなる場合を考慮し、南南東方向遠方からの発火を想定している。南南東方向遠方と南東方向遠方の植生を比較すると、発

火点から発電所構内に向けて“田→市街地→森林→発電所構内”と同様な植生である。また、卓越風向の出現割合は南南東方向の3割程度と少ない。発電所構内を同時期に取り囲むという観点から考えると、最も風向の出現頻度の多い南南東方向を実施することで代表される。

(4) 発火時刻の設定

日照による草地及び樹木の乾燥に伴い、火線強度が増大することから、これらを考慮して火線強度が最大となる発火時刻を設定する。



第 2.1-4 図 想定発火点位置



第 2.1-5 図 発火点位置詳細

出典：国土地理院ホームページ

## 2.2 森林火災による影響の有無の評価

### (1) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する森林火災の影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標と観点を以下に示す。

第 2.2-1 表 評価指標と観点

評価指標	評価の観点
延焼速度[km/h]	<ul style="list-style-type: none"> <li>火災発生後、どの程度の時間で発電所に到達するのか</li> <li>発電所に到達し得る火災の規模はどの程度か</li> <li>必要となる消火活動の能力や防火帯の規模はどの程度か</li> </ul>
火線強度[kW/m]	
反応強度[kW/m <sup>2</sup> ]	
火炎長[m]	
火炎輻射発散度 [kW/m <sup>2</sup> ]	
火炎輻射強度 [kW/m <sup>2</sup> ]	
火炎到達幅[m]	

(2) 評価対象範囲

評価対象範囲は発電所近傍の発火想定地点を 10km 以内とし、評価対象範囲は西側が海岸という発電所周辺の地形を考慮し発電所から南に 12km、北に 15km、東に 12km、西に 9km とする。

(3) 必要データ

a. 入力条件

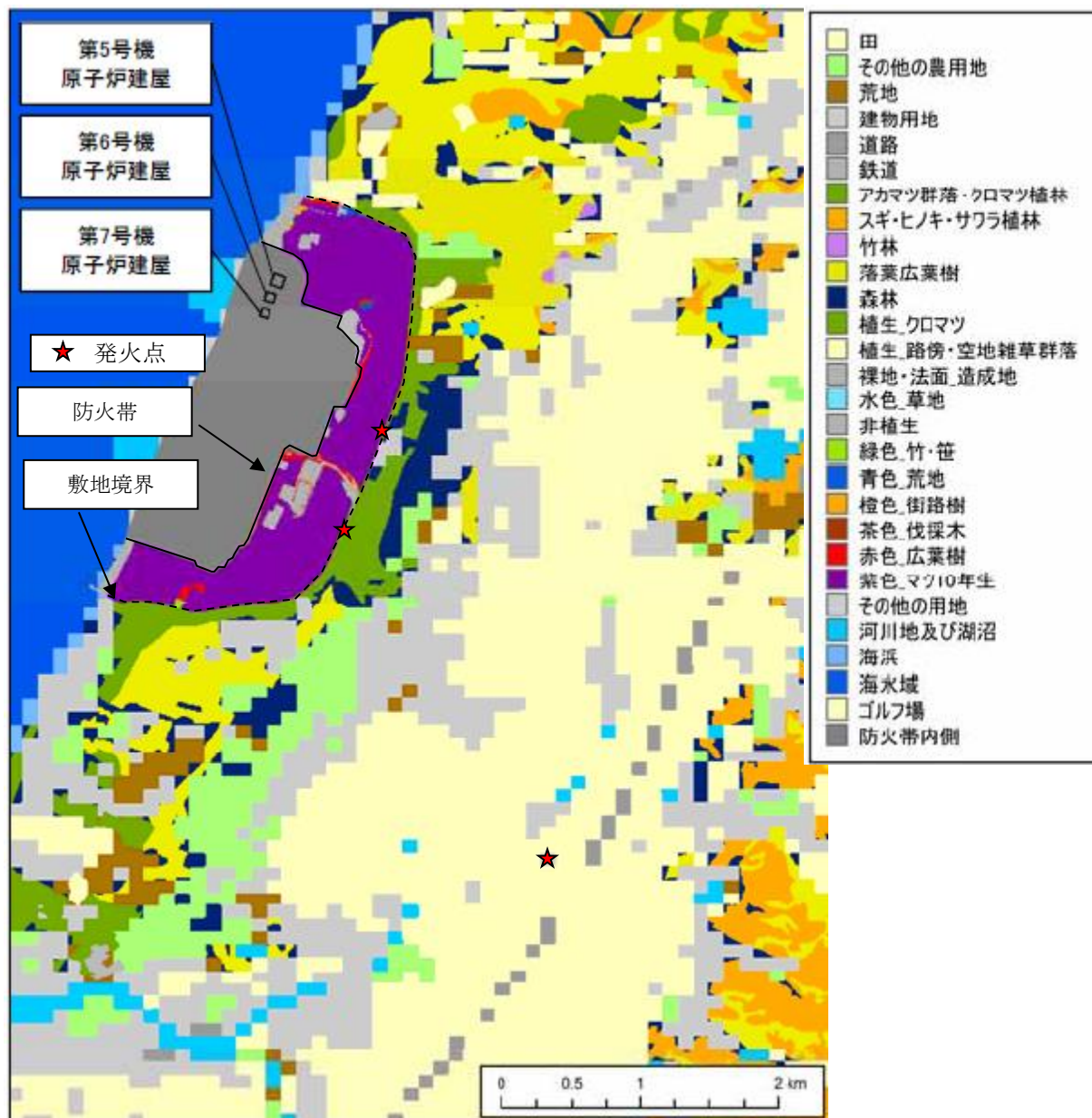
評価に必要なデータ以下の通り設定し、本評価を行った。

第 2.2-2 表 入力条件

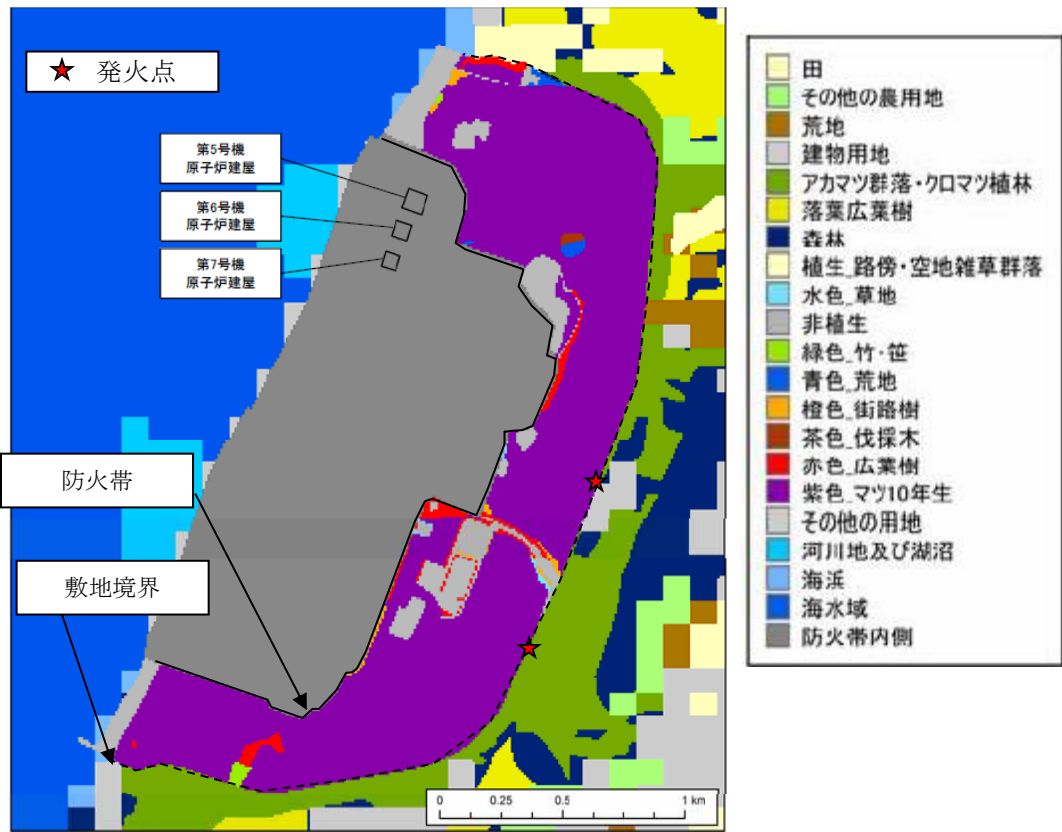
データ種類	内容
土地利用データ	<p>現地状況をできるだけ模擬するため、公開情報の中でも高い空間解像度である 100m メッシュの土地利用データを用いる。 (第 2.2-1 図, 第 2.2-2 図) (国土交通省 国土数値情報 土地利用細分メッシュ H21 年度)</p>
植生データ	<p>現地状況をできるだけ模擬するため、樹種に関する情報を有する環境省 自然環境保全基礎調査 植生調査データ(H18 年度)を用いる。また、現地調査を実施し発電所構外および構内の植生を反映する。(第 2.2-1 図, 第 2.2-2 図)</p>
地形データ	<p>現地の状況をできるだけ模擬するため、公開情報の中でも高い空間解像度である 10m メッシュの標高データを用いる。傾斜度、傾斜方向については標高データから計算する。(第 2.2-3 図) (国土地理院基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュ H20 年度)</p>






気象データ	現地にて起こり得る最悪の条件とするため、森林火災の発生件数が多い3～5月の過去10年間(2003～2012年)の最大風速, 最高気温, 最小湿度の条件を採用する。(第2.2-1表)
-------	--

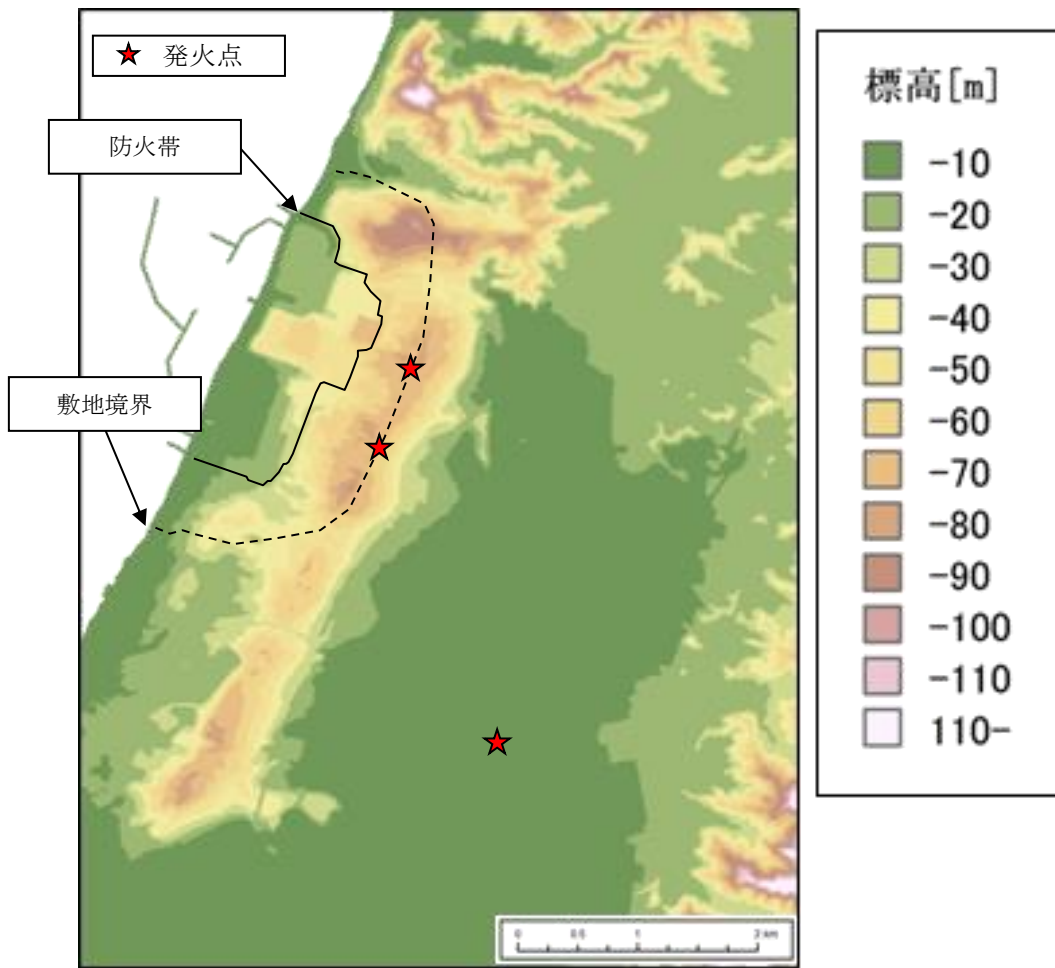


第2.2-1 図 土地利用・植生データ (広域)



植生サンプル			
<p>落葉広葉樹</p> <p>広葉樹が群生しているエリアについては、「落葉広葉樹」とする。</p> 	<p>マツ</p> <p>林床に下草が存在することを考慮し保守的に一律10年生の可燃物データとする。</p> 	<p>荒地</p> <p>草の繁殖を考慮し「Brush」とする。</p> 	<p>竹・笹</p> <p>最も可燃物量, 可燃物深さが大きく火線強度などが高くなる「Chaparral」とする。</p> 

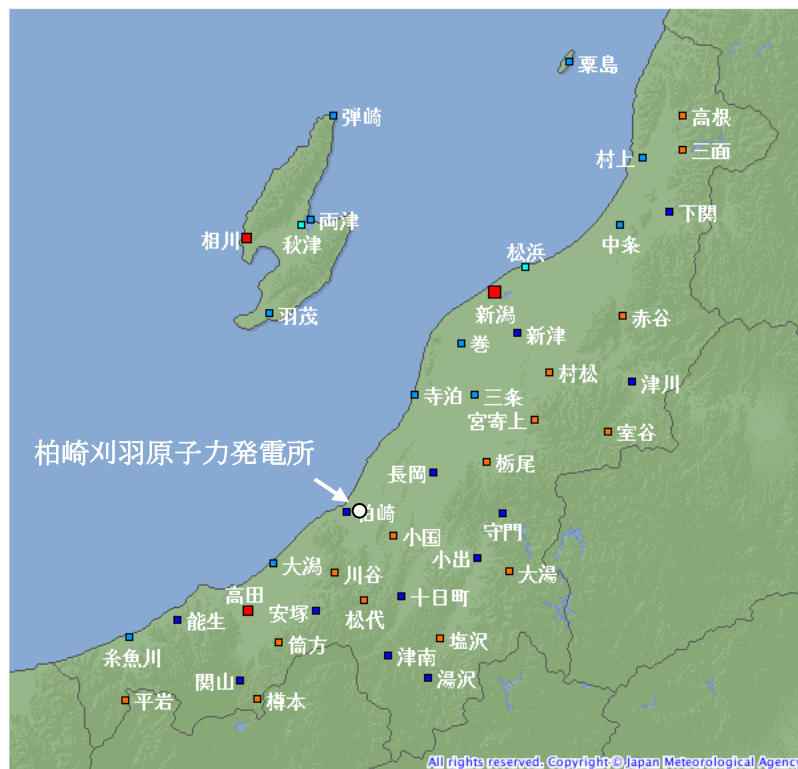
第 2.2-2 図 土地利用・植生データ（発電所周辺）



第 2.2-3 図 標高データ

b. 気象条件の設定

気象データは気象庁が公開している気象統計情報を用い、森林火災発生件数の多い3～5月の過去10年間の気象データを調査し、卓越風向、最大風速、最高気温、最小湿度の条件を選定した(第2.2-1表)。この調査結果に基づきFARSITEの入力値は第2.1-1表の通り設定した。風向、風速および気温は柏崎刈羽原子力発電所付近の柏崎市の地域観測システム(アメダス)(以下「地域気象観測所」という。)の値とした。湿度を観測している観測所は「新潟」「高田」「相川」とあるが、「高田」は発電所とは山越の位置で内陸に位置し、「相川」は離島であることから、最も発電所の気象に近いと考えられる「新潟地方気象台」の値を用いた。新潟県における気象統計情報の観測所位置を第2.2-4図に示す。



シンボル	観測所の種類	観測要素
■	気象台	気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深・湿度・気圧
■	測候所・特別地域気象観測所	気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深・湿度・気圧
■	地域気象観測所(アメダス)	降水量
■	地域気象観測所(アメダス)	気温・降水量・風向風速
■	地域気象観測所(アメダス)	気温・降水量・風向風速・日照時間
■	地域気象観測所(アメダス)	気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深

第2.2-4図 新潟県内の気象観測所位置

<出典>

気象庁HP : [http://www.jma.go.jp/jp/amedas\\_h/map39.html](http://www.jma.go.jp/jp/amedas_h/map39.html)

第 2.2-1 表 2003～2012 年の 3～5 月の気象データ

年	月	卓越風向 (柏崎) [16 方位]	最大風速 (柏崎) [m/s]	最大風速観 測時の風向 (柏崎) [16 方位]	最高気温 (柏崎) [℃]	最小湿度 (新潟) [%]
2003	3	北西	8.0	西南西	17.4	21
	4	南南東	11.0	西南西	26.4	18
	5	北北西	8.0	南東	30.6	16
2004	3	南南東	11.0	西南西	23.9	14
	4	西	11.0	西	26.1	15
	5	北西	8.0	西	28.1	22
2005	3	南南東	9.0	北西	16.4	25
	4	南南東	9.0	南西	28.8	17
	5	北北西	7.0	西	29.6	14
2006	3	南南東	10.0	西	19.4	19
	4	南南東	16.0	南南東	22.3	12
	5	南南東	8.0	南東	31.9	20
2007	3	西北西	9.0	西	22.1	30
	4	南南東	10.0	西	22.0	14
	5	西	10.0	西	25.4	15
2008	3	南南東	8.0	西	16.7	26
	4	南東	8.7	西南西	24.1	19
	5	南東	8.6	南南東	28.1	18
2009	3	北西	11.5	南南西	23.6	16
	4	南南東	11.0	西	25.6	13
	5	南南東	10.5	西	29.3	18
2010	3	南南東	13.6	南南西	23.2	24
	4	南南東	13.5	南南東	19.7	20
	5	南南東	13.5	南南東	27.3	21
2011	3	南南東	10.4	西南西	18.1	22
	4	南南東	8.4	西	22.4	17
	5	南南東	11.2	西南西	27.8	19
2012	3	南南東	10.0	西南西	21.3	31
	4	南南東	15.2	西	25.8	31
	5	南南東	9.7	西南西	27.8	23

青枠で囲った箇所が、卓越風向，最大風速，最高気温，最小湿度

c. FARSITE 入出力データ

FARSITE については、保守的な評価となるよう以下の観点から入力値及び入力条件を設定する。

第 2.2-2 表 FARSITE 入力データ

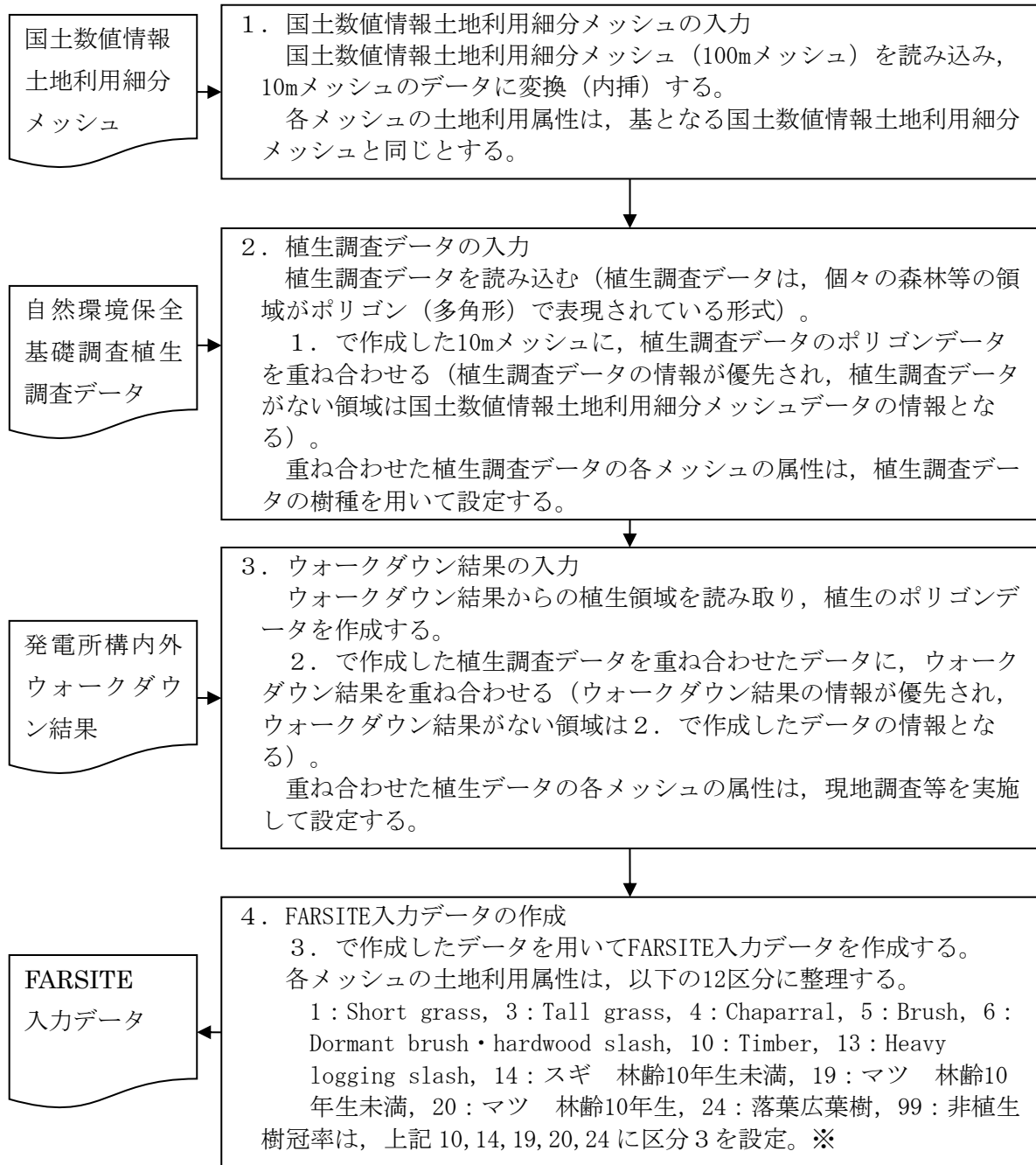
大区分	小区分	入力値	入力値の根拠
気象データ	風速 [km/h]	58	火災の延焼・規模の拡大を図るため、森林火災発生件数が多い月（3～5月）の発電所周辺の最大風速を入力
	風向 [deg]	158 (南南東)	出火地点 1, 2: 気象観測データに基づき 3～5月の最大風速記録時の風向及び最多風向
		135 (南東)	出火地点 3: 気象観測データに基づき 3～5月の最大風速記録時の風向及び最多風向の内、南南東の次に多い風向
	気温 [°C]	32	樹木の燃焼性を高めるため、森林火災発生件数が多い月（3～5月）の発電所周辺の最高気温を入力
湿度 [%]	12	樹木の燃焼性を高めるため、森林火災発生件数の多い月（3～5月）の発電所周辺の最小湿度を入力	
植生データ	場所	—	植生調査データ、現地調査等で特定した樹種毎の植生場所を入力
	樹種	12 区分	植生調査データ、現地調査等で特定した樹種を入力 1: Short grass, 3: Tall grass, 4: Chaparral, 5: Brush, 6: Dormant brush・hardwood slash, 10: Timber, 13: Heavy logging slash, 14: スギ 林齢 10 年生未満, 19: マツ 林齢 10 年生未満, 20: マツ 林齢 10 年生, 24: 落葉広葉樹, 99: 非植生 ※
	林齢	2 区分	植生調査データに基づき、スギ・ヒノキ、アカマツ・クロマツについて、10 年生未満、10 年生の 2 区分を設定
	樹冠率	区分 3	日照や風速への影響を考慮し、針葉樹、落葉広葉樹について、保守的な樹冠率区分（3: 一般的な森林）を入力
土地利用データ	建物, 道路, 湖沼等	—	発電所周辺の建物用地, 交通用地, 湖沼, 河川等を再現（国土交通省データ）
地形データ	標高, 地形	—	発電所周辺の土地の標高, 地形(傾斜角度, 傾斜方向)を再現（国土地理院データ）
時刻データ	発火時刻	—	日照による草地及び樹木の乾燥に伴い, 延焼速度・火線強度が増大することから, これを考慮して火線強度が最大となる発火時刻を設定

※：1～99の数字は、FARSITEの植生番号に対応。

No1～13, 99は、FARSITE内蔵値（FARSITEが保有する可燃物データ）。

No14～24は、福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価（独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）平成24年6月）。

第 2.2-3 表 FARSITE 入力条件の整理 (植生)



※ : 1~99 の数字は、FARSITE の植生番号に対応。

No1~13, 99 は、FARSITE 内蔵値 (FARSITE が保有する可燃物データ)。

No14~24 は、福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価 (独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES) 平成 24 年 6 月)。



第 2.2-4 表 各種土地利用情報と FARSITE 入力データとの関係 (1 / 3)

	土地利用	FARSITE 入力データ		備考
		区分*1	種類	
国土数値情報 土地利用 細分 メッシュ	田	3	Tall grass	森林火災発生件数の多い 3~5 月の田の可燃物量は少ないと考えられるが、保守的に「Tall grass」とする。 JNES-RC-Report*2 と同等な設定
	ゴルフ場	3	Tall grass	ゴルフ場は管理されており可燃物量は少ないと考えられるが、保守的に「Tall grass」とする。 JNES-RC-Report*2 と同等な設定
	その他農用地	4	chaparral	その他農用地となっている箇所は草地の他に果樹園等を含むため、延焼速度が速く、火線強度も高くなる「chaparral 低木の茂み」とする。 JNES-RC-Report*2 より保守的な設定
	森林	10	Timber	延焼速度、火炎長が大きく、火災の勢いが強くなる植生条件である FARSITE の「Timber リターと低木」とする。 JNES-RC-Report*2 より保守的な設定
	荒地	5	Brush	草の繁茂を考慮し、FARSITE の「Brush 茂み」とする。 JNES-RC-Report*2 と同等な設定
	建物用地	5	Brush	植生が連続しておらず、コンクリート等の非植生も多く含まれ延焼しにくいと考えられるが、住宅地沿いの街路樹等を考慮し、FARSITE の「Brush 茂み」とし計算上延焼することとする。 JNES-RC-Report*2 より保守的な設定
	道路	99	非植生	樹木等が無いと考えられるため、「非植生(延焼しない)」とする。 JNES-RC-Report*2 と同等な設定方法。
	鉄道			
その他の用地				
河川地及び湖沼				
海浜				
海水域				

\*1：可燃物データの出典：

No. 1~13, 99 FARSITE 内蔵値 (FARSITE が保有する可燃物データ)

No. 14~24 JNES-RC-Report\*2 の FARSITE 植生データ

\*2：福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価 独立行政法人原子力安全基盤機構 (JNES) 平成 24 年 6 月

第 2.2-4 表 各種土地利用情報と FARSITE 入力データとの関係 (2 / 3)

	土地利用	FARSITE 入力データ		備考
		区分	種類	
自然環境保全基礎調査植生調査データ	アカマツ群落	19	マツ 林齢 10 年生未満	発電所構外のマツの林齢が不明であるため、可燃物データは保守的に「マツ林齢 10 年生未満」とする。
	クロマツ群落			
	スギ・ヒノキ・サワラ植林	14	スギ 林齢 10 年生未満	発電所構外のスギの林齢が不明であるため、可燃物データは保守的に「スギ林齢 10 年生未満」とする。
	竹林	4	chaparral	FARSITE デフォルト植生の中で最も可燃物量、可燃物深さが大きく火線強度などが高くなり保守的な値として「Chaparral」とする。
	オニグルミ群落	24	落葉広葉樹	広葉樹の樹種をひとつにまとめ、「落葉広葉樹」とする。
	コナラ群落			
	ブナ-ミズナラ群落			
	—			
	タニウツギ群落			
	オニグルミ群落			
	ヤナギ低木群落			
	ヤナギ高木群落			
	ハンノキ群落			
	イヌシデ-アカシデ群落			
	エゾイタヤ-シナノキ群団			
	カシワ群団			
チシマザサ-ブナ群団				
コナラ群落				
スタジイ群落				
タブノキ群落				

第 2.2-4 表 各種土地利用情報と FARSITE 入力データとの関係 (3 / 3)

	土地利用	FARSITE 入力データ		備考
		区分	種類	
構内植生調査結果	草地	1	Short grass	管理された植生に対して草の繁殖を考慮し FARSITE デフォルト値の「Short grass」とする。
	竹・笹	4	Chaparral	竹・笹が密集しているエリアは、FARSITE デフォルト植生の中で最も可燃物量、可燃物深さが大きく火線強度などが高くなり保守的な値として「Chaparral」とする。
	荒地	5	Brush	草の繁茂を考慮し、FARSITE の「Brush 茂みとする。」
	街路樹 (中低木)	6	Dormant brush, hardwood slash	草の繁茂を考慮し、FARSITE の「Brush 茂み」よりも林床可燃物の多い「Dormant brush, hardwood slash」とする。
	伐採木の仮置き場	13	Heavy logging slash	伐採木を仮置きするエリアであることから FARSITE のデフォルト値の倒木 (logging slash) の中で最も可燃物量が多く保守的な値として「Heavy logging slash」とする。
	広葉樹	24	落葉広葉樹	現地調査の結果、広葉樹が主な植生のエリアは、「落葉広葉樹」とする。
	構内のマツ林 (10 年生以上)	20	マツ 林齢 10 年生	現地植生調査の結果、20 年生以上のマツでも林床に下草・中低木が存在する箇所があることから、保守的に「マツ 林齢 10 年生」とする。

FARSITE からの出力データ及びその出力データを用いて算出したデータを以下に示す。

第 2.2-5 表 算出結果

大項目	小項目	出力値の内容
FARSITE 出力	火線強度 [kW/m]	火線前線から単位時間に放出される熱量 [防火帯幅の算出]
	火炎長 [m]	火炎の高さ [円筒火炎モデルの形態係数の算出]
	延焼速度 [m/s]	火災の延焼する速さ
	単位面積当たり 熱量[kJ/m <sup>2</sup> ]	単位面積当たりの放出熱量
	火線強度 [kW/m]	火災最前線での単位幅当たりの発熱速度であり、 火炎輻射発散度の根拠となる火災規模
	反応強度 [kW/m <sup>2</sup> ]	単位面積当たりの発熱速度であり、火炎輻射強度 の根拠となる火災規模
	到着時刻 [h]	出火から火災の前線が当該地点に到達するまでの 時間 [火災継続時間の算出]
上記出力 値より算 定したデ ータ	火炎輻射発散度 [kW/m <sup>2</sup> ]	火炎からの輻射強度 [円筒火炎表面の単位面積当たりの発熱速度に火炎 の輻射熱割合を乗じて算出]
	火炎輻射強度 [kW/m <sup>2</sup> ]	火炎からの輻射強度 [反応強度に火炎の輻射熱割合を乗じて算出]
	延焼継続時間 [h]	温度評価に使用するFARSITE上メッシュにおける火 災継続時間 [円筒火炎モデルを用いた温度上昇の算出]
	火炎到達幅 [m]	発電所敷地境界の火線最前線の長さ [円筒火炎モデル数の算出]
	燃焼半径 [m]	燃焼半径を火炎長に基づき算出 [円筒火炎モデルの形態係数の算出]

d. 自然環境保全基礎調査 植生調査データと森林簿との関係

「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」の附属書A「森林火災の原子力発電所への影響評価について」において、植生データの整備にあたって、「森林簿の情報を用いて、土地利用データにおける森林領域を、樹種・林齢によりさらに細分化する」とされている。柏崎刈羽原子力発電所では、個人情報保護の観点から森林簿の入手が困難であったため、環境省自然環境保全基礎調査植生調査データ及び現地調査の結果を用い、森林簿を用いたものと同等の植生データを作成し、評価を実施した。表に、各資料の記載内容の比較と、FARSITE 入力データの設定方針を示す。

樹種について、森林簿と同等の情報が利用可能な自然環境保全基礎調査 植生データ及び現地調査結果に基づき設定し、林齢について、自然環境保全基礎調査 植生データに記載がないが林齢を、水分量が多い生きた木質の可燃物量がより少なく燃焼しやすい、若く保守的な値に設定していることから、森林簿を用いた場合と同等かより保守的な森林火災影響評価結果が得られる。

第 2.2-6 表 植生データ作成に用いる資料の比較と設定方針

FARSITE 入力データ	森林簿 (ガイド 記載)	自然環境 保全調査	現地調査 (構内)	FARSITE 入力データ設定方針
場所	○	○	○	植生調査データ、現地調査等で特定した樹種毎の植生場所を入力
樹種	○	○	○	植生調査データ、現地調査等で特定した樹種を入力
林齢	○	× (保守的に設定)	○	スギ・ヒノキ、アカマツ・クロマツについて、10年生未満、10年生の2区分を用いる 発電所構外については、林齢の特定が困難であることから、保守的に10年生未満を入力 発電所構内については、現地調査の結果を踏まえ入力
樹冠率	×	× (保守的に設定)	× (保守的に設定)	樹冠率については、植生調査からの特定が困難であることから、日照や風速への影響を考慮し、針葉樹、落葉広葉樹について、保守的な樹冠率区分(3:一般的な森林)を入力

○：情報あり，×：情報なし

e. 植生調査の詳細について

植生調査は、発電所構内林および防火帯周辺についてウォークダウンをし、樹種、林齢、低木及び下草の有無を確認した。

(a) 調査内容

発電所構内の森林全域の植生および防火帯予定地に沿って森林側の植生を調査し記録した。(第 2.2-5 図, 第 2.2-6 図)

(b) 調査者の力量

発電所構内の植生について詳しく、かつ 1 級造園施工管理技士の国家資格を有する者が調査を実施した。

(c) 調査期間

2014 年 4 月 23 日～5 月 30 日 (約 40 人日)

(d) 調査結果

現地調査は、発電所構内林 (約 400 点) および防火帯周辺 (約 70 点) で実施した。

第 2.2-7 表 代表的な調査ポイント及び植生調査結果

ポイント	植生調査結果			FARSITE 入力値	
	樹種	林齢	下草	樹種・林齢	下草
①-a	マツ	25 年生以上	約 50cm	マツ 10 年生	約 183cm
②-a	竹	-	約 30cm	Chapparal	約 183cm
②-b	スダジイ	25 年生以上	約 30cm	落葉広葉樹	約 183cm
③-a	マツ	40 年生以上	約 50cm	マツ 10 年生	約 183cm
⑬-a	雑草	-	約 50cm	Brush	約 61cm
⑬-b	伐採木	-	約 60cm	Heavy logging slash	約 91cm
⑯-a	マツ	40 年生以上	無し	マツ 10 年生	約 183cm
⑰-a	シャリンバイ, シロダモなど	30 年生以上	約 30cm	Dormant Brush, Hard Wood slash	約 76cm

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

第2.2-5 図 植生調査エリア



- |  |  |
|--|--|
| <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:cyan; border:1px solid black;"></span> 草地       | <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:lightcoral; border:1px solid black;"></span> 伐採木  |
| <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:limegreen; border:1px solid black;"></span> 竹・笹 | <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:orange; border:1px solid black;"></span> 広葉樹      |
| <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:blue; border:1px solid black;"></span> 荒地       | <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:purple; border:1px solid black;"></span> マツ(10年生) |
| <span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color:yellow; border:1px solid black;"></span> 低中木    |  |

第 2.2-6 図 発電所構内植生図



<p>&lt;竹・笹&gt;        構内で竹が密集しているエリアについては、FARSITE デフォルト植生の中で最も可燃物量、可燃物深さが大きく火線強度などが高くなる「Chaparral」とする。</p>	<p>②-a 竹</p> 
<p>&lt;荒地&gt;        養鶏場の跡地であり、コンクリート基礎（非植生）等で5割程度を占めているが、雑草の繁茂や蔦等が這う可能性を考慮し、全面を「Brush」とする。</p>	<p>⑬-a 雑草</p> 
<p>&lt;中低木&gt;        草の繁茂を考慮し、FARSITE の「Brush 茂み」よりも林床可燃物の多い「Dormant brush, hardwood slash」とする。</p>	<p>⑰-a シャリンバイなど</p> 

第 2.2-7 図 発電所構内の植生（1 / 4）

＜伐採木の仮置き場＞

FARSITE デフォルト値の伐採木 (logging slash) の中で最も可燃物量の多い「Heavy logging slash」とする。

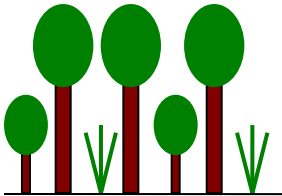
⑬-b 伐採木



＜落葉広葉樹＞

構内で一部広葉樹が群生しているエリアについては、「落葉広葉樹」とする。なお、広葉樹の下草の状況は林齢によってほとんど変わらないことを考慮し、落葉広葉樹の可燃物データは、林床には草や低木が存在する状況を想定している。

②-b スダジイ 25 年生以上



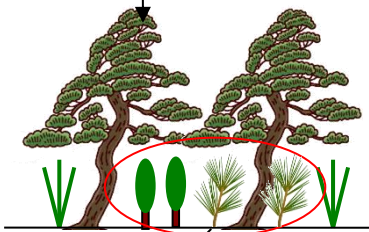
第 2.2-7 図 発電所構内の植生 (2 / 4)

<マツ 10 年生>

発電所構内のマツは 40 年生以上のものが多いが、林床に下草が存在することを考慮し、20 年生以上のマツが存在していたとしても下草が存在する場合は、保守的に一律 10 年生の可燃物データとする。

なお、マツ 10 年生の可燃物データは、林床に草や低木が存在する状況を想定している。

10年生以上のマツ



10年生未満のマツや低木も含む

①-a マツ 25 年生以上



③-a マツ 40 年生以上



⑩-a マツ 40 年生以上



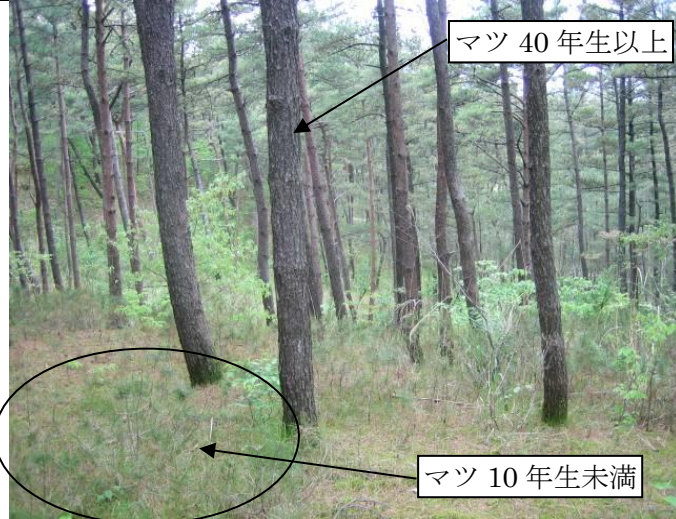
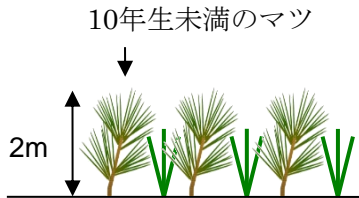
第 2.2-7 図 発電所構内の植生 (3 / 4)

(参考)

<マツ 10 年生未満>

10 年生未満のマツの樹高は 2m 程度である。一面にこれらのマツのみが存在するエリアはマツ 10 年生未満とする。

→発電所構内では、右図のように 40 年生以上のマツの林床に自生する 10 年生未満のマツは存在するが、一面が 10 年生未満のマツのみという植生は存在しない

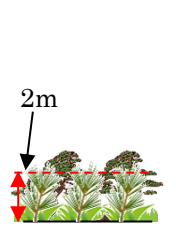
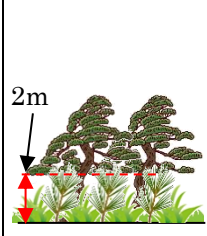
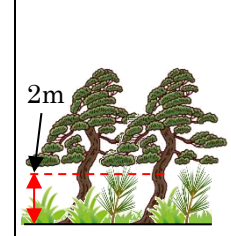
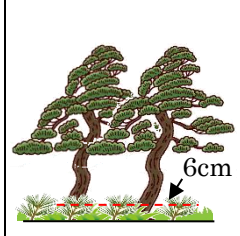
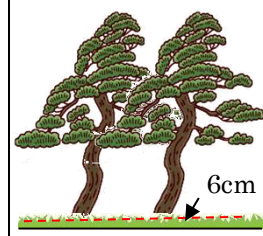


第 2.2-7 図 発電所構内の植生 (4 / 4)

f. FARSITE の入力条件（林齢の設定）

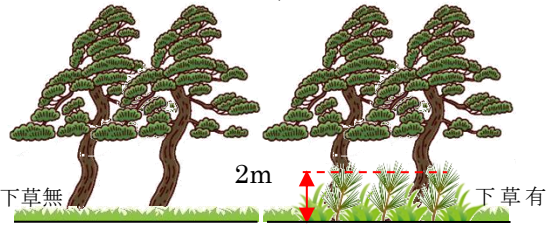

福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価（独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES) 平成 24 年 6 月）では、マツを 10 年生未満から 40 年生以上の 5 つに分類した追加植生データを作成している。10 年生未満、10～20 年生および 20～30 年生のマツについては、FARSITE のデフォルト植生の中で最大の可燃物深さである 2m 程度の下草・低木が有る状況としている。また、林床可燃物量（下草・低木の量）は 10 年生未満および 10～20 年生のマツについては、FARSITE の低層植生の中で最も可燃物量の多い状況としている。なお、生きた木質の fuel 量は、林齢が大きくなるにつれて大きい値を使用している。

第 2.2-8 表 林齢の設定

10 年生未満	10～20 年生	20～30 年生	30～40 年生	40 年生以上
				
下草・低木の状況				
2m 程度の下草や低木がある状態を想定。 (FARSITE のデフォルト植生で最大の可燃物深さを想定)。低木には実生松 (10 年生未満の松) も含まれる。			下草が無い状態を想定 (6cm 程度)	
林床可燃物量				
多		中		少
生きた木質の fuel 量				
少	→	中	→	多

柏崎刈羽原子力発電所構内のマツは、40 年生以上のマツ林の中に 2m 程度の下草や低木があるエリアと下草が無いエリアが存在する。これらの植生は、可燃物深さが大きい 20 年生のマツでモデル化しても保守的であると考えるが、さらに厳しい条件となるよう 10 年生のマツで設定する。

第 2.2-9 表 マツの林齢の設定

柏崎刈羽原子力発電所構内の植生	FARSITE の入力データ
<p style="text-align: center;">40 年生</p> 	<p style="text-align: center;">10 年生</p> 
<p>林床可燃物深さ：0～2m（実生松含む）                      林床可燃物量：少～多                      生きた木質の fuel 量：多</p>	<p>林床可燃物深さ：2m（実生松含む）                      林床可燃物量：多                      生きた木質の fuel 量：少</p>

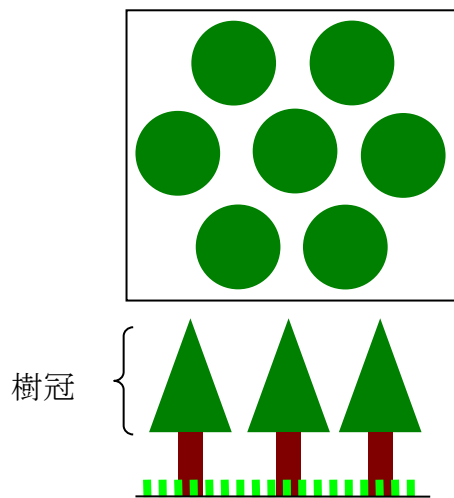
g. 樹冠率の設定

樹冠率は、上空から森林を見た場合の平面上の樹冠が占める割合をいう。

FARSITE では、実際の森林状況による自然現象を可能な限り反映するため、樹冠率の割合が高くなると、風速の低減、地面草地への日照が低減（水分蒸発量が減ることによって燃えにくくなる）する。

具体的には FARSITE において樹冠率を4つに区分し、4つのいずれかを設定するようになっている。今回の評価では、植生調査データにより森林と定義できる区分3、4から選択することとし、保守的に区分3を設定した。

樹冠率：平面上の樹冠の割合



FARSITE 区分	樹冠率[%]	備考
1	～ 20	
2	21 ～ 50	非森林を含む領域
3	51 ～ 80	一般的な森林
4	81 ～ 100	原生林を含む森林

	区分3の場合	区分4の場合
風速低減効果	風速が弱まりにくい	風速が弱まる
日射低減効果	地面下草が燃えやすい	地面下草が燃えにくい

第 2.2-8 図 樹冠率の設定

h. FARSITE への入力値まとめ

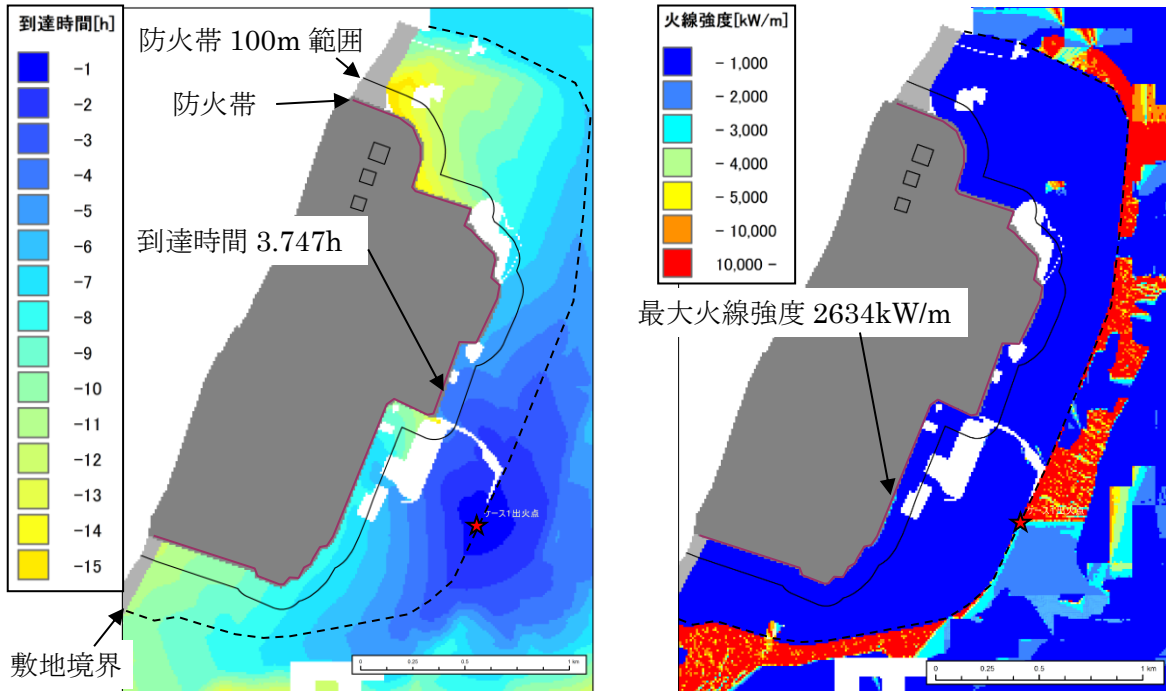
第 2.2-10 表 FARSITE への入力値

大区分	小区分	入力値	備考
気象	気温	32℃	気温が高い方が可燃物の水分量が少なく燃えやすくなることから、森林火災が多い3～5月における過去10年間の最高気温を設定(ガイド通り) 解析期間中最高気温が継続するように設定
	湿度	12%	湿度が低い方が可燃物の水分量が少なく燃えやすくなることから、森林火災が多い3～5月における過去10年間の最小湿度を設定(ガイド通り) 解析期間中最小湿度が継続するように設定
	風速	16m/s	風が強い方が延焼速度・火線強度が大きくなることから、森林火災が多い3～5月における過去10年間の最大風速を設定(ガイド通り) 解析期間中最大風速が継続するように設定
	雲量	0%	日射が多い方が可燃物の水分量が少なくなるため、日射量が多くなるように、雲量0%に設定
	降水量	0mm	降水が無い方が可燃物の水分量が少なくなるため、降水量は0mmに設定
地形	高低差	数値標高モデル	現地状況を模擬するため、基盤地図情報 数値標高モデルの10mメッシュデータを用いる。
	緯度	37度	日射量が多い方が可燃物量の水分量が少なく燃えやすくなることから、日射量が多くなるように、柏崎刈羽原子力発電所の緯度(37度25分)より赤道側に設定
植生	樹木高さ	15m	データを正確に調査することは困難であるため、デフォルト値を一律に適用
	枝下高さ	4m	
	かさ密度	0.2kg/m <sup>3</sup>	
	樹冠率	区分3	森林と定義される区分3,4のうち、風速が弱まりにくく、日射の影響を受けやすくなる区分3を設定
	fuel 初期水分量	コンディショニング機能	水分量は気温・湿度・日射などにより変化する。発火時刻より30日前から現地の状況をシミュレートして初期水分量が平衡に達した状態から発火させる。

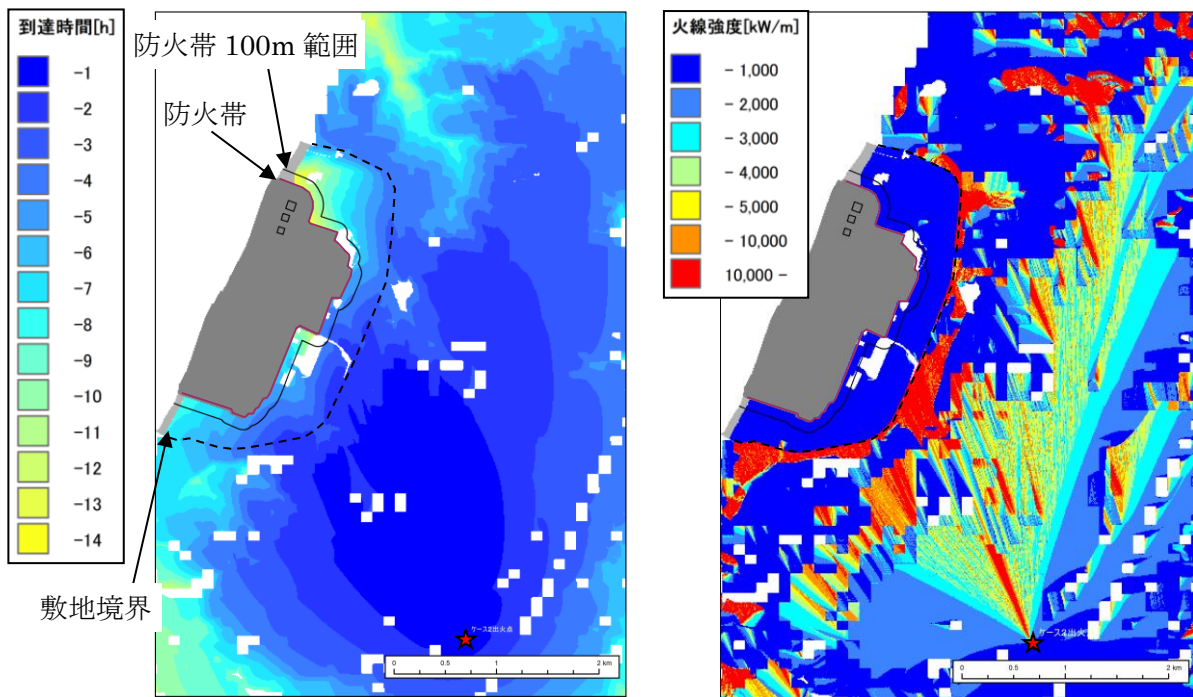


(4) FARSITE の解析結果

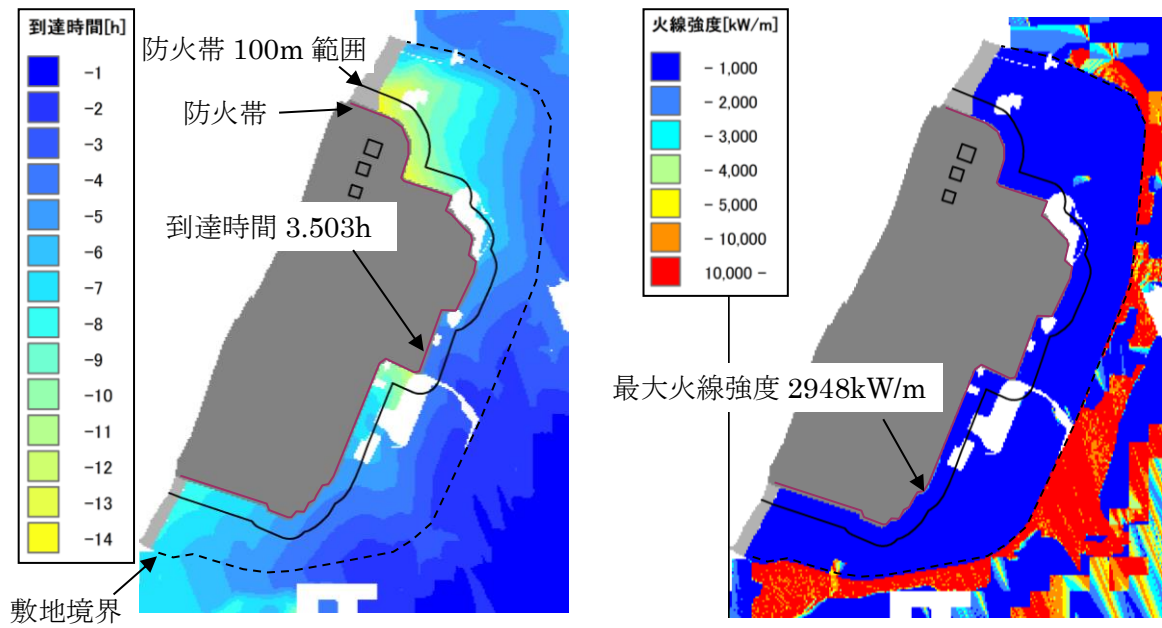
各ケースの FARSITE による解析結果図を以下に示す。



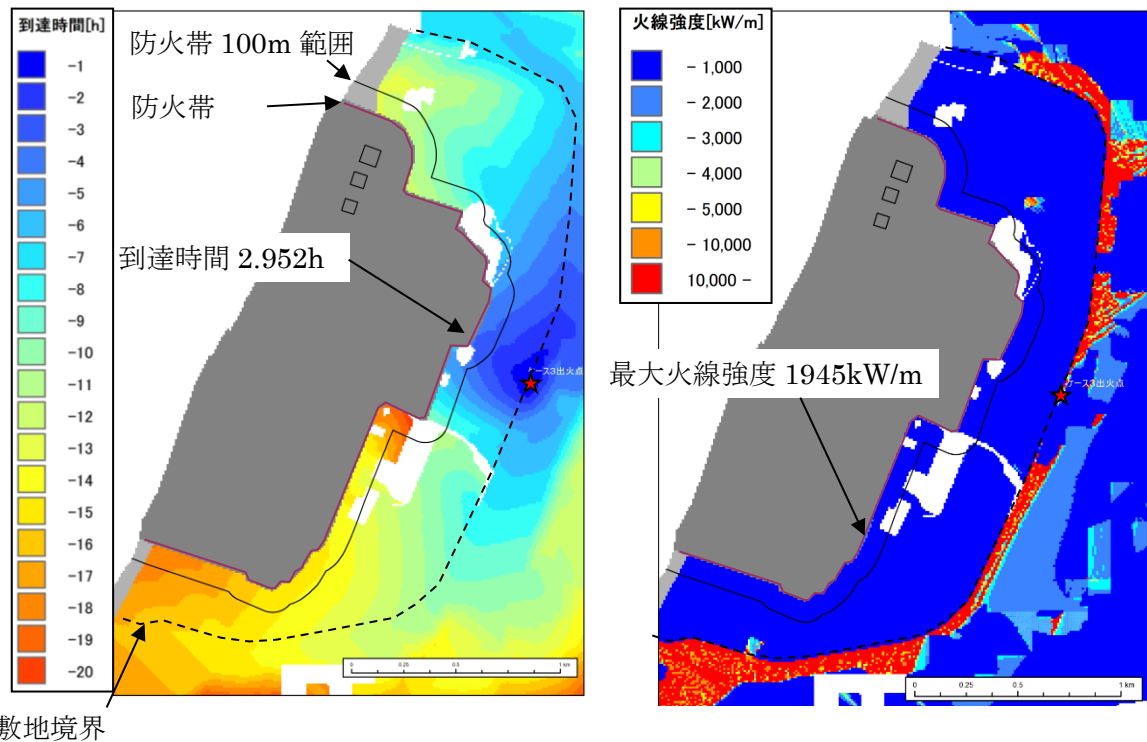
第 2.2-9 図 ケース 1 解析結果（左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布）



第 2.2-10 図 ケース 2 解析結果（左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布）



第 2.2-11 図 ケース 2 解析結果 敷地周辺拡大 (左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布)



第 2.2-12 図 ケース 3 解析結果 (左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布)

(5) 延焼速度および火線強度の算出結果

ホイヘンスの原理に基づく火炎の拡大モデルを用いて延焼速度や火線強度を算出した。防火帯外縁より 100m の範囲における延焼速度及び火線強度の算出結果を第 2.2-11 表に示す。

(6) 火炎の到達時間の算出結果

延焼速度より、発火点から発電所までの到達時間を算出した。また、火炎の到達時間をもとに発電所の自衛消防隊が対応可能であるか否かを評価する。延焼速度および到達時間の算出結果を第 2.2-11 表に示す。

第 2.2-11 表 火炎の到達時間及び防火帯幅評価に伴う評価項目

評価項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
最大延焼速度[m/min]	41.13	36.41	15.44
最大火線強度[kW/m]	2634	2948	1945
火炎の到達時間[hour]	3.747	3.503	2.952

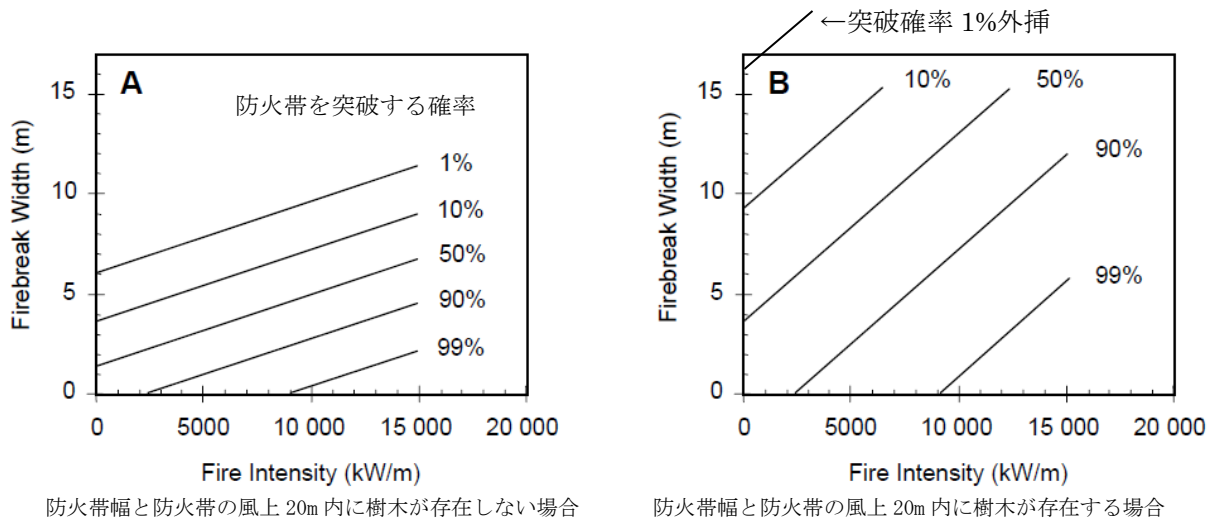
(7) 防火帯幅の算出

火線強度より、発電所に必要な最小防火帯幅を算出した。ここでは「Alexander and Fogarty の手法（風上に樹木が有る場合）」（第 2.2-13 図 右図）を用い、火炎の防火帯突破確率 1%の値を発電所に最低限必要な防火帯幅とした。防火帯外縁より 100m の範囲における最大火線強度は第 2.2-11 表の通りとなり、最も火線強度が高かったケース 2 の結果から防火帯幅を決定する。最小防火帯幅の算出結果を第 2.2-14 図に示す。

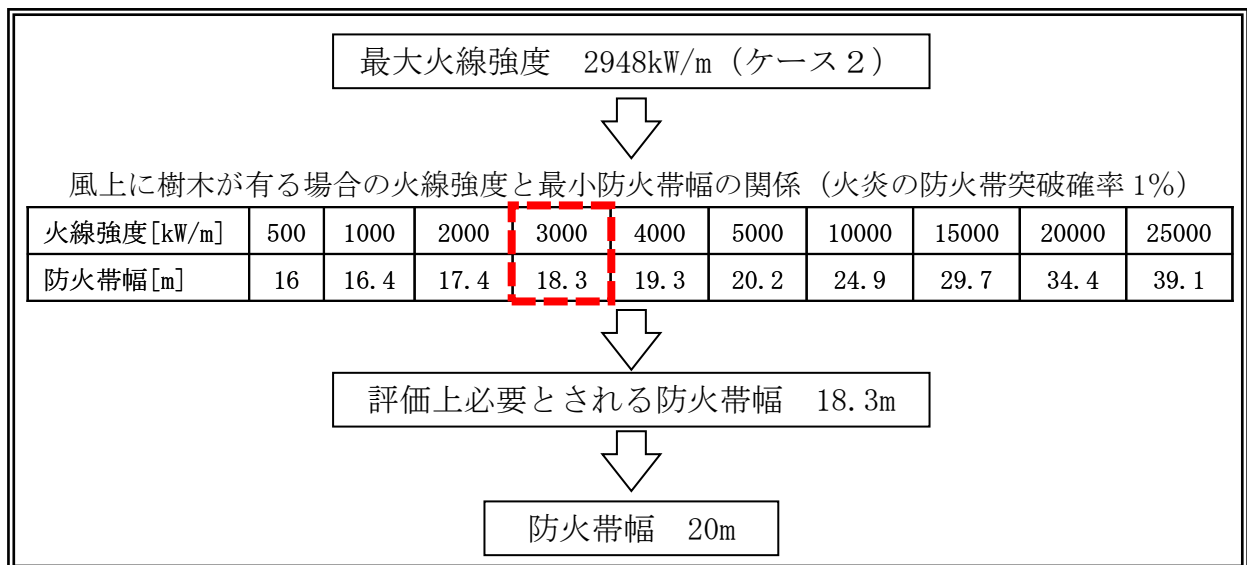
なお、評価では、気温は最高気温で一定、湿度は最小湿度で一定としており、時刻変化による火線強度の増減に寄与するのは日射量となる。そこで、FARSITE 解析における最大火線強度と日照時間の影響を以下の通り確認した。日照の影響は、地形の傾斜方向と太陽の角度が関係しており、火線強度が高くなるのは、10 時～14 時の間と考えられる。表 2.2-12 に示すとおり、最大火線強度到達時刻が 10 時から 14 時の時間に収まっており、火線強度が最大となったケース 2 の火線強度は 2948kW/m であることから、この結果を基に防火帯幅を設定する。

第 2.2-12 表 最大火線強度の日照時間影響の考察

ケース 1	発火日時	5:00	6:00	7:00
	到達日時	12:34	13:03	14:06
	最大火線強度 [kW/m]	2396	2634	2437
ケース 2	発火日時	6:40	7:40	8:50
	到達日時	11:09	12:04	13:24
	最大火線強度 [kW/m]	2711	2948	2803
ケース 3	発火日時	21:00	22:00	23:00
	到達日時	10:54	11:36	12:24
	最大火線強度 [kW/m]	1702	1945	1924



第 2.2-13 図 火線強度に対する防火帯の相関図



第 2.2-14 図 防火帯幅の設定

(8) 危険物施設の火災が森林等に延焼した場合の発電所への影響について

ケース2の発火点は、発電所への熱影響を大きくするため、発電所から遠方（火災前線に広がり、発電所構内を同時期に取り囲むような火災となる）、ならびに、発電所の風上（南南東方向：最大風速観測時の風向及び卓越風向）に設定している。

危険物施設の火災を想定した場合、発電所への熱影響が最大となっているケース2の発火点以遠の風上（南南東方向）に危険物施設はなく、発電所への熱影響が大きくなるような火災にはならないと考えられる。

(9) 3～5月の気象条件に8月を加えた解析結果について

森林火災の想定における気象条件は、過去10年間（2003～2012年）を調査し、森林火災の発生件数の多い3～5月の卓越風向、最大風速、最高気温、及び最小湿度の組合せとしている。3～5月を除く月としては、新潟県、柏崎市・刈羽村・出雲崎町における8月の森林火災発生件数が比較的多いが、3～5月に8月を加えた気象条件を採用すると、発電所立地地域として起こりえないような高気温・低湿度の気象条件となるため、ベースケースの解析条件としていない。

以下に、3～5月に8月を加えた気象条件を考慮した場合の感度解析の結果を示す。

なお、発火点は最大火線強度が大きくなると考えられるケース2の発火点とし、これを代表ケースとして評価を実施した。

a. 気象条件の設定

3～5月の気象条件に8月を加えた気象条件を第2.2-13表（上段）に示す。

第2.2-13表 3～5月に8月を加えた気象条件と3～5月の気象条件との比較

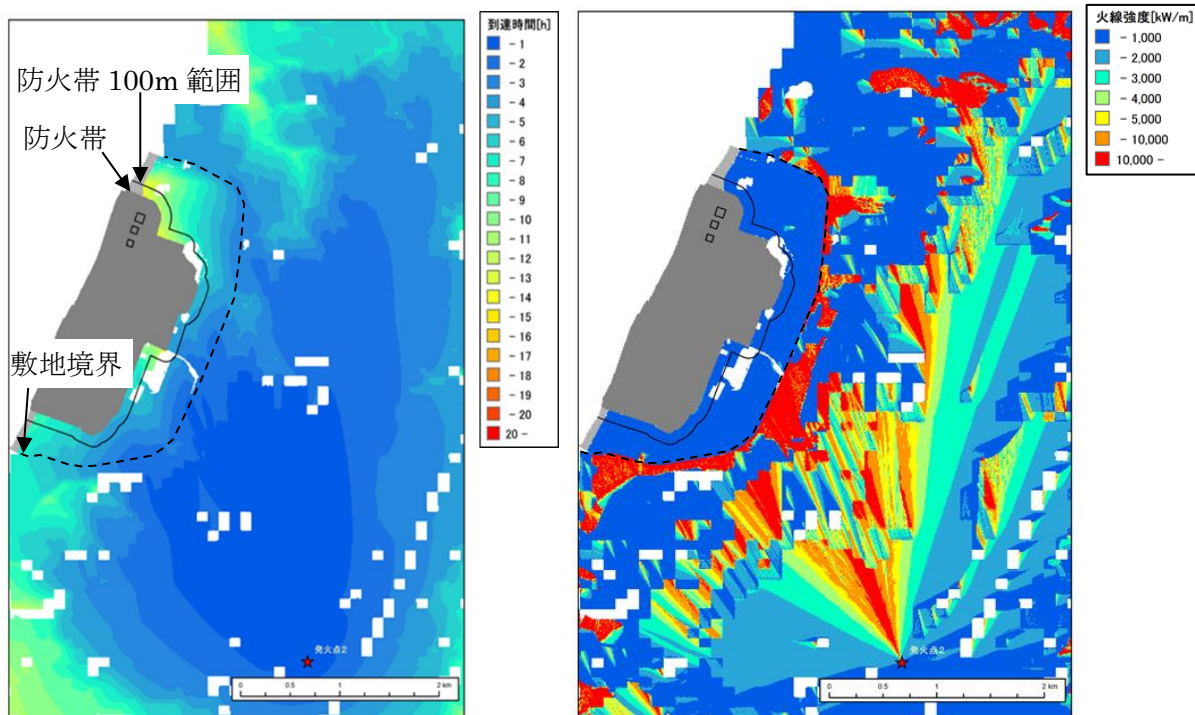
	風向 [16方位]	最大風速 [m/s]	最高気温 [°C]	最小湿度[%]
3～5月 +8月	南南東	16.0	37.5	12
3～5月 (ケース2)	南南東	16.0	31.9	12

b. 必要データ

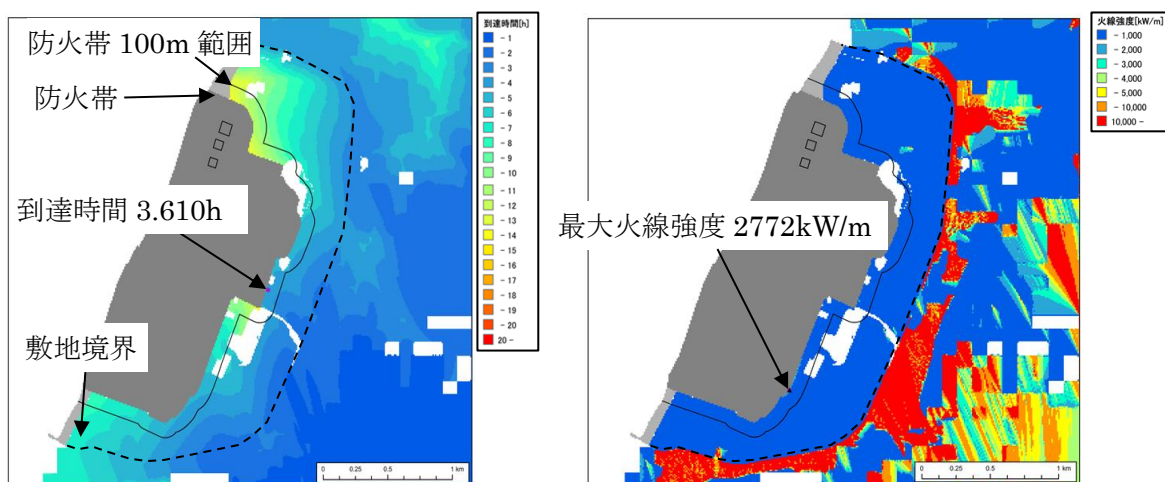
気象条件以外の植生データ等のFARSITE入力データは、ケース2と同等とする。

c. 解析結果

FARSITEによる解析結果を第2.2-15図、第2.2-16図に示す。



第 2.2-15 図 解析結果 (左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布)



第 2.2-16 図 解析結果 敷地周辺拡大 (左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布)

d. 火線強度および火炎の到達時間の算出結果

火線強度および火炎の到達時間の算出結果を第 2.2-14 表に示す。

第 2.2-14 表 火線強度および火炎の到達時間

評価項目	3~5月+8月	3~5月
最大火線強度[kw/m]	2772	2948 <sup>※1</sup>
火炎の到達時間[hour]	3.610	2.952 <sup>※2</sup>

※1：ケース2の火線強度（最大値）

## ※2：ケース3の火炎の到達時間（最小値）

### e. 評価結果

8月の気象条件を加えたケースは、3～5月の気象条件に対して、最大火線強度が180kw/m程度小さくなっていることから、発電用原子炉施設への熱影響はケース2の評価に包絡される。

最大火線強度が低下した主な原因として、FARSITEに入力する最小湿度は相対湿度であることが挙げられる。これを固定した状態で最高気温を上昇させたため、飽和水蒸気量の増加により絶対湿度も4g/m<sup>3</sup>から5g/m<sup>3</sup>に増加している。その結果、気温上昇の効果（可燃物の水分量が減少し火線強度が上昇する効果）よりも、絶対湿度の増加の効果（可燃物の水分量が増加し火線強度が低下する効果）が大きく最大火線強度が若干低下していると考えられる。

また、火炎の到達時間はケース3以上となっており、自衛消防隊の対応に影響をおよぼすことはないと評価する。

## 2.3 評価結果

森林火災影響評価においては、以下に示す到達时间及び防火帯幅の条件を満足していることを確認した。

### 2.3.1 火炎の到達時間の評価結果

#### 2.3.1.1 到達時間

FARSITEの解析により、森林火災を想定した場合、火炎が防火帯に到達する時間は、発電所敷地境界付近からの出火（ケース3）を想定しても3時間程度である。

防火帯により森林火災が発電用原子炉施設へ影響を及ぼすことはないが、森林火災の状況に応じて防火帯付近へ予防散水を行う。また、外部からの情報により森林火災を認識し、発電所敷地境界へ到達するまでに時間的な余裕がある場合には、発電所構内への延焼を抑制するために敷地境界近傍への予防散水を行う。

#### 2.3.1.2 予防散水に関わる評価

敷地境界域から防火帯までの火炎到達時間が3時間程度であるのに対して、防火帯付近への予防散水は、敷地境界域での火災発見から約50分で開始可能である。

#### <火災の発見>

発電所敷地境界域については、警備員が定期的にパトロールを行っていること、敷地境界監視用カメラにより24時間常時監視（監視場所は防火帯より

内側の監視施設) を行っていることにより、同境界域での火災や火災原因となり得る異常を発見することが可能である。

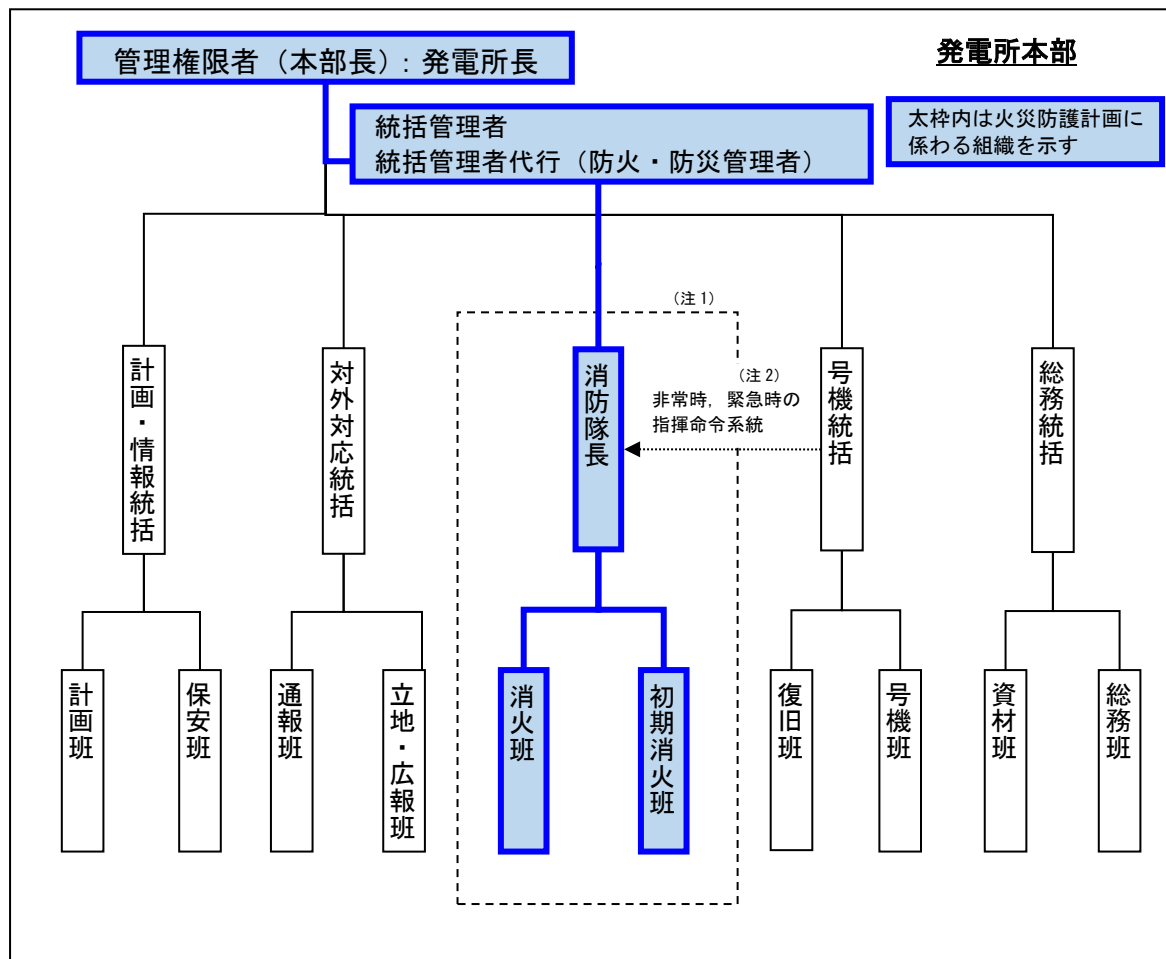
< 予防散水 >

発電所の自衛消防隊は、発電所敷地内に 24 時間常駐していることから、敷地内に待機している消防車による予防散水が可能である。

(1) 予防散水の実施体制

柏崎刈羽原子力発電所においては、発電所構内の火災に対し、消防活動を行うために自衛消防隊を組織している。自衛消防隊の体制については第 2.3.1.2-1 図及び第 2.3.1.2-1 表に示す。

予防散水は、この自衛消防隊により対応する。



注 1 : 自衛消防隊の編成を第 2.3.1.2-1 表に示す。  
 注 2 : 自衛消防隊は非常時対策（一般災害）、緊急時対策（原子力災害）においては号機統括の指揮下で活動する。緊急時対策本部立上後の自衛消防体制については、消防法に基づき作成する消防計画にも定める。

第 2.3.1.2-1 図 自衛消防隊体制



第 2.3.1.2-1 表 柏崎刈羽原子力発電所における自衛消防隊の体制

構成	所属等		役割
消防隊長 (1)	平日昼間：①防災安全GM ②防災安全担当 ③運転管理担当 平日夜間，休祭日：自衛消防隊専属の宿直者		①現場指揮本部の責任者 ②消火活動全体の指揮 ③当直長への消火活動の情報提供・プラント情報の共有 ④公設消防窓口（プラント状況・消火活動の情報提供）
初期消火班 (15) (16) <sup>*1</sup>	当直長(1) <sup>*2</sup>	1号炉[1] 2号炉[1] 3号炉[1] 4号炉[1] 5号炉[1] 6,7号炉[1]	計6名 ①公設消防への通報（発電関連設備） ②当直員（初期消火要員）への初期消火指示 ③プラントの情報提供，消火活動の情報共有 （当直長は現場での消火活動のメンバーには属さない）
	当直員(3) <sup>*2</sup>	1号炉[3] 2号炉[2] <sup>*3</sup> 3号炉[2] <sup>*3</sup> 4号炉[2] <sup>*3</sup> 5号炉[2] <sup>*4</sup> 6,7号炉[3](4) <sup>*5</sup>	計14名 ①屋内・屋外での消火活動（発電関連設備） ②消火戦略の検討・指揮（現場支援担当又は当直主任） ③火災発生場所での消火活動の指揮（現場支援担当又は当直主任） ④火災発生現場（建屋内）への公設消防誘導・説明
	正門警備員(2) <sup>*6</sup>		①屋内・屋外での消火活動（その他区域） ②火災発生現場（構内全域）への公設消防誘導（1）
	放射線測定要員・放射線測定当番(2)		線量測定
	消防車隊	防護本部警備員(1) 委託員(6)	指揮者から消防車隊への指示伝達係 ①屋内・屋外での消火活動
消火班 (30)	副班長：専任(2)，兼任可(1) 班員：専任(16)，兼務可(11)  (専任) 消火専任の要員 (兼務) 機能班との兼務可		【参集状況に応じ，現場にて副班長が役割分担を指名】 ●消火係 ①消火活動（消火器・屋外消火栓等の使用） ●現場整理・資機材搬送係 ①現場交通整理（公設消防車両の誘導） ②火災現場保存（関係者以外の立入規制含む） ③消火活動資機材の運搬（現場指揮本部機材含む） ●情報係 ①発電所本部への情報連絡 ②火災現場での情報収集・記録 ●救護係 ①負傷者の救護 ②総務班医療係到着までの介護

( ) 内は人数

※1：1～5号炉は各号炉15名で構成。6,7号炉は通常15名，6,7号炉同時火災では16名で構成。

※2：発電関連設備での火災発生時が対象。[ ]内は各号炉の初期消火要員。

※3：単独火災発生時は1号炉の初期消火要員1名を補充。

※4：単独火災発生時は6,7号炉の初期消火要員1名を補充。

※5：6,7号炉の何れか一方の号炉の火災では3名で活動。6,7号炉同時火災では当直員1名を補充し4名で活動。

※6：初期消火班警備員(2)は，発電所周辺警備を行うために正門警備所（防火帯外側）に常駐しているが，森林火災発生時には，公設消防を火災現場に誘導する。なお，火災の影響がおよぶ場合には安全な場所へ待避する。

用語の定義

・発電関連設備

周辺防護区域内において，原子力発電所の運転等に直接関係する建物（原子炉建屋等），防護区域外であっては水処理建屋，154kV変電所，66kV開閉所，給水建屋等の当直員の巡視区域の建物等をいう。

・その他区域

発電関連設備以外で，発電所敷地内にある当社所有の建物（事務本館，免震重要棟，防護本部，副防護本部，サービスホール，技能訓練棟，原子炉保修訓練棟，予備品倉庫（大湊），発電倉庫（大湊）等），高台保管場所，森林，伐採木仮置き場等をいう。

## (2) 予防散水計画

防火帯により森林火災が発電用原子炉施設へ影響を及ぼすことはないが、森林火災の状況に応じて防火帯付近へ予防散水を行う。また、外部からの情報により森林火災を認識し、発電所敷地境界へ到達するまでに時間的な余裕がある場合には、発電所構内への延焼を抑制するために敷地境界近傍への予防散水を行う。

なお、万一、防火帯の内側に飛び火した場合は、自衛消防隊の活動を予防散水から防火帯内火災の初期消火活動に切り替え、消火栓及び消防車を使用し、継続して消防隊長の指揮のもと初期消火活動・延焼防止活動を行う。

### a. 予防散水に期待する効果

防火帯は、防火帯突破確率 1 %となる防火帯幅 18.3m に対し、20m の防火帯を設定している。

予防散水は、防火帯付近を濡らすことで火の粉の発生や飛び移りの抑制を図り、防火帯の機能をより強化するために実施する。

### b. 防火帯付近への予防散水計画

- ・活動用水は、構内屋外消火栓<sup>\*</sup>を使用する。
- ・使用資機材は消防車 1 台。対応要員数は 10 名。
- ・防火帯付近散水エリアと消火栓位置を第 2.3.1.2-2 図に示す。また、各散水エリアに使用する消火栓を第 2.3.1.2-2 表に示す。

※：構内屋外消火栓は、外部電源喪失時においてもディーゼル駆動消火ポンプが運転可能であることから使用可能である。万一、構内屋外消火栓が使用不能となった場合には、防火水槽、海水を活動用水として使用する。

第 2.3.1.2-2 表 防火帯付近散水エリアと使用水源

散水 エリア	使用消火栓 (上段：主，下段：補助)	ホース展開距離 (水平距離)	高低差 (消火栓～散水箇所)
A	5号炉屋外消火栓 FH0-8	～770m	14.9m
	5号炉屋外消火栓 FH0-10		(12.3～27.2)
B	発電所構内屋外消火栓⑧	～220m	-10.8m
	発電所構内屋外消火栓⑦		(27.4.～16.6)
C	発電所構内屋外消火栓⑥	～660m	12.3m
	発電所構内屋外消火栓⑪		(42.9～55.2)
D	発電所構内屋外消火栓⑪	～670m	10.9m
	発電所構内屋外消火栓⑥		(44.3～55.2)
E	発電所構内屋外消火栓⑨	～340m	5.4m
	発電所構内屋外消火栓⑤		(39.5～44.9)
F	発電所構内屋外消火栓③，⑤	～290m	3.3m
	発電所構内屋外消火栓②，⑥		(30.4～33.7)
G	発電所構内屋外消火栓②	～400m	9.0m
	発電所構内屋外消火栓①，③，④		(13.1～22.1)
H	発電所構内屋外消火栓②	～720m	-3.9m
	1号炉屋外消火栓 FH0-9， 発電所構内屋外消火栓③		(13.1.～9.2)
I	1号炉屋外消火栓 FH0-9	～720m	4.0m
	発電所構内屋外消火栓②		(5.2～9.2)

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

6条-別添4(外火)-1-添付2-44

第2.3.1.2-2 図 防火帯付近散水エリアと消火栓位置

c. 対応手順と所要時間

対応手順と所要時間を第 2.3.1.2-3 表に示す。また、「(d)訓練実績 (1)森林火災を想定した予防散水訓練実績(防火帯付近)」において、検証した所要時間(実績)を下段に示す。

第 2.3.1.2-3 表 防火帯付近への予防散水手順と所要時間

手順	内容	所要時間							
		0	10	20	30	40	50	60	70
火災発生	(敷地境界まで発見が遅れることを想定)								
火災発見 ～散水指示	警備員が発見し，消防隊長へ連絡								
	消防隊長は，風向き等から火災進行方向を評価し，散水場所を消防車隊へ指示								
出動準備	出動準備～現場到着								
放水準備	水利確保，ホース施設								
	送水								
放水開始	放水開始								

※ 散水エリア A における散水実績

d. 発電所敷地境界への予防散水

発電所周辺の 5 方向を代表ポイントとし，第 2.3.1.2-4 表のとおり発電所敷地境界への予防散水計画を定めた。

- 代表ポイントは，森林火災影響評価において卓越方向と評価した南南東とホース展開に最も時間を要すると考えられる刈羽トンネル方向※を含めることとし，この 2 方向の中間方向となる 3 方向を加え，発電所外周をほぼ等間隔に分割できる 5 ポイントとした。

※：刈羽トンネルポイントは、消火栓からのホース展開距離が最も長く（1500 m）、放水位置の高低差も最も大きい（46.4m）ことから、予防散水の実施条件が最も厳しい。

- ・活動用水は構内屋外消火栓とし、代表ポイントまでホースを展開する。ホース展開距離、消火栓から散水ポイントまでの高低差を考慮し、中継用の消防車を配置する。（第2.3.1.2-4図）

第2.3.1.2-4表 敷地境界への予防散水計画

火災ポイント	①北側ポイント	②刈羽トンネルポイント	③正門ポイント	④南南東ポイント	⑤南側ポイント
消火栓位置	大湊側軽油タンク消火栓	第2企業センター北側消火栓	第2企業センター南側消火栓	青山南通りグランド付近消火栓	青山通り事務本館付近消火栓
ホース展開距離（水平距離）	1,230m	1,500m	525m	900m	675m
高低差（消火栓～散水箇所）	16.5m (12.1～28.6)	46.4m (44.3～90.7)	14.5m (44.3～58.8)	21.8m (30.7～52.5)	24.3m (13.2～37.5)
消防車台数	2台	3台	2台	2台	2台
対応人数（含む指揮者）	指揮者：1名 ホース展開：4名 散水筒先：2名 燃料補給：2名 ホース監視：2名  合計 11名	指揮者：1名 ホース展開：6名 散水筒先：2名 燃料補給：2名 ホース監視：2名  合計 13名	指揮者：1名 ホース展開：4名 散水筒先：2名 燃料補給：2名 ホース監視：2名  合計 11名	指揮者：1名 ホース展開：4名 散水筒先：2名 燃料補給：2名 ホース監視：2名  合計 11名	指揮者：1名 ホース展開：4名 散水筒先：2名 燃料補給：2名 ホース監視：2名  合計 11名
予想準備時間	1.5時間	2.0時間	1.0時間	1.5時間	1.5時間

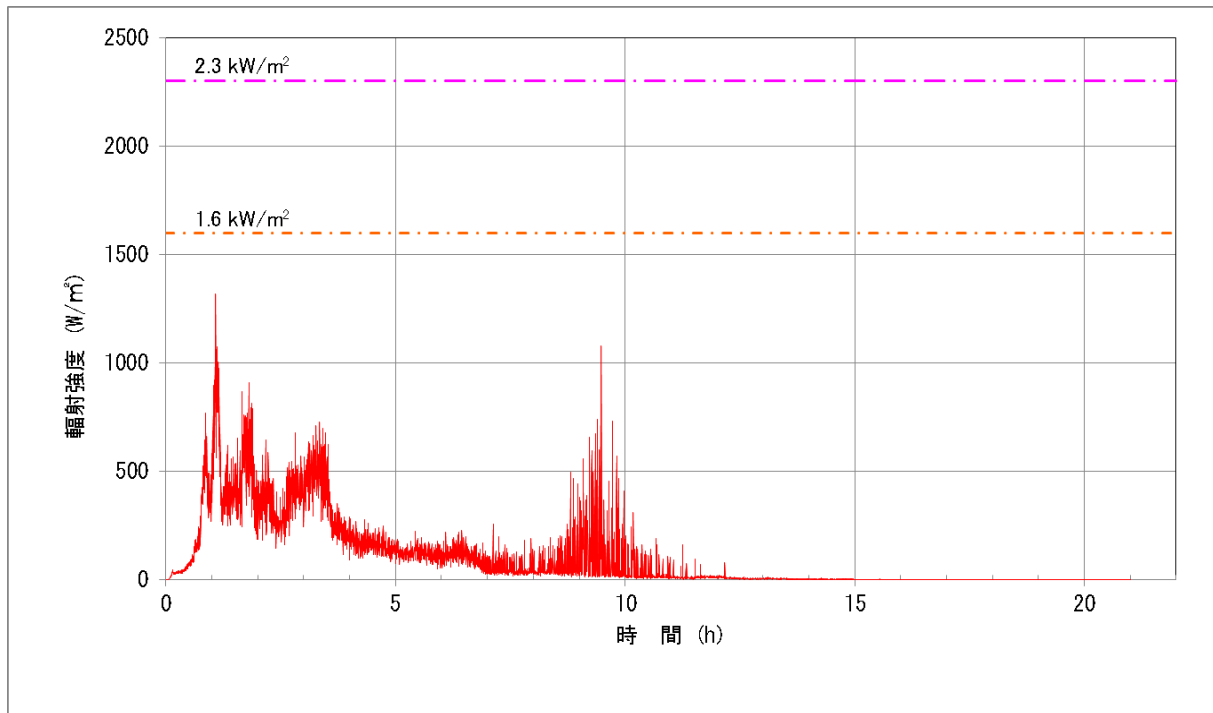
e. 予防散水時のアクセスルート

森林火災が発生し発電所構内へ延焼する恐れがある場合には、構内道路の一部を防火帯として機能させる。その際には、防火帯内の車両通行を規制し、防火帯内から車両がない状態を確立する。（予防散水活動を行う消防車両を除く）

なお、中央交差点ではアクセスルートが防火帯に近接していることから、「3.3 建屋外壁の温度評価」と同様の方法にて、最大火線強度が最も高い評価となった森林火災（ケース2）における輻射強度を算出したところ、当該箇所における森林火災時の輻射強度は最大でも  $1.3\text{kw}/\text{m}^2$  程度※であり、車両等の通行に影響を及ぼすことはないことを確認している。（第2.3.1.2-3図）

よって、車両通行を規制した場合においても、各防護対象設備へのアクセスルートの確保が可能である。（第2.3.1.2-4図）

※：石油コンビナート等防災アセスメント指針では、人が長時間さらされても苦痛を感じない放射熱（輻射）強度を  $1.6\text{kw}/\text{m}^2$  としている。



第 2.3.1.2-3 図 中央交差点における輻射強度の時間

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

第 2.3.1.2-4 図 敷地境界への予防散水



f. 予防散水の検証結果

(a) 森林火災を想定した予防散水（防火帯付近）

実施日：平成26年9月5日（金） 13時50分～15時00分

想定火災到達地点：散水エリアA

内容：散水エリアのうち、最もホース展開距離が長く、また消火栓と放水地点の高低差が大きい散水エリアA地点へのホース展開、散水を行う

評価：

- ・ 消防車1台連結による散水と連結無しの散水を実施。いずれも散水可能であった。
- ・ 消防車出動から散水開始までの所要時間は約30分であった。
- ・ 防火帯散水エリアのうち、最も予防散水の実施条件が厳しいエリアAで散水が可能であることから、全ての防火帯散水エリアに対し、所定の時間内で散水が可能であると評価する。



写真1 散水エリアA



写真2 ホース展開状況



写真3 散水エリアAにおける散水状況

第2.3.1.2-5 図 予防散水の状況（防火帯付近）

(b) 森林火災を想定した予防散水（敷地周辺）

実施日：平成25年10月31日（木） 9時30分～13時30分

想定火災到達地点：刈羽トンネルポイント

訓練内容：ホース展開、消防車連結、散水を行う

評価：

- ・消防車3台連結により実施し、散水可能であった。
  - ・準備開始から散水開始までの所用時間は約2時間であった。
- ※：所要時間は、消火栓やホースの接続位置、操作手順、送水圧力等を確認しながらの時間
- ・最も予防散水の実施条件が厳しい刈羽トンネルポイントで散水可能であることから、発電所敷地境界全域に対して散水が可能であると評価する。



写真4 消火栓接続



写真5 送水状況



写真6 刈羽トンネルポイントにおける散水状況



写真7 参考：ホース延長器（20m×4本）

第2.3.1.2-6 図 予防散水の状況（敷地周辺）

(c) 自衛消防隊の力量維持のための訓練

自衛消防隊は、消火対応の力量を維持するために、第 2.3.1.2-5 表に示す訓練を計画的に実施する。

第 2.3.1.2-5 表 力量維持のための訓練実績

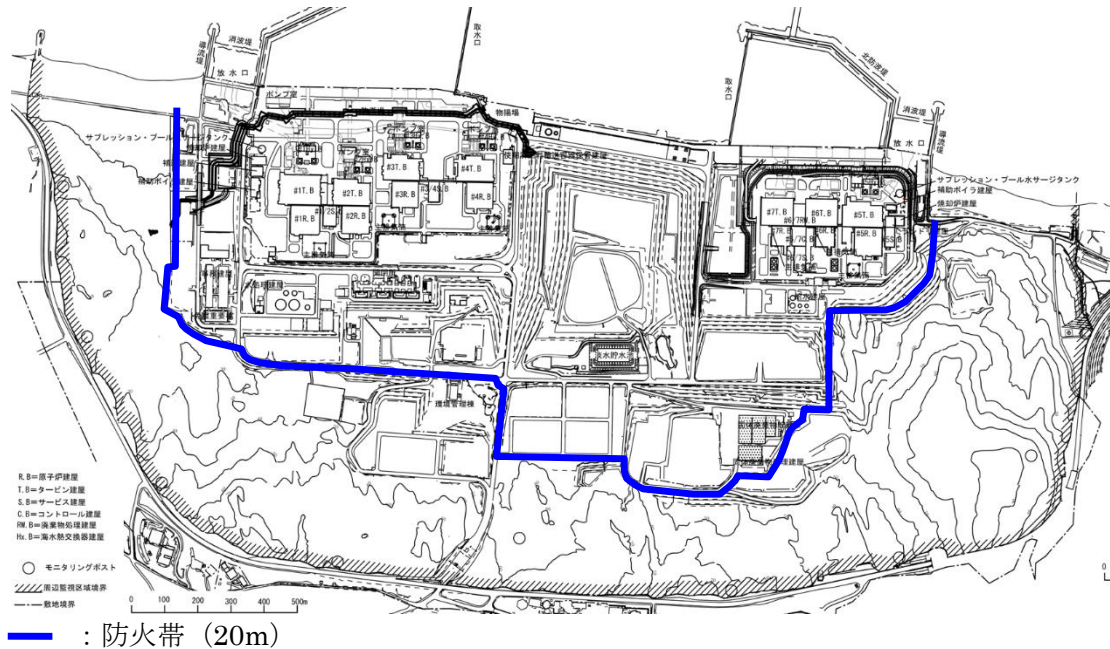
項目	頻度	対象者	訓練内容
消火訓練・消防資機材取扱い訓練	6～10回／月	初期消火班（委託員）	消防車操作，ホース展開，放水に係わる技能訓練，および防火服・耐火服・空気呼吸器の取扱訓練
海上災害防止センター消防訓練	2回／年	初期消火班，消火班	外部施設（横須賀）による実火消防訓練
総合消防訓練	1回／年	自衛消防隊	管理区域内火災を想定した消防署との合同消防訓練
初期対応訓練（通報連絡訓練）	1回／年（当直全班）	初期消火班当直員，警備員	火災発見，通報，現場確認，消火活動の実動訓練（初期消火班連係訓練と連動して実施）
初期消火班連係訓練	1回／年（当直全班）	初期消火班当直員，警備，初期消火班消防車隊（委託員）	火災発見から消防車隊出動，消火活動までの当直と消防車隊の連携訓練
火災対応訓練（当直員）	1回／年（当直全班）	初期消火班当直員	消防用設備取扱訓練，消防車操作訓練，消防署員誘導，人災対応等に関する初動対応教育
自衛消防隊（消火班）訓練・教育	1回／年	消火班	消火設備使用訓練（消防署による指導会含む），消防用資機材取扱教育訓練（現場指揮本部設営含む）

2.3.2 防火帯幅の評価結果

第 2.2-11 表の評価結果から，評価上必要とされる防火帯幅約 18.3m に対し，20m 幅の防火帯を設置する（第 2.3.2-1 図）。

- ・ 森林火災の延焼を防止するために，防火帯を設置する。
- ・ 防火帯は，安全施設および重大事故等対処設備を原則防護するように設定する（防火帯の外側となる設備は，送電線，通信線，気象観測装置および放射能監視設備）。
- ・ 防火帯は，発電所設備及び駐車場の配置状況を考慮し，干渉しないように設定する。
- ・ 防火帯の設定にあたっては，草木を伐採する等，可燃物を排除する。その

後、除草剤の散布やモルタル吹付け等を行い、草木の育成を抑制し、可燃物が無い状態を維持する。また、防火帯の管理（定期的な点検等）の方法を火災防護計画に定める。（別紙2-1）



第 2.3.2-1 図 防火帯設置位置

### 2.3.3 外部火災時のモニタリングポストおよび気象観測装置の対応について

外部火災が発生した場合においても、原子炉を安全に停止するための設備に影響がないように防火帯を設置し、安全上重要な設備はその内側に配置し、外部火災による影響がないことを確認している。

モニタリングポストについては、発電所の周辺監視区域付近における空間線量率の監視を行うために発電所敷地境界付近（防火帯の外側）に9箇所設置している。また、気象観測装置については、風向、風速等を測定、記録するため構内林内（防火帯の外側）に設置している。

測定器は屋外に設置されており、外部火災による影響を確実に防止できるものとは考えないが、可能な限り影響の軽減を図ることから、外部からの情報により森林火災を認識し、発電所敷地境界へ到達するまでに時間的な余裕がある場合には、敷地境界近傍への予防散水を行う。

なお、森林火災の進展によりモニタリングポストおよび気象観測装置の機能が喪失した場合は、防火帯の内側に保管している可搬型モニタリングポスト（バッテリー駆動可能：9台）および可搬型気象観測装置（バッテリー駆動可能：1台）により代替測定を実施する（第2.3.3-1図、第2.3.3-2図）。

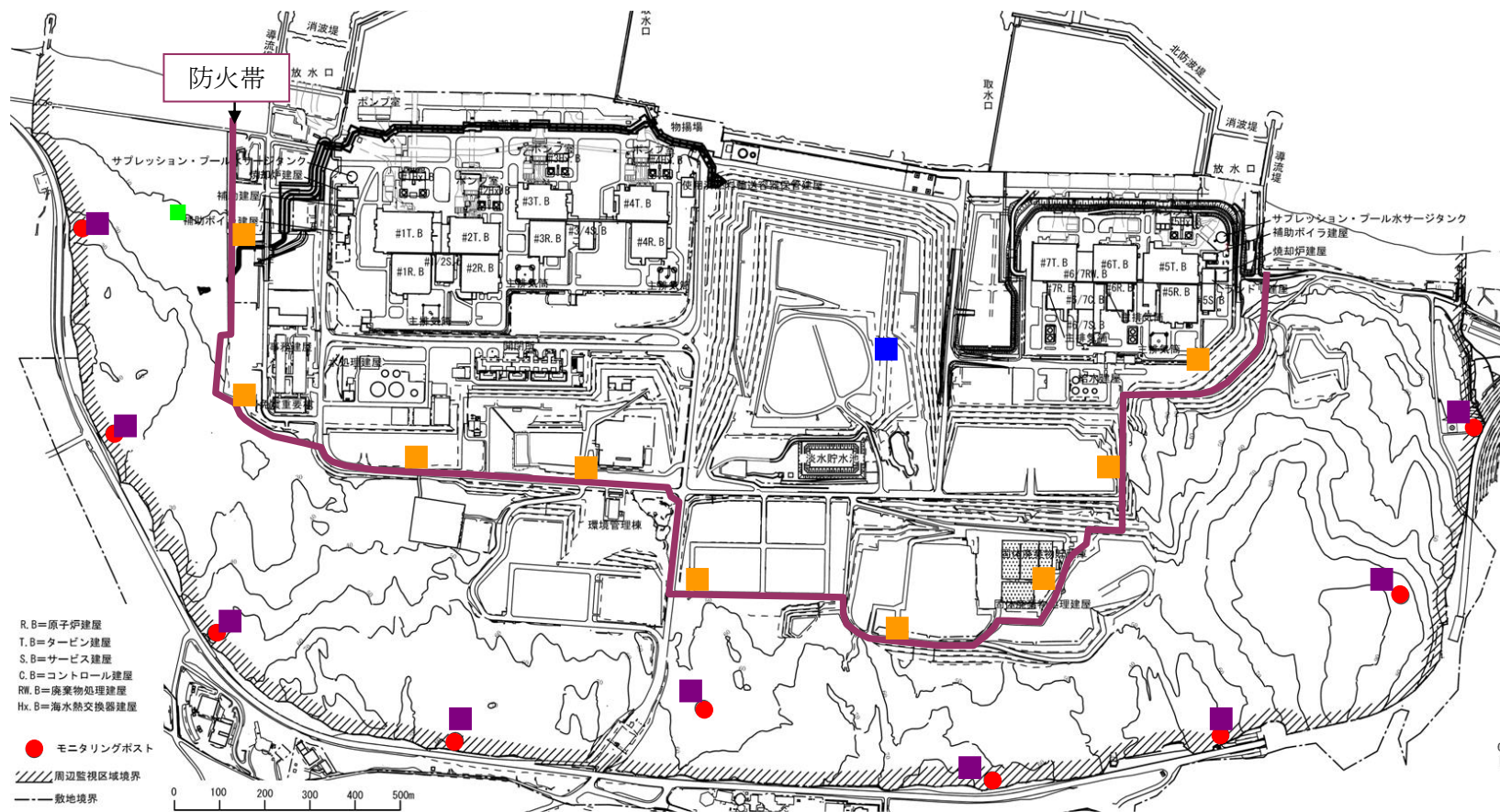
可搬型モニタリングポストがモニタリングポスト周辺に設置できる場合は、その周辺に設置し、森林火災の延焼によりモニタリングポスト周辺に設置でき

ない場合は、発電所構内の同一方向に設置する。可搬型モニタリングポスト等を配置場所まで運搬・設置し、監視・測定を開始するまでの所要時間は、1台当たり約30分を想定（9台設置する場合は、約4時間30分を想定）。

可搬型気象観測装置が気象観測装置周辺に設置できる場合は、その周辺に設置し、森林火災の延焼により気象観測装置周辺に設置できない場合は、周囲に障害物や照明が無いエリアに設置する。



第2.3.3-1 図 可搬型モニタリングポスト（左）、可搬型気象観測装置（右）



R. B=原子炉建屋  
 T. B=タービン建屋  
 S. B=サービス建屋  
 C. B=コントロール建屋  
 RW. B=廃棄物処理建屋  
 Hx. B=海水熱交換器建屋

● : モニタリングポスト  
 〓 周辺監視区域境界  
 - - - 敷地境界

- : モニタリングポスト
  - : 可搬型モニタリングポスト (モニタリングポスト周辺に設置)
  - : 可搬型モニタリングポスト (モニタリングポスト周辺にアクセスできない場合の設置例)
  - : 気象観測装置
  - : 可搬型気象観測装置 (設置例)
- ※現場の状況により配置位置の変更有り

第 2.3.3-2 図 可搬型モニタリングポスト設置位置

### 3. 危険距離および温度評価

#### 3.1 森林火災の想定

前述の 2.1 森林火災の想定と同じ。

#### 3.2 森林火災による影響の有無の評価

##### (1) 評価手法の概要

本評価は、輻射強度という指標を用いて、発電用原子炉施設に対する森林火災の影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

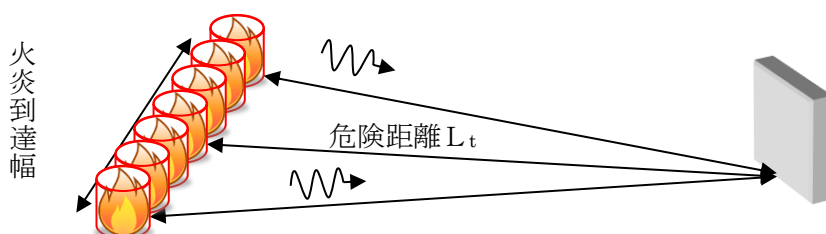
第 3.2-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	火災の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度
火炎到達幅[m]	発電所に到達する火炎の横幅
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	森林火災の火炎長より算出する値
危険距離[m]	火災による輻射熱により許容限界温度になる距離

上記の評価指標は、受熱面が輻射体の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

森林火災の火炎形態については、土地の利用状況（森林、農地、居住地等の分布）、地形（標高、傾斜角度等）、気象条件（風向・風速、気温、湿度等）に大きく依存することから、これらをすべて反映した火炎モデル仮定することは難しい。したがって、森林火災の火炎は円筒火災をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の3倍とする。なお、危険距離の評価では、発電用原子炉施設への火炎到達幅の分だけ円筒火災モデルが横一列に並ぶものとする（第 3.2-1 図）。

各円筒火炎モデルからの輻射熱



第 3.2-1 図 円筒火炎モデルの並べ方

##### (2) 評価対象範囲

評価対象範囲は発電所に迫る森林火災とした。

(3) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3.2-2 表 森林火災影響評価に必要なデータ

評価項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
火炎輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	93.42	99.08	79.38
火炎輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	435.9	440.4	349.3
火線強度[kW/m]	2633	2947	1944
反応強度[kW/m <sup>2</sup> ]	1156	1168	926.6
火炎長[m]	2.90	3.06	2.52
火炎到達幅[m]	3470		
燃焼継続時間[min] <sup>※1</sup>	54	52	58
危険輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	15.372	15.441	15.244

※ 1 : 防火帯周辺の森林（奥行き 100m）が燃える平均時間

(4) 燃焼半径の算出

次の式から燃焼半径を算出する。算出結果を第 3.2-4 表に示す。

$$R = \frac{H}{3}$$

R: 燃焼半径[m], H: 火炎長[m]

(5) 円筒火炎モデル数の算出

次の式から円筒火炎モデル数を算出する。算出結果を第 3.2-4 表に示す。

$$F = \frac{W}{2R}$$

F: 円筒火炎モデル数 [-], W: 火炎到達幅 [m], R: 燃焼半径[m]

(6) 火炎輻射発散度の算出

火災で発生する発熱量から輻射熱に寄与する割合（輻射熱割合）を考慮し、その輻射熱は円筒火炎の側面及び上面から放射されると仮定し、円筒火炎の火炎輻射発散度  $R_f$  [kW/m<sup>2</sup>] を求める。発熱量が保存されるため、以下の式で表現できる。

(円筒火炎 1 個の側面積 + 上部面積 [m<sup>2</sup>]) × 円筒火炎個数 × 火炎輻射発散度 [kW/m<sup>2</sup>] = 火線強度 [kW/m] × 火炎到達幅 [m] × 輻射熱割合 [-]

$$(2\pi RH + \pi R^2) \times F \times R_f = I_B \times W \times \chi$$

また、上記 (4) (5) の式より、以下の式が求まる。火線強度は 2.2 森林火災の影響評価で算出された値を用いた。算出結果を第 3.2-4 表に示す。



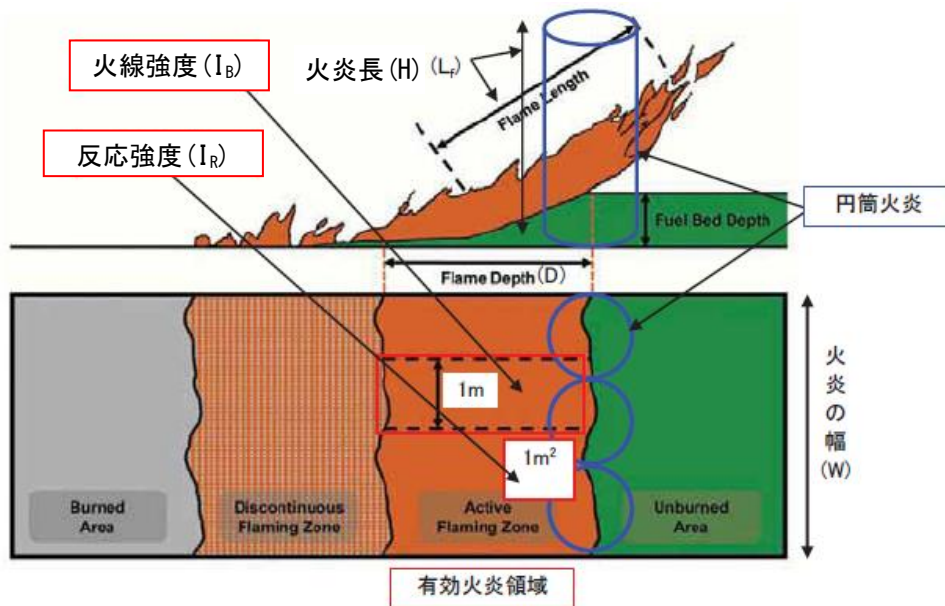
$$Rf = \frac{6\chi I_B}{7\pi H}$$

Rf : 火炎輻射発散度 [kW/m<sup>2</sup>], I<sub>B</sub> : 火線強度 [kW/m], H : 火炎長 [m]

<火炎輻射発散度の算出方法>

火線強度 (I<sub>B</sub>) [kW/m]は、第 3.2-2 図に示すような火炎構造 (幅W[m], 奥行きD[m], 火炎長H[m])において「火炎最前線での単位幅あたりの発熱速度」と定義でき、反応強度 (I<sub>R</sub>) [kW/m<sup>2</sup>]とは次の関係にある。

$$I_B = I_R \times D \tag{1}$$



(出典 : Andrews, P.L., et. al. (2011): How to Generate and Interpret Fire Characteristics Charts for Surface and Crown Fire Behavior. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-253.)

第 3.2-2 図 火線強度および円筒火炎モデルの考え方

火炎輻射発散度を計算するための円筒火炎モデルでは、第 3.2-2 図の有効火炎領域を、火炎の幅 (W) に沿って円筒火炎 (半径 R[m], 高さ H[m]) を F 個一列に並べて模擬する。ここで、有効火炎領域の発熱量のうち輻射熱割合  $\chi$  [-] を考慮し、円筒火炎の側面および上面からの輻射熱として放射されるとして、発熱量が保存されるよう火炎輻射発散度を求める。円筒火炎での火炎輻射発散度を Rf [kW/m<sup>2</sup>] とすると、有効火炎領域の発熱量は保存されることから、以下の式で表現できる。

$$\begin{aligned} & \text{総発熱量 (側面, 上面からの輻射)} \text{ [kW]} \\ & = \text{火線強度 [kW/m]} \times \text{火炎到達幅 [m]} \times \text{輻射熱割合 [-] より} \\ & (2\pi RH + \pi R^2) \times F \times Rf = I_B \times W \times \chi \quad (= I_R \times D \times W \times \chi) \end{aligned} \tag{2}$$

また、評価ガイドより、円筒火炎モデルは

$$R = H/3 \tag{3}$$

$$F = W/2R \tag{4}$$

と定義されるので、(3)、(4)式を(2)式に代入することにより、次式が得られる。

$$R_f = \frac{6\chi_B^2}{7\pi H} \quad (5)$$

発電所敷地近傍には草地、針葉樹、落葉広葉樹がある。そのため、輻射熱割合は、草地：0.35（米国国立標準技術研究所（NIST）の使用値）、針葉樹：0.377ならびに落葉広葉樹：0.371（米国防火技術者協会（SFPE）が発行しているハンドブック（THE SFPE HANDBOOK of Fire Protection Engineering FOURTH EDITION）より算出）のうち保守的に最も大きい値である0.377を採用した。

なお、反応強度は炎から輻射として放出される熱エネルギー（火炎輻射強度）と火炎・煙として対流放熱される熱エネルギー（火炎対流発散度）の和により求められることから、針葉樹の輻射熱割合（0.377）は、針葉樹代表種の火炎輻射強度：4.9[kJ/g]と反応強度：13.0[kJ/g]の比（反応強度に対する火炎輻射強度の割合）から算出した。

#### 針葉樹代表種の発熱量

$$\begin{array}{l} \text{火炎輻射強度：} 4.9 \text{ [kJ/g]} + \text{火炎対流発散度：} 8.1 \text{ [kJ/g]} = \text{反応強度 } 13.0 \text{ [kJ/g]} \\ (\Delta H_{\text{rad}}) \qquad \qquad \qquad (\Delta H_{\text{con}}) \qquad \qquad \qquad (\Delta H_{\text{ch}}) \end{array}$$

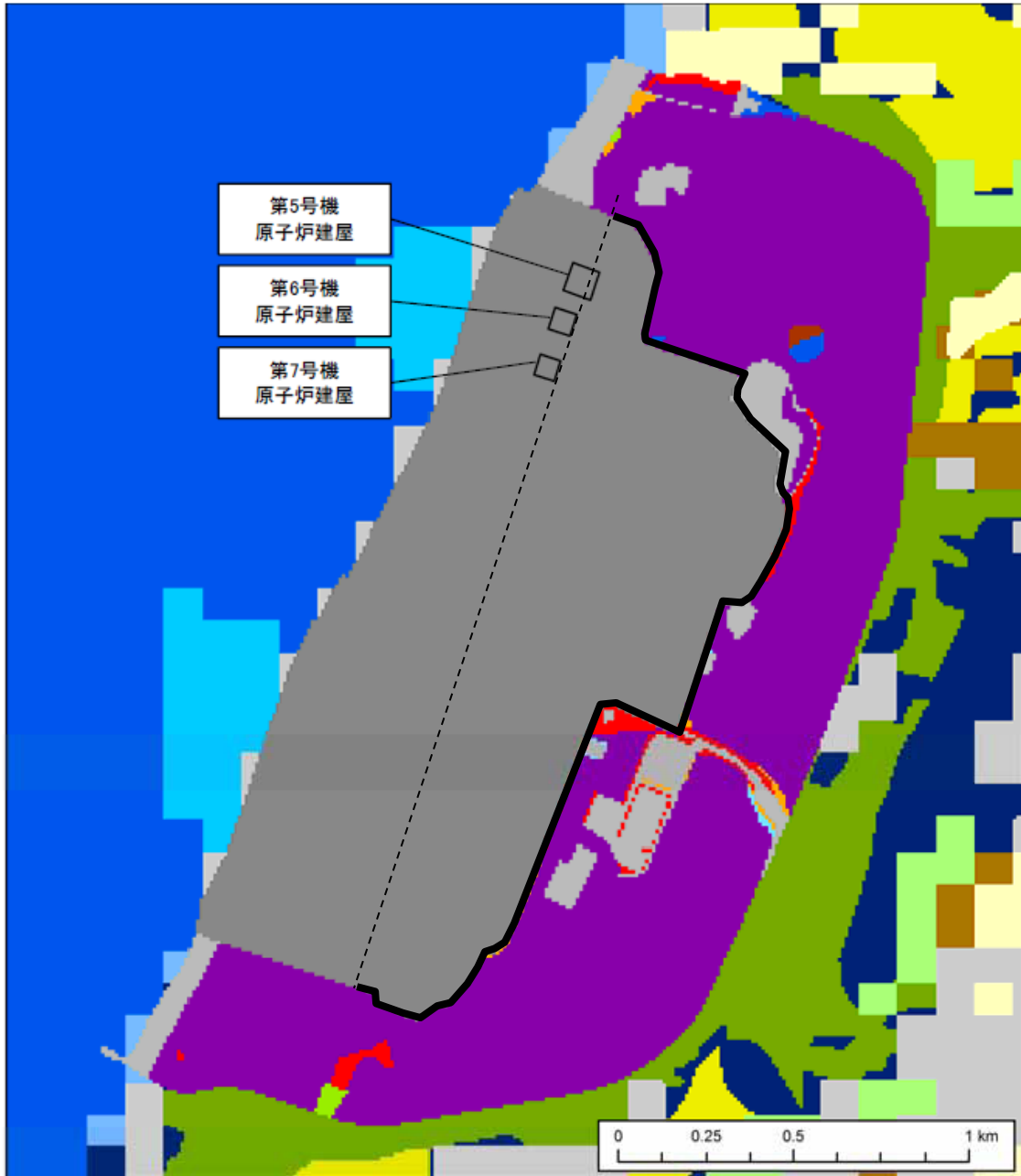
#### 輻射熱割合

$$\frac{\Delta H_{\text{rad}}}{\Delta H_{\text{ch}}} = \frac{4.9 \text{ [kJ/g]}}{13.0 \text{ [kJ/g]}} = 0.377$$

また、火炎輻射強度については、輻射熱割合が火炎輻射強度と反応強度の比であることから、これに反応強度を乗じることにより算出する。

(7) 火炎到達幅の算出

火炎到達幅を第 3.2-3 図の黒線で示す。6,7 号東面から見える林縁（防火帯森林側）の長さを火炎到達幅とする。



第 3.2-3 図 火炎到達幅

(8) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、林縁周辺 100m の森林が燃える時間とし、FARSITE 計算結果から次の計算式により算出する。

燃焼継続時間[h] = 林縁の奥行き ÷ 延焼速度

林縁奥行：100[m]

延焼速度：林縁から 100m 以内の延焼速度の平均値

(9) 危険輻射強度の算出

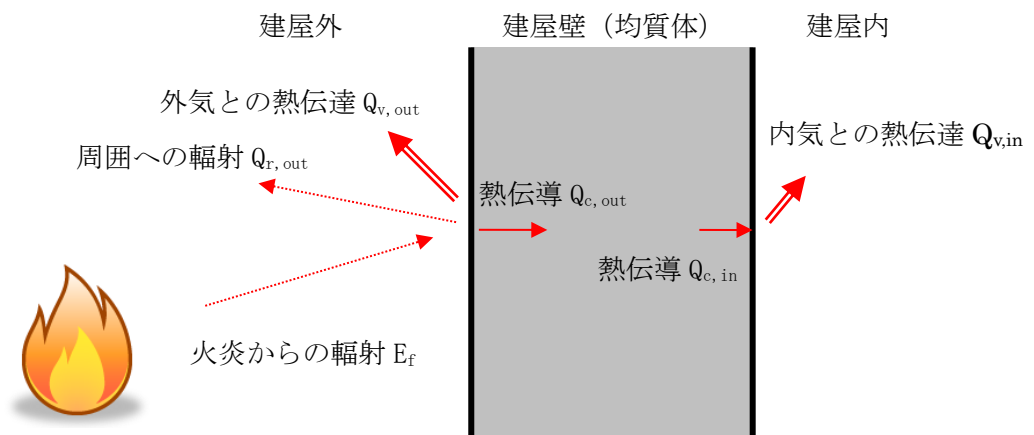
火災の燃焼継続時間の間一定の輻射熱が外壁面に入熱した場合を仮定し、外壁面での対流熱伝達と輻射放熱を考慮し、以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、コンクリートの表面温度が許容限界温度 200℃に達する輻射強度を危険輻射強度として求める（第 3.2-5(a) (b) (c) 図）。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

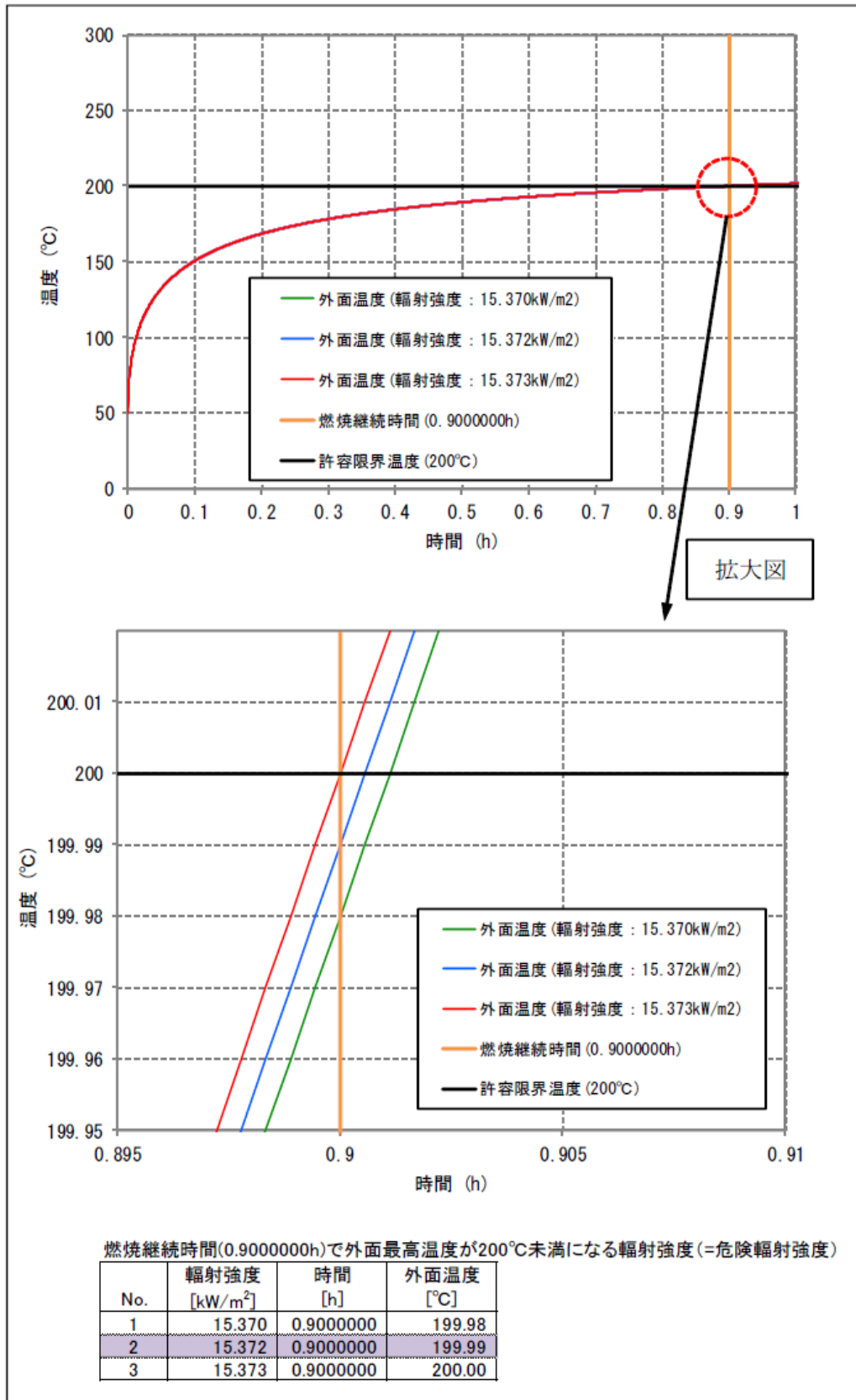
T：温度，t：時刻，x：建物壁内における外面からの距離， $\alpha$ ：熱拡散率  
以下に使用したパラメータを示す。

第 3.2-3 表 輻射強度算出時の入力パラメータ

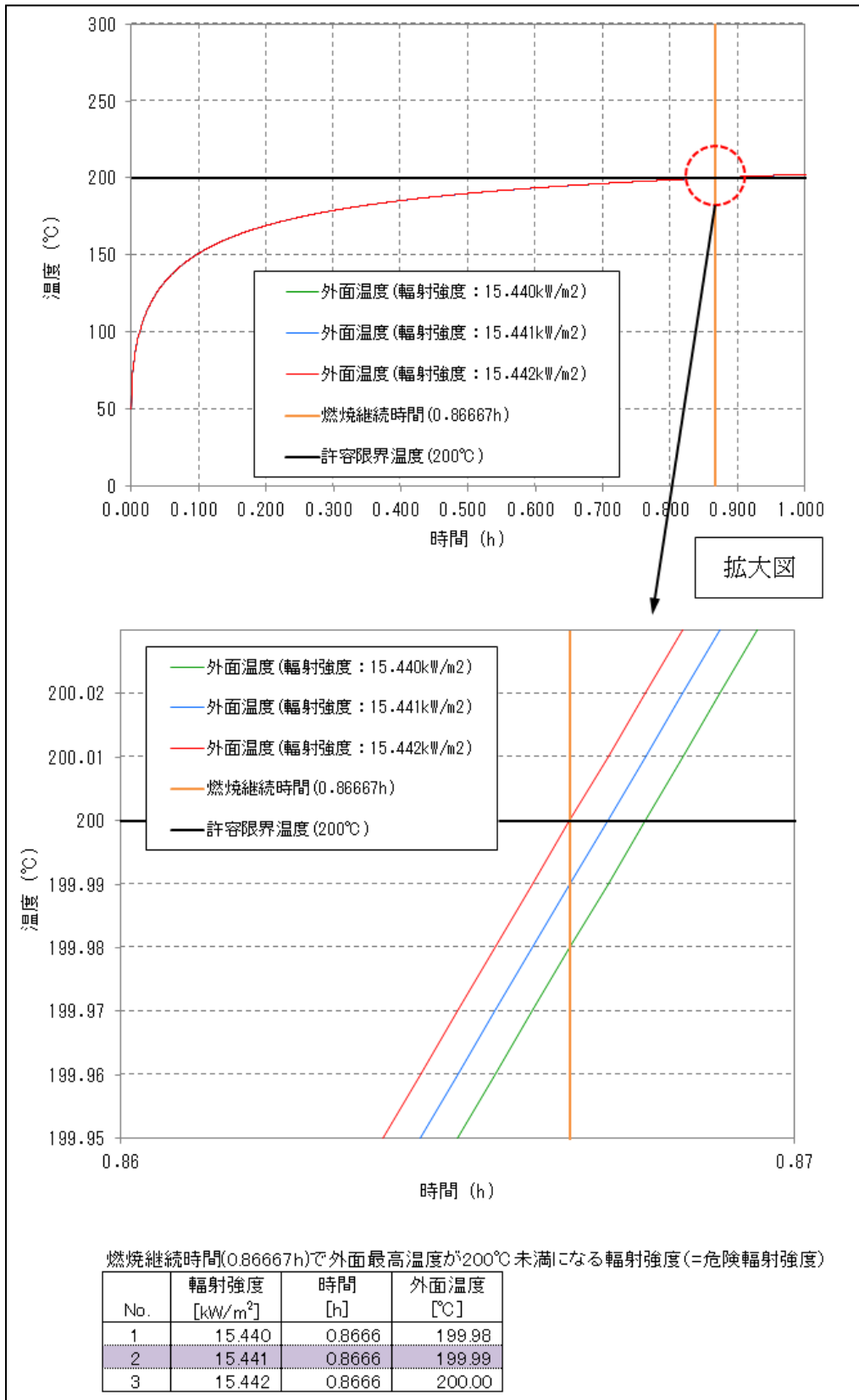
項目	パラメータ	備考
外気温度	50 °C	日射の影響を考慮し設定
内気温度	45 °C	非常用ディーゼル発電機室最高温度
外面熱伝達率	62.595 W/m <sup>2</sup> K	Jurges の式より（風速 16m/s）
内面熱伝達率	3.4883 W/m <sup>2</sup> K	建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書より
熱拡散率	8.42 × 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書より
壁面の厚さ	1.5 m	建屋外壁厚さの最大値



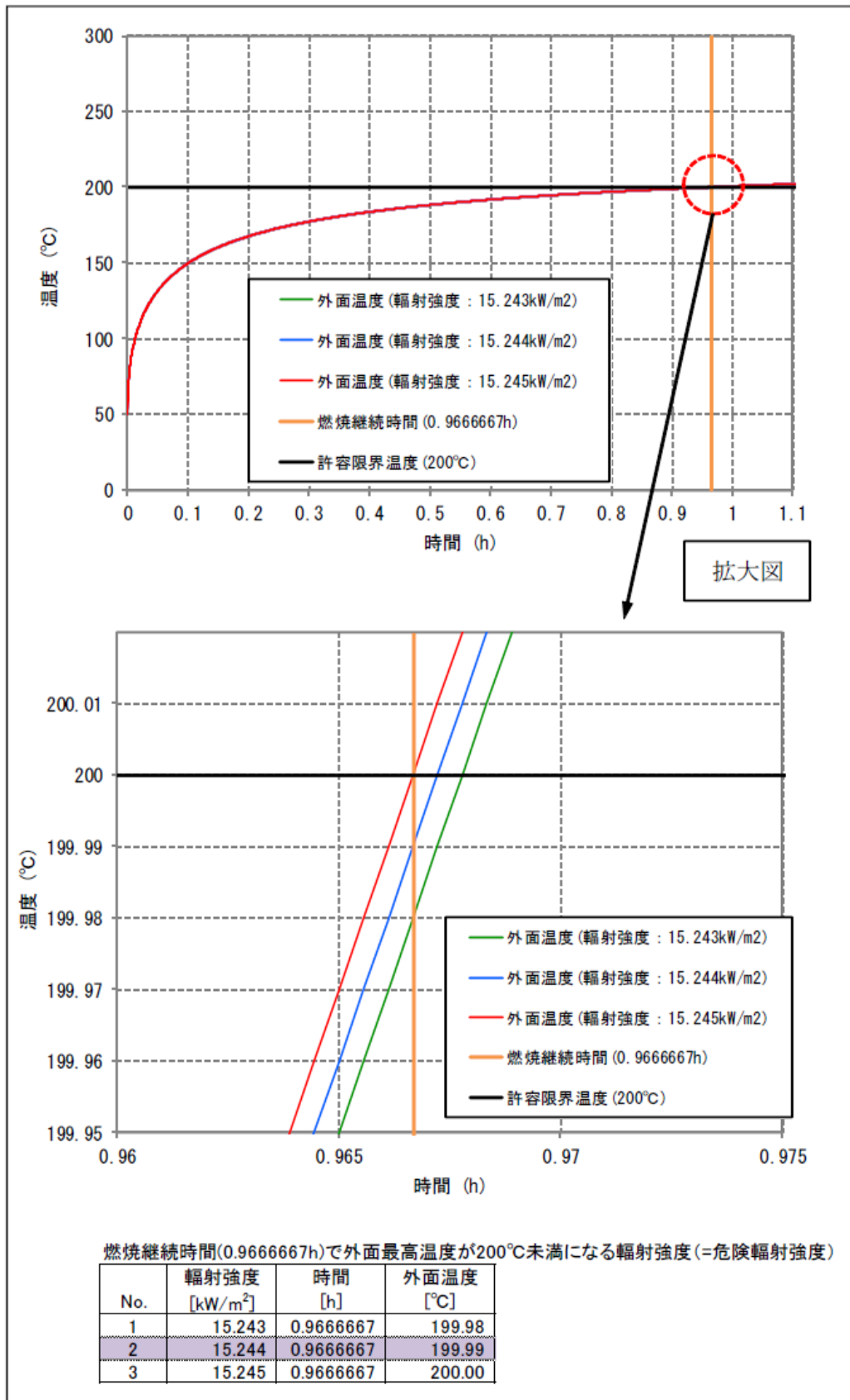
第 3.2-4 図 建屋温度評価体系図



第 3. 2-5(a) 図 危険輻射強度の算出 (ケース 1)



第 3.2-5 (b) 図 危険輻射強度の算出 (ケース 2)



第 3.2-5(c) 図 危険輻射強度の算出 (ケース 3)



(10) 形態係数の算出

次の式から各円筒火炎モデルの形態係数を算出した。算出結果を第 3.2-1 表に示す。

$$\phi_i = \frac{1}{\pi i} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L_i}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi_i$  : 各円筒火炎モデルの形態係数,  $L_i$  : 離隔距離[m],  $H$  : 火炎長[m],  
 $R$  : 燃焼半径[m]

したがって、各円筒火炎モデルの形態係数を合計した値が、発電用原子炉施設に及ぼす影響について考慮すべき形態係数  $\phi_t$  となる。

$$\phi_t = (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots)$$

$\phi_t$  : 各円筒火炎モデルの形態係数を合計した値

なお、1, 2, 3, ..., F の円筒火炎モデル数の合計は F 個となる。

(11) 危険距離の算出

輻射熱に対する発電用原子炉施設の危険輻射強度を調査し、輻射強度がその危険輻射強度以下になるように発電用原子炉施設は危険距離を確保するものとする。火炎輻射発散度の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、火炎輻射発散度に形態係数を掛けた値になる。次の式から形態係数  $\phi$  を求める。

$$E = Rf \cdot \phi$$

$E$  : 輻射強度 [kW/m<sup>2</sup>],  $Rf$  : 火炎輻射発散度 [kW/m<sup>2</sup>],  $\phi$  : 形態係数[-]

$\phi > \phi_t$  となる最大の距離として危険距離を算出する。算出結果を表 3.2-4 表に示す。

(12) 危険距離の評価結果

想定される森林火災において、評価上必要とされる危険距離（約 20m）に対し、発電所に設置される防火帯の外縁（火炎側）から発電用原子炉施設の間の離隔距離（約 202m）が危険距離以上あることを確認した。

第 3.2-4 表 危険距離の評価に伴う評価項目

評価項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3
燃焼半径[m]	0.96	1.02	0.84
火炎円筒モデル数[-]	1794	1700	2065
火炎輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	93.42	99.08	79.38

火炎輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	435.9	440.4	349.3
形態係数[-]	0.164	0.155	0.191
燃焼継続時間[min]	54	52	58
危険輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	15.372	15.441	15.244
危険距離[m]	17.9	19.9	13.4

### 3.3 建屋外壁の温度評価

本評価で用いる許容限界温度は、一般的にコンクリートの強度にほとんど影響がないとされている 200℃とする。

火災の進展により原子炉建屋外壁面が受ける輻射熱は、FARSITE による森林火災解析結果から、1メッシュ（10m×10m）毎に火炎長、単位面積当り発熱量および火炎到達時間が出力されるので、メッシュ毎に円筒火炎モデルを並べ（円筒火炎の直径が1mであれば、1メッシュに10個の円筒火炎を考慮）、各メッシュに火炎が到達してから燃え尽きるまでの間輻射に寄与するとして受熱点の輻射強度を積算する。受熱点への輻射強度計算方法の概念を第3.3-1図に示す。

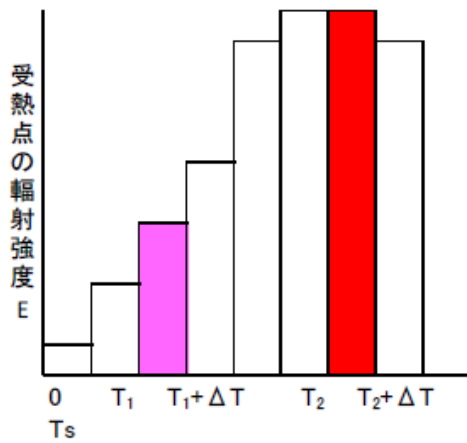
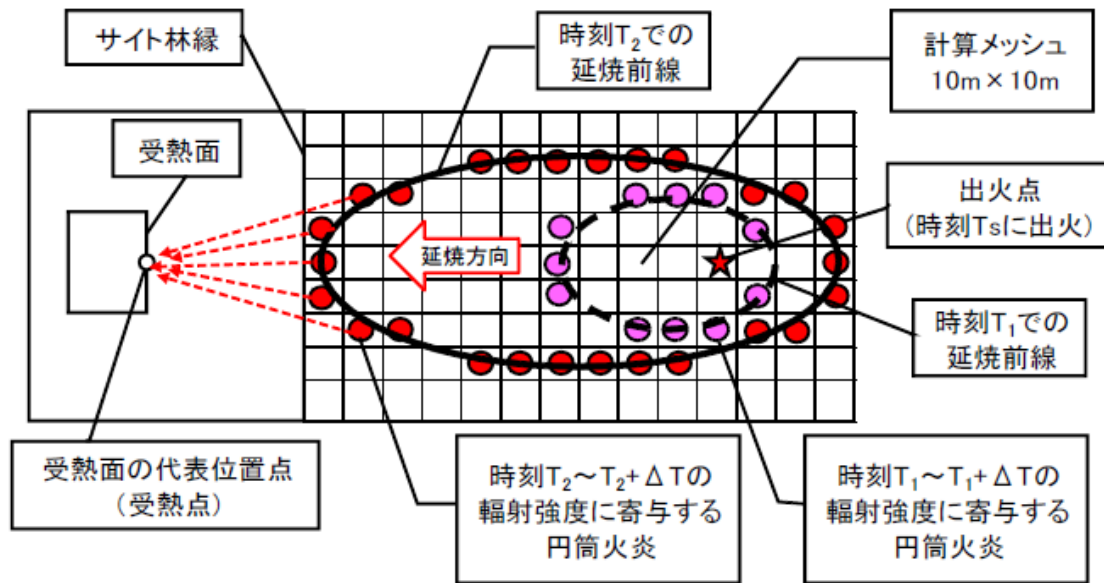
外壁面の温度は、外壁面での対流熱伝達と輻射放熱を考慮し以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて評価を実施する（第3.3-2図）。原子炉建屋外壁表面の温度は約55℃となり、森林火災の熱影響に対して許容温度以下であることを確認した（第3.3-2表、第3.3-3(a)(b)(c)図）。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

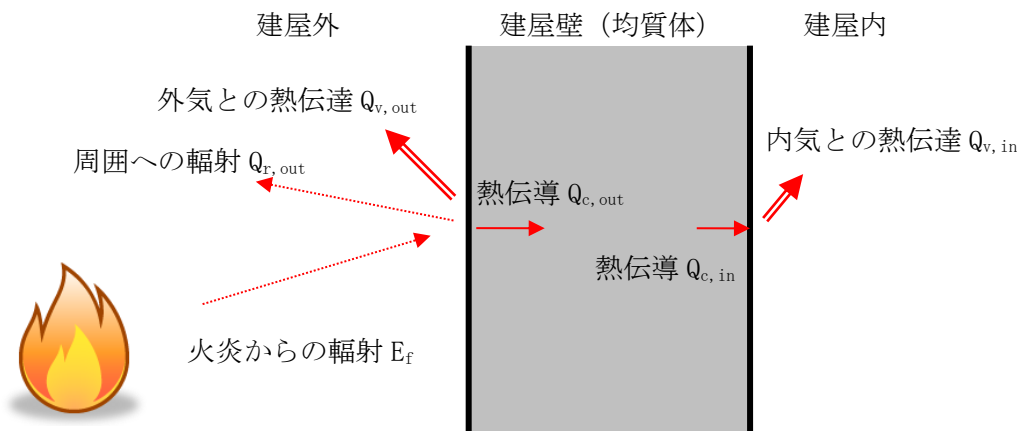
T：温度，t：時刻，x：建物壁内における外面からの距離，α：熱拡散率  
以下に使用したパラメータを示す。

第3.3-1表 建屋外壁温度算出時の入力パラメータ

項目	パラメータ	備考
外気温度	50 °C	日射の影響を考慮し設定
内気温度	45 °C	非常用ディーゼル発電機室最高温度
外面熱伝達率	62.595 W/m <sup>2</sup> K	Jurges の式より（風速 16m/s）
内面熱伝達率	3.4883 W/m <sup>2</sup> K	建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書より
熱拡散率	8.42×10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書より
壁面の厚さ	1.5 m	建屋外壁厚さの最大値



第 3.3-1 図 受熱点の輻射強度の計算モデル概念図

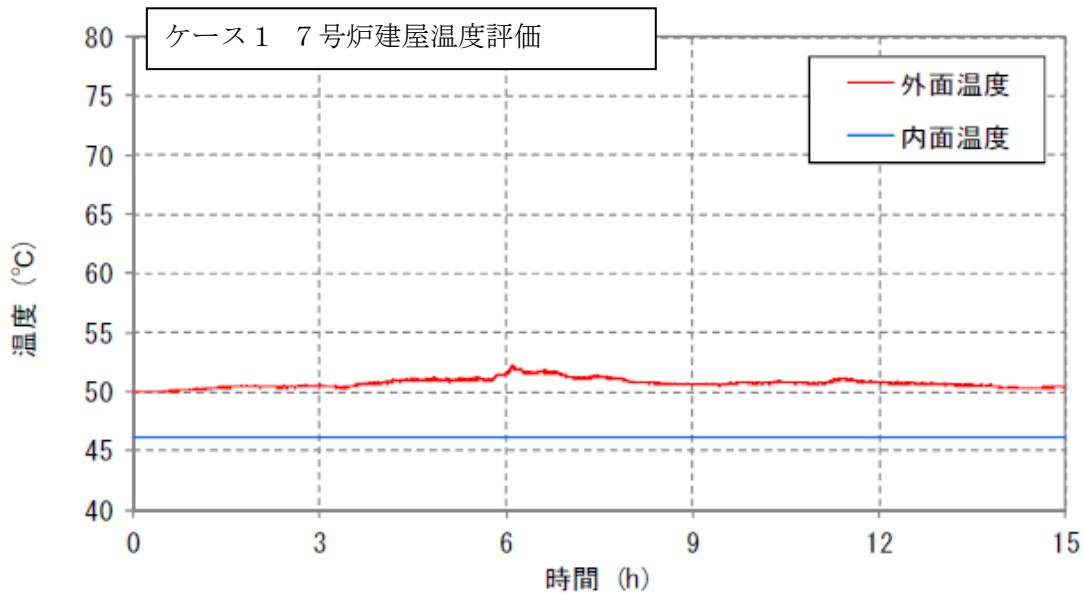
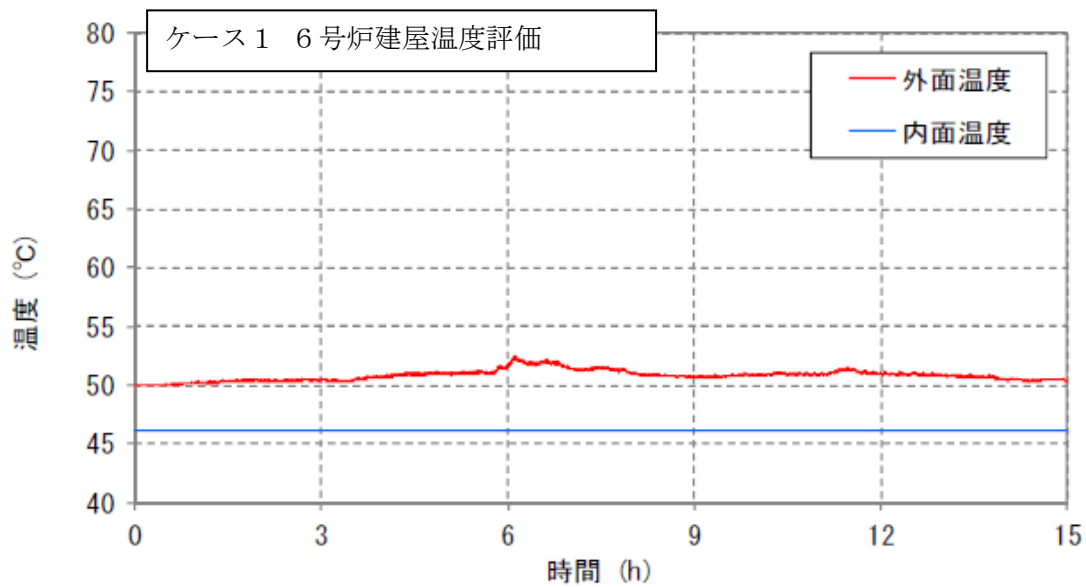


第 3.3-2 図 外壁面温度評価概念図

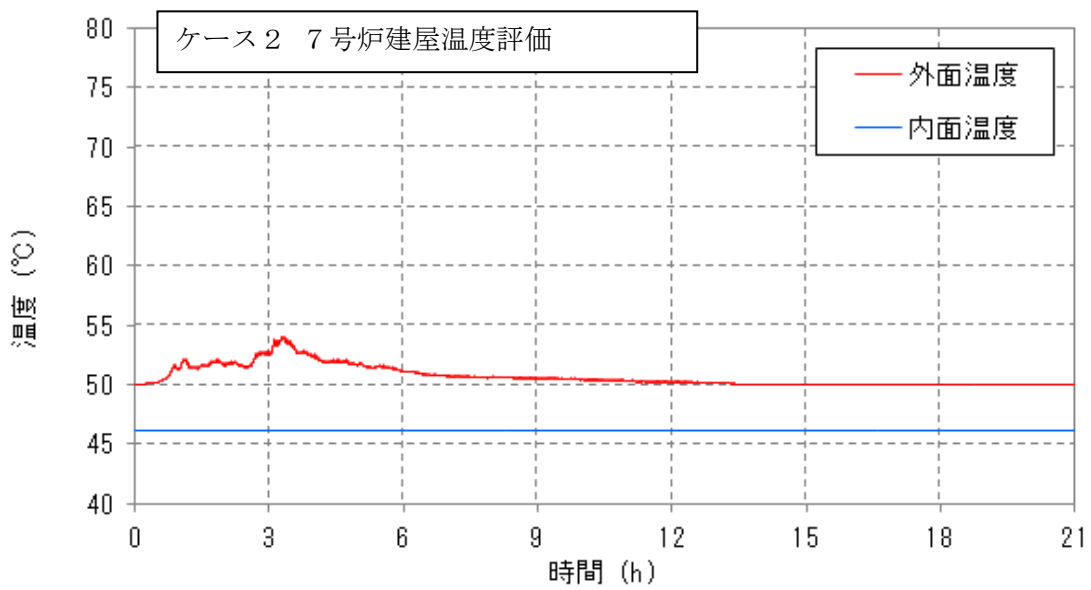
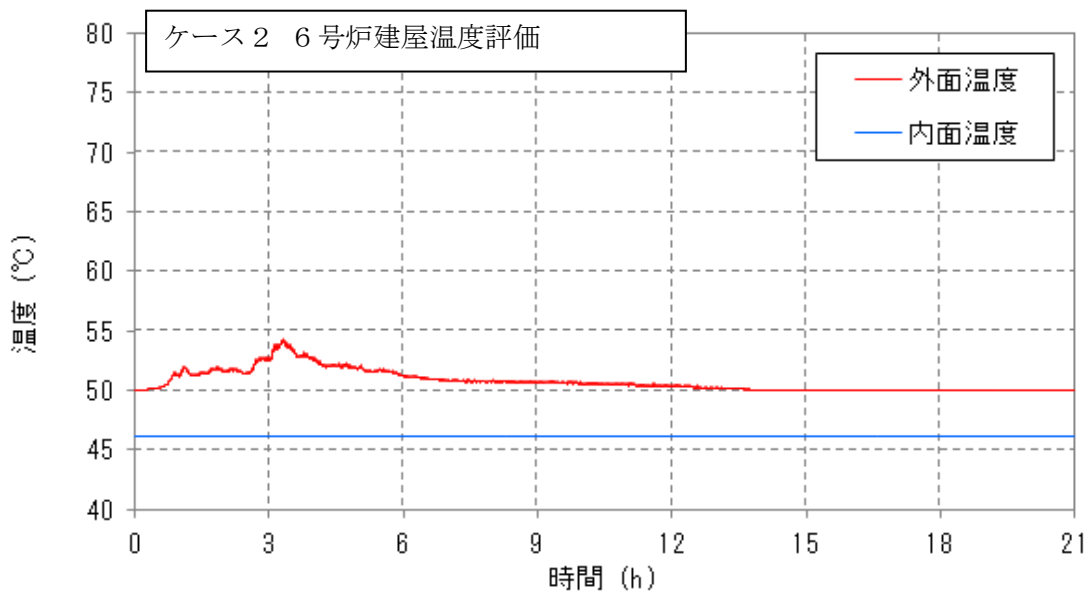
第 3. 3-2 表 輻射強度と壁面温度の評価項目

評価項目	ケース 1		ケース 2		ケース 3	
	6 号炉	7 号炉	6 号炉	7 号炉	6 号炉	7 号炉
最大輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	0. 3716	0. 3246	0. 6652	0. 6210	0. 2690	0. 2297
最大外壁面温度[°C]	52. 6	52. 3	54. 3	54. 1	52. 0	51. 7
最大内壁面温度[°C]	46. 2	46. 2	46. 2	46. 2	46. 2	46. 2

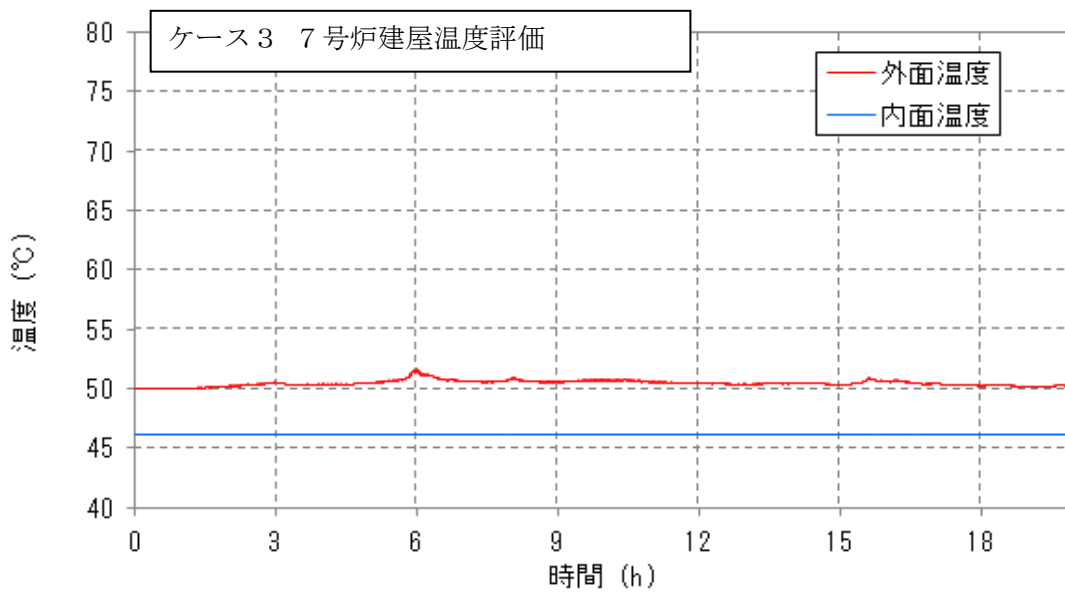
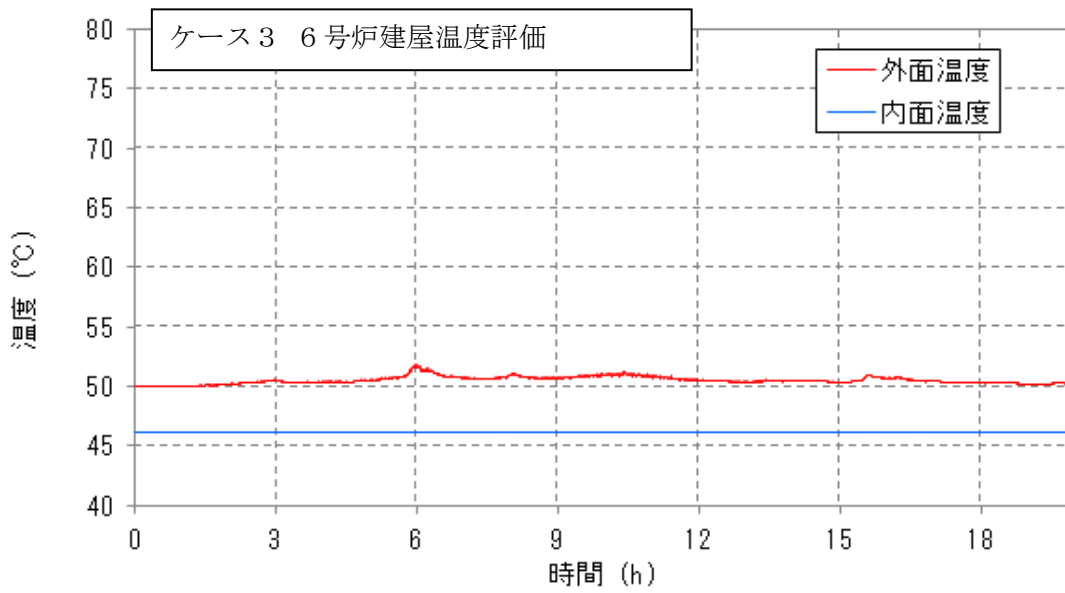
※外壁面の初期温度は 50°C，内壁面の初期温度は 46. 2°C とする。



第 3. 3-3(a) 図 原子炉建屋外壁面内壁面における温度上昇 (ケース 1)



第 3. 3-3(b) 図 原子炉建屋外壁面内壁面における温度上昇 (ケース 2)



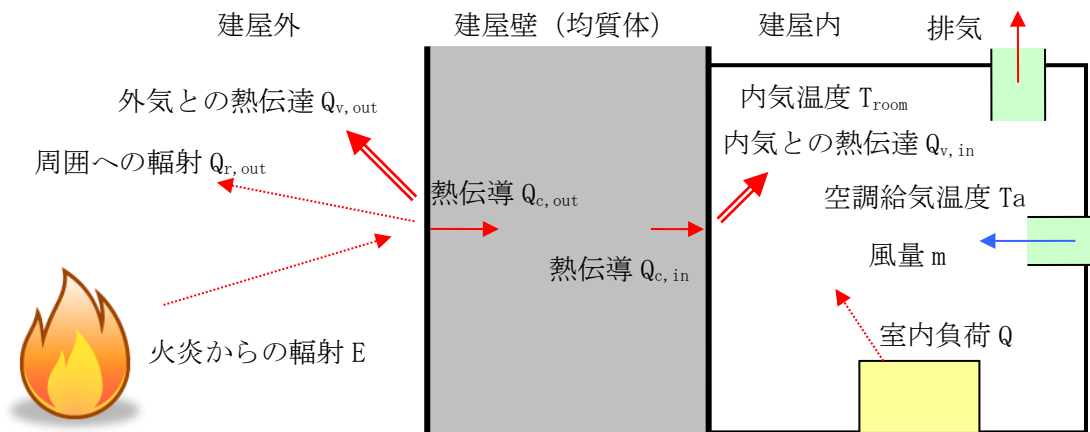
第 3. 3-3(c) 図 原子炉建屋外壁面内壁面における温度上昇 (ケース 3)

### 3.4 内気温度評価

森林火災において燃焼が継続している間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設が昇温されるものとして、内壁の温度上昇を求め建屋内部に設置されている機器等への影響について評価した。

なお、対象は防火帯に近接している固体廃棄物貯蔵庫および免震重要棟とし、森林火災における最も厳しいケース2の条件で評価した。固体廃棄物処理建屋は免震重要棟と離隔距離が同じであるが、壁厚が緊急時対策所に比べ厚いことから免震重要棟について温度評価を行うこととした。また、免震重要棟の評価エリアは、緊急時対策所とした。

以下に概念図を示す。



第 3.4-1 図 伝熱の概念図

評価に必要なパラメータを以下に示す。

第 3.4-1 表 内気温度算出時の入力パラメータ

項目	パラメータ	備考
外気温度 [°C]	50 °C	日射の影響を考慮し設定
外壁面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]	62.595	Jurges の式より (風速 16m/s)
内壁面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]	3.4883	コンクリートの内壁面熱伝達率
壁の熱伝導率 [W/mK]	1.6279	コンクリートの熱伝導率
熱拡散率 [m <sup>2</sup> /s]	$8.42 \times 10^{-7}$	コンクリートの熱拡散率
壁厚 [m]	0.58	固体廃棄物貯蔵庫
	0.18	免震重要棟

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、外壁および内壁面温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 建物壁内における外壁面からの距離,  $\alpha$  : 熱拡散率

外壁および内壁面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

$$Q_{v,in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

$h_{in}$  : 内壁面熱伝達率, A : 内壁の表面積,  $T_{in}$  : 内壁面温度,  $T_{room}$  : 内気温度

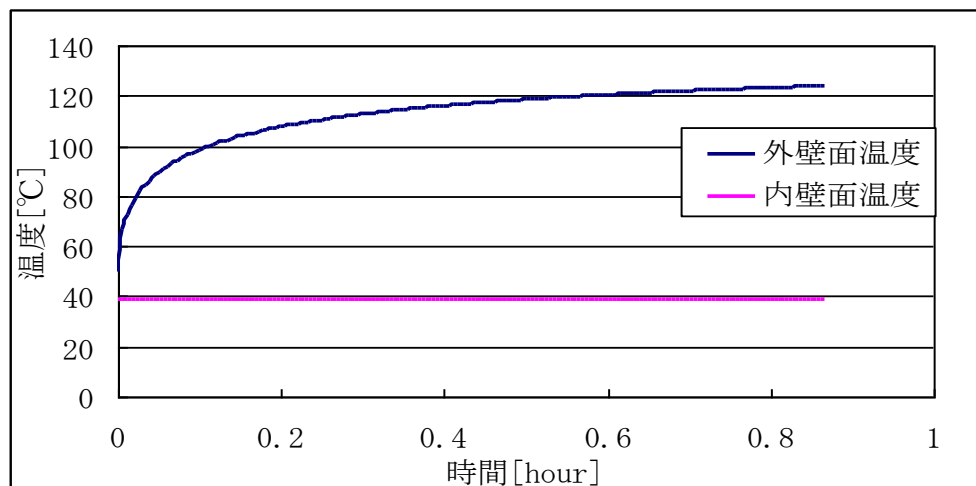
内気温度は, 森林火災による内壁面温度上昇に伴う熱負荷と室内の熱負荷および空調による除熱を考慮し, 次式で求める。

$$T_{room} = \frac{Q + Q_{v,in}}{m \rho C} + T_a$$

Q : 室内負荷, m : 風量,  $\rho$  : 空気密度, C : 空気比熱,  $T_a$  : 空調給気温度

#### (1) 固体廃棄物貯蔵庫

森林火災における固体廃棄物貯蔵庫の評価結果を以下に示す。



第 3.4-2 図 外壁および内壁面温度 (固体廃棄物貯蔵庫)

第 3.4-2 表 森林火災影響評価結果 (固体廃棄物貯蔵庫)

固体廃棄物貯蔵庫評価	
項目	森林火災 (ケース 2)
輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	7363.28 <sup>*1</sup>
燃焼継続時間 [min] <sup>*2</sup>	52 (3120[s])
外壁面温度 [°C]	123



内壁面温度[°C]	38.7
内気温度[°C]	34.9
許容温度[°C]	80 <sup>※3</sup>

※1：離隔距離を 41m，その他の数値はケース 2 と同様とし，3.2(10)および(11)の式より輻射強度を算出

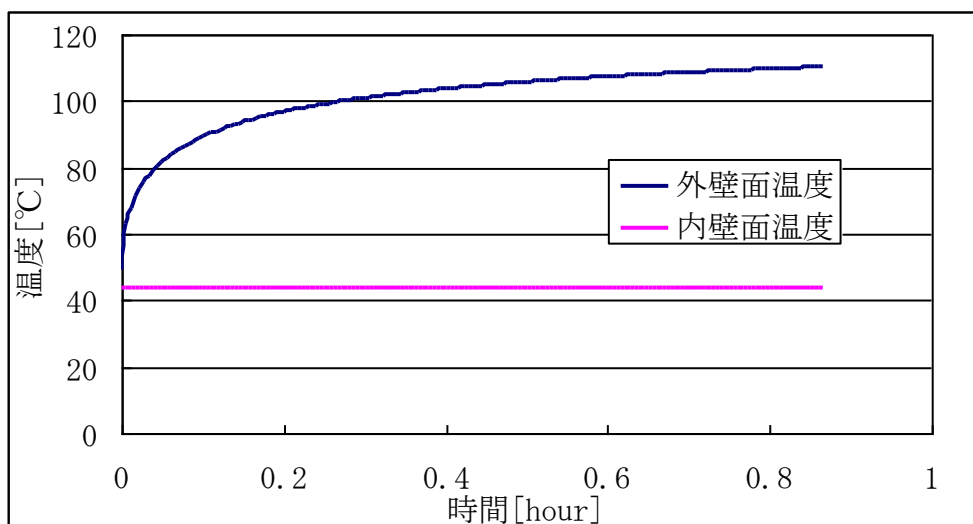
※2：防火帯周辺の森林（奥行き 100m）が燃える平均時間

※3：ドラム缶のパッキンの耐熱限界温度

評価の結果，固体廃棄物貯蔵庫の内気温度がドラム缶のパッキンの耐熱限界温度を下回ることを確認した。

## (2) 免震重要棟

森林火災における免震重要棟の評価結果を以下に示す。



第 3.4-3 図 外壁および内壁面温度（免震重要棟）

第 3.4-3 表 森林火災影響評価結果（免震重要棟）

免震重要棟評価	
項目	森林火災（ケース 2）
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	6007.70 <sup>※1</sup>
燃焼継続時間[min] <sup>※2</sup>	52 (3120[s])
外壁面温度[°C]	110
内壁面温度[°C]	43.9
内気温度[°C]	32.0
許容温度[°C]	35

※1：離隔距離を 50m，その他の数値はケース 2 と同様とし，3.2(10)および(11)の式

より輻射強度を算出

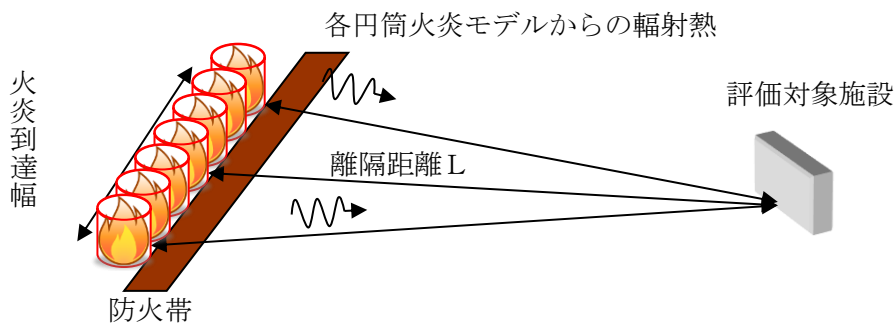
※2：防火帯周辺の森林（奥行き 100m）が燃える平均時間

評価の結果，免震重要棟の内気温度が許容温度を下回ることを確認した。

### 3.5 屋外施設の影響評価

#### (1) 評価手法の概要

森林火災の火炎は円筒火炎をモデルとし，火炎の高さは燃焼半径の3倍とする。また，火炎到達幅の分だけ円筒火炎モデルが横一列に並ぶものとする（第 3.5-1 図）。



第 3.5-1 図 円筒火炎モデルの並べ方

#### (2) 必要データ

評価に必要なデータは以下の通り

火炎輻射発散度が最も大きい森林火災（ケース 2）のデータを用いて評価する。

第 3.5-1 表 屋外施設影響評価時の入力データ

項目	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板)) ※1	排気筒
火炎輻射発散度 [kW/m <sup>2</sup> ]	99.08		
火炎輻射強度 [kW/m <sup>2</sup> ]	440.4		
火炎長 [m]	3.06		
火炎到達幅 [m]	3470		
燃焼継続時間 [min]	52		
離隔距離 [m]	135	233	246
初期温度 [°C]	38※2	38※3 (55※2)	50※2
許容 (限界) 温度 [°C]	225※4	100※5	325※6
受熱面輻射強度 [kW/m <sup>2</sup> ]	2.14	1.19	1.12

※1：燃料移送ポンプの温度評価体系は，「別紙 2-4 2-2. 軽油タンク火災以外の

外部火災時」を参照。

※2：柏崎市の過去最高気温（気象庁）に日射の影響を考慮

※3：燃料移送ポンプは防護板の裏面に設置されており日射の影響を受けないため、柏崎市の過去最高気温（気象庁）とする。

※4：軽油の発火点（理科年表）

※5：端子ボックススパッキンの耐熱温度（JIS K6380）

燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）の外表面温度をもって、燃料移送ポンプに熱影響が及ばないことを確認する。この場合、当該ポンプの許容限界温度（100℃）を踏まえ、防護板外面の許容温度を100℃とする（防護板（鋼板）の外表面温度が100℃以下であれば、燃料移送ポンプ（エリア）の温度は100℃を超えない）。

※6：鋼材の制限温度（建築火災のメカニズムと火災安全設計，日本建築センター）

### (3) 温度評価

#### a. 軽油タンクの温度評価

一定の輻射強度で軽油および軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より、軽油の温度上昇を求め、軽油の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。評価体系を第3.5-2図に、評価結果を第3.5-1表に示す。

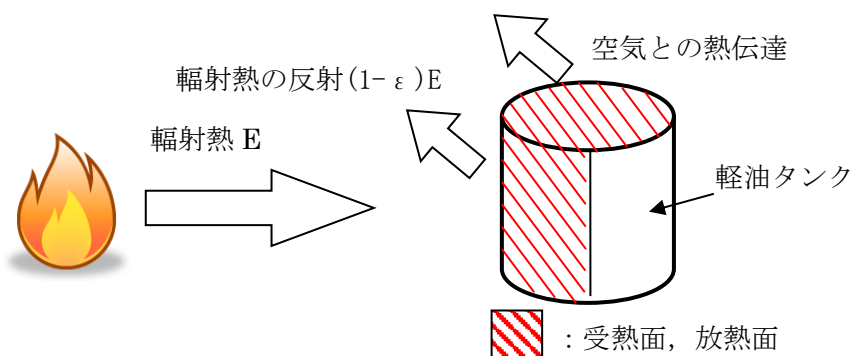
$$T = \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS_2}{C} \right) t}$$

$T_0$ ：初期温度[38℃]， $E$ ：輻射強度[W/m<sup>2</sup>]， $\varepsilon$ ：軽油タンク表面の放射率(0.9)

※<sup>1</sup>， $h$ ：軽油タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>， $S_1$ ：軽油タンク受熱面積[m<sup>2</sup>]，

$S_2$ ：軽油タンク放熱面積[m<sup>2</sup>]， $C$ ：軽油タンクおよび軽油の熱容量[8.72×10<sup>8</sup>J/K]， $t$ ：燃焼継続時間[s]， $T_{air}$ ：外気温度[℃]

※1：伝熱工学資料，※2：空気調和・衛生工学便覧



第3.5-2図 軽油タンクの熱影響評価（概念図）

#### b. 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度評価

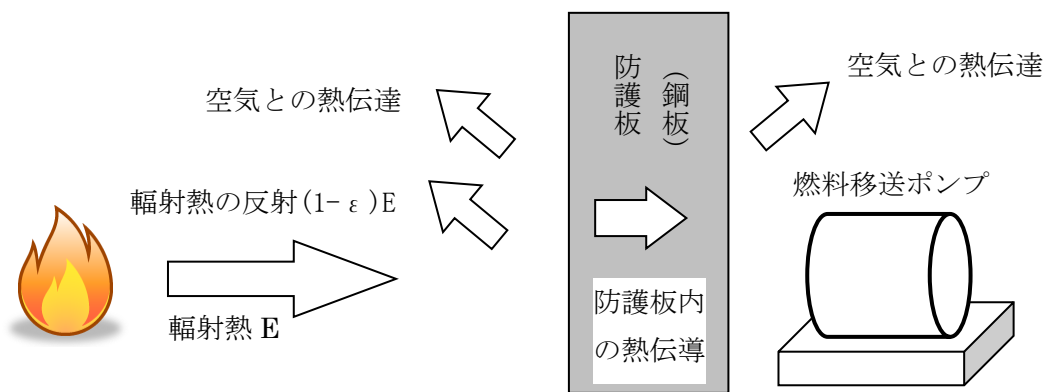
一定の輻射強度で燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）が

昇温されるものとして、下記の式より、防護板（鋼板）の最大温度を求め、防護板（鋼板）の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。評価体系を第 3.5-3 図に、評価結果を第 3.5-2 表に示す。

$$T = \frac{\varepsilon E \frac{S}{2} + hST_{air}}{hS} - \left( \frac{\varepsilon E \frac{S}{2} + hST_{air}}{hS} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS}{C} \right) t}$$

$T_0$  : 初期温度[55°C],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 防護板（鋼板）外面の放射率(0.9) ※<sup>1</sup>,  $h$  : 防護板（鋼板）表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K] ※<sup>2</sup>,  $S$  : 防護板（鋼板）放熱面積[32.4m<sup>2</sup>] ( $S/2$ : 受熱面積は外面のみ),  $C$  : 防護板（鋼板）の熱容量[2.41 × 10<sup>6</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T_{air}$  : 外気温度[55°C]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧



第 3.5-3 図 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の熱影響評価（概念図）

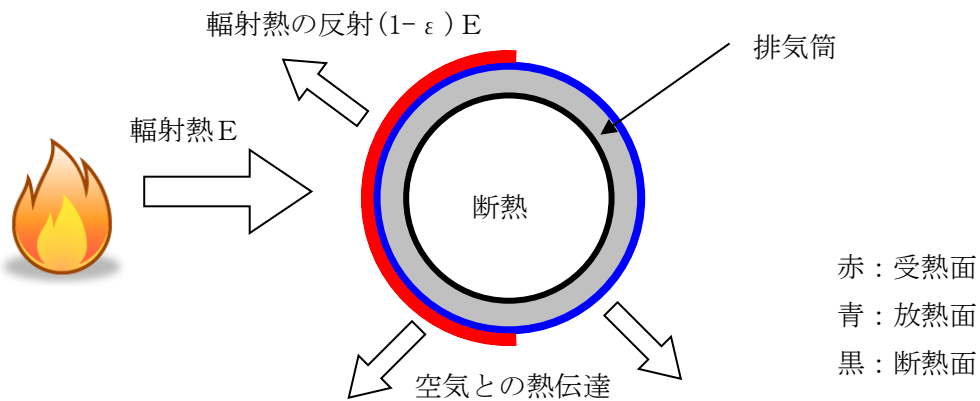
c. 排気筒の温度評価

一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より、排気筒の最大温度を求め、排気筒の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。評価体系を第 3.5-4 図に、評価結果を第 3.5-2 表に示す。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50°C],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率(0.9) ※<sup>1</sup>,  $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K] ※<sup>2</sup>

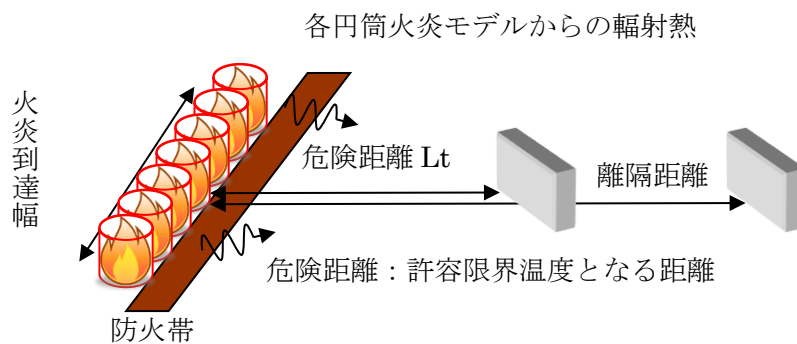
※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧



第 3.5-4 図 排気筒の熱影響評価（概念図）

(4) 危険距離評価

評価対象設備の許容限界温度となる離隔距離を危険距離とし、危険距離を算出する。危険距離の考え方について第 3.5-5 図に示す。



第 3.5-5 図 危険距離の考え方

a. 危険輻射強度の算出

(a) 軽油タンクの危険輻射強度の算出

一定の輻射強度で軽油および軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より、許容限界温度となる輻射強度を危険輻射強度とする。算出結果を第 3.5-1 表に示す。

$$E_{max} = \frac{ThS_2 - hS_2T_{air}(1 - e^{(-\frac{hS_2}{c})t}) - hS_2T_0e^{(-\frac{hS_2}{c})t}}{\epsilon S_1(1 - e^{(-\frac{hS_2}{c})t})}$$

$T_0$  : 初期温度 [38°C],  $T$  : 許容限界温度 [°C],  $\epsilon$  : 軽油タンク表面の放射率 (0.9) ※1,  $h$  : 軽油タンク表面熱伝達率 [17W/m<sup>2</sup>K] ※2,  $S_1$  : 軽油タンク受熱面積 [m<sup>2</sup>],  $S_2$  : 軽油タンク放熱面積 [m<sup>2</sup>],  $C$  : 軽油タンクおよび軽油の熱容量 [8.72×10<sup>8</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間 [s],  $T_{air}$  : 外気温度 [°C]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

(b) 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の危険輻射強度の算出

一定の輻射強度で燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）が昇温されるものとして，下記の式より，許容温度となる輻射強度を危険輻射強度とする。算出結果を第 3.5-1 表に示す。

$$E_{max} = \frac{2}{\varepsilon S} \left( \frac{hS(T - T_{air})}{1 - e^{(-\frac{hS}{C})t}} \right)$$

$\varepsilon$  : 防護板（鋼板）外面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>，S : 防護板（鋼板）受熱面積 [16.2m<sup>2</sup>]，h : 防護板（鋼板）表面熱伝達率 [17W/m<sup>2</sup>K] ※<sup>2</sup>，C : 防護板（鋼板）の熱容量 [2.41×10<sup>6</sup>J/K]，t : 燃焼継続時間 [s]，T : 許容温度 [100℃]，T<sub>air</sub> : 外気温度（初期温度） [55℃]

※ 1 : 伝熱工学資料， ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

(c) 排気筒の危険輻射強度の算出

一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして，下記の式より，許容限界温度となる輻射強度を危険輻射強度とする。算出結果を第 3.5-1 表に示す。

$$E_{max} = \frac{2h(T - T_0)}{\varepsilon}$$

T<sub>0</sub> : 初期温度 [50℃]，T : 許容限界温度 [℃]， $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>，h : 排気筒表面熱伝達率 [17W/m<sup>2</sup>K] ※<sup>2</sup>

※ 1 : 伝熱工学資料， ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

b. 形態係数の算出

次の式から各円筒火炎モデルの形態係数を算出する。算出結果を第 3.4-1 表に示す。

$$\phi_i = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{(n-1)}{\sqrt{(n+1)}} \right] \right\}$$

$$\text{ただし， } m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L_i}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$$

$\phi_i$  : 各円筒火炎モデルの形態係数，L<sub>i</sub> : 離隔距離 [m]，H : 火炎長 [m]，R : 燃焼半径 [m]

したがって，各円筒火炎モデルの形態係数を合計した値が，発電用原子炉施設に及ぼす影響について考慮すべき形態係数  $\phi_t$  となる。

$$\phi_t = (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \cdots + \phi_F)$$

$\phi_t$ :各円筒火炎モデルの形態係数を合計した値

なお、1, 2, 3, …, F の円筒火炎モデル数の合計は F 個となる。

### c. 危険距離の算出

輻射熱に対する発電用原子炉施設の危険輻射強度を調査し、輻射強度がその危険輻射強度以下になるように発電用原子炉施設は危険距離を確保するものとする。火炎輻射発散度の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、火炎輻射発散度に形態係数を掛けた値になる。次の式から形態係数  $\phi$  を求める。

$$E = Rf \cdot \phi$$

E: 輻射強度 [kW/m<sup>2</sup>], Rf: 火炎輻射発散度 [kW/m<sup>2</sup>],  $\phi$ : 形態係数[-]

$\phi > \phi_t$  となるように危険距離を算出する。算出結果を第 3.5-2 表に示す。

$$\phi_t = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L_t}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi_t$ : 各火炎モデルの形態係数を合計した値,  $L_t$ : 危険距離[m], H: 火炎長[m],

R: 燃焼半径[m]

第 3.5-2 表 温度評価および危険距離評価結果

	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
最高温度[°C]	40	72	80
危険輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	261.213	3.333	11.333
形態係数[-]	2.636304249	0.033642412	0.104850070
危険距離[m]	2	89	27
離隔距離[m]	135	233	246

### 3.6 まとめ

以上より、森林火災が発生した場合を想定したとしても、許容限界温度を超えないことおよび危険距離以上の離隔距離が確保されていることから、発電用原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないと評価する。

## 防火帯の管理方針について

## 1. はじめに

森林火災評価結果に基づき，森林火災による外部火災防護施設への延焼防止対策として，発電所構内道路及び地形状況等を考慮し，20m幅の防火帯を設定する。

防火帯内に他の法令要求等により可燃物を含む機器等を設置する場合は必要最小限の機器等とし，防火帯の延焼防止効果を損なわない設計とする必要があるため，防火帯の管理方法について以下に示す。

## 2. 防火帯の管理方針

防火帯の設定にあたっては，草木を伐採する等，可燃物を排除し，除草剤の散布やモルタル吹付け等を行う。また，防火帯は表示板等で明確に区分すると共に，構内道路の一部を防火帯として使用している箇所については，駐車禁止の措置等により，常時可燃物のない状態を維持する。

防火帯内には延焼防止効果に影響を与えるような可燃物を含む機器は，原則設置しない方針であるが，防火帯の位置設定においては発電所敷地内道路配置及び地形形状等を考慮して設定したことから，防火帯内の一部には他の法令要求等による少量の可燃物を含む機器等が存在する。このため，防火帯内に設置された機器等の延焼防止効果への影響の有無を評価し，必要な対策を講ずる設計とする。

第1表に防火帯に設置される機器等の管理方針について示す。

第1表 防火帯内に設置される機器等の評価及び管理方針

分類		機器例	評価及び管理方針
不燃性の機器		<ul style="list-style-type: none"> <li>・送電線</li> <li>・ガードパイプ</li> <li>・マンホール（鋼製）</li> </ul>	火災により燃焼しない。防火帯延焼防止効果に影響を与えないことから，機器に対して対策は不要。
可燃物を含む機器	局所的な設置機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・標識</li> <li>・カーブミラー</li> </ul>	局所的な火災となる。防火帯延焼防止効果に影響を与えないことから，機器に対して対策は不要。
	防火帯を横断して設置	なし	—

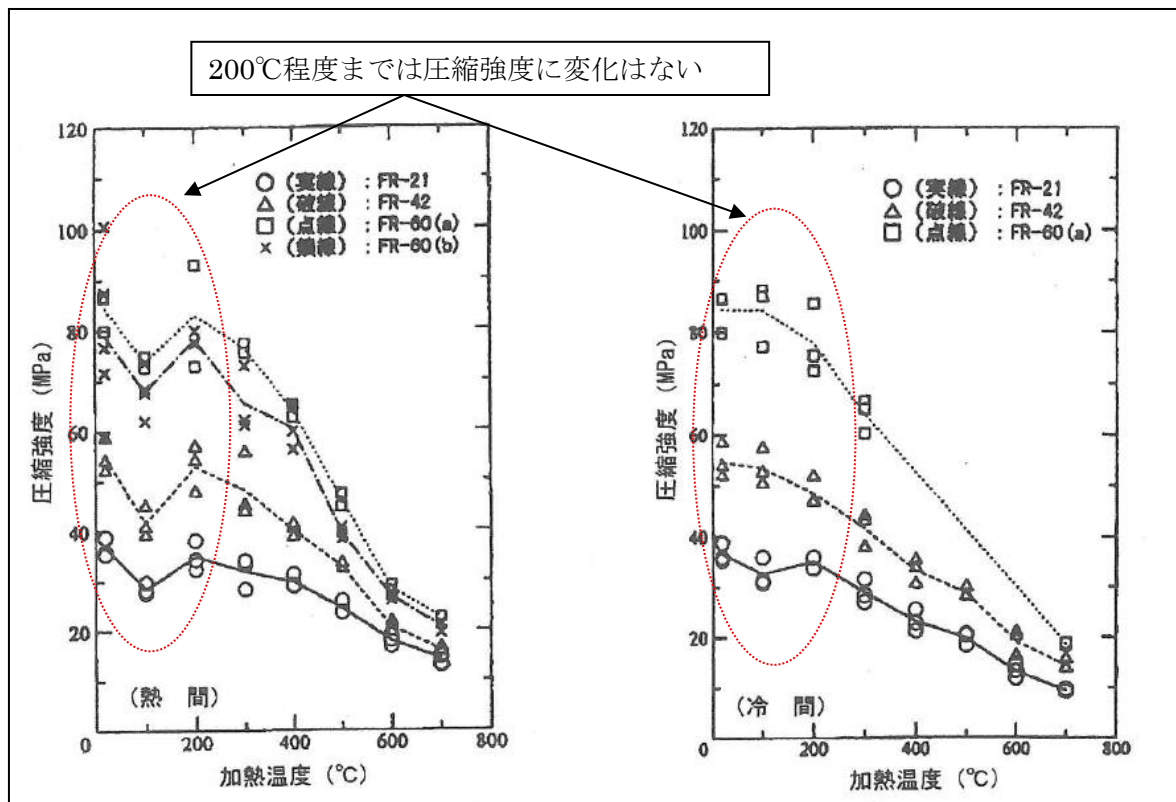


コンクリートの許容限界温度 200°Cの設定根拠について

コンクリートの圧縮強度は、200°C程度までは常温とほとんど変わらないかむしろ増加する。しかし、その後は徐々に低下し、500°Cで常温強度の2/3に低下する。火災後（冷却後）の残存強度を確保する場合には450°Cが限界となる。<sup>\*1</sup>

また、他の文献<sup>\*2</sup>では、コンクリートの強度を著しく低下させる温度の境界を300°Cとし、コンクリート表面の受熱温度が300°C以下で許容ひび割れ幅以上のひび割れが認められない場合の構造体は健全であり、仕上げのみの補修でよいとしている。第1図にコンクリートの強度と温度の関係、第1表、第2表に火災によるコンクリートの被害等級及びその補修・補強方法について示す。

よって本評価では、保守的に圧縮強度に変化がないとされる200°Cを許容限界温度とし、評価を実施する。



第1図 コンクリートの強度と温度の関係<sup>\*2</sup>

\*1：建築火災のメカニズムと火災安全設計，原田和典

\*2：建物の火害診断及び補修・補強方法，日本建築学会

第1表 火害等級と状況<sup>\*1</sup>

火害等級	状況
I 級	無被害の状態で、たとえば、 ①被害全くなし、 ②仕上げ材料等が残っている。
II 級	仕上げ部分に被害がある状態で、例えば、 ①躯体にすす、油煙等の付着、 ②コンクリート表面の受熱温度が 300℃以下、 ③床・梁のはく落わずか。
III 級	鉄筋位置へ到達しない被害で、例えば、 ①コンクリートの変色はピンク色 ②微細なひびわれ、 ③コンクリート表面の受熱面温度が 300℃以上、 ④柱の爆裂わずか。
IV 級	主筋との付着に支障がある被害で、例えば、 ①表面に数 mm 幅のひびわれ、 ②鉄筋一部露出。
V 級	主筋の座屈などの実質的被害がある状態で、例えば、 ①構造部材としての損傷大 ②爆裂広範囲、 ③鉄筋露出大、 ④たわみが目立つ、 ⑤健全時計算値に対する固有振動数測定値が 0.75 未満、 ⑥載荷試験において、試験荷重時最大変形に対する残留変形の割合が A 法で 15%、B 法で 10%を超える。

第2表 鉄筋コンクリート構造物の火害等級と補修・補強の基本\*

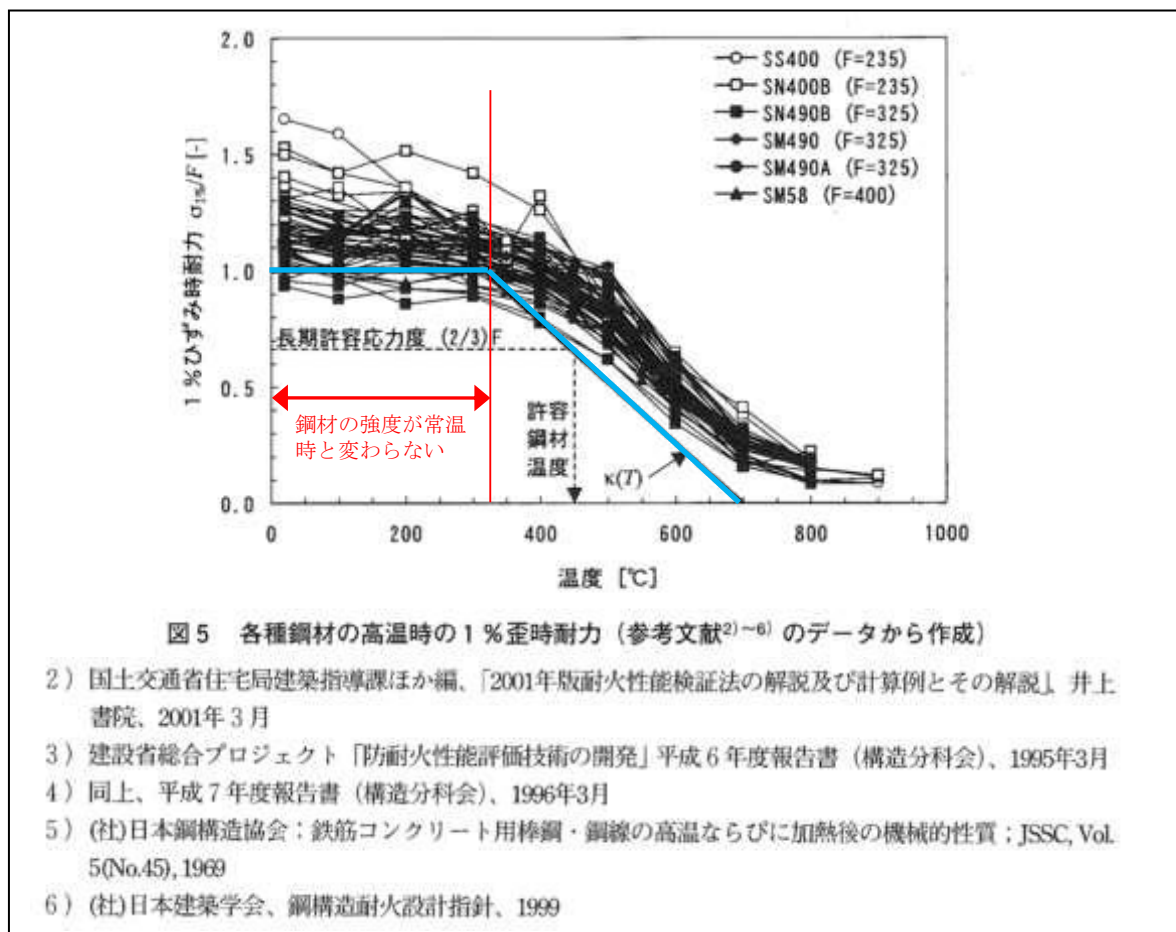
火害等級	状況	補修・補強の基本
I 級	無被害の状態	—
II 級	仕上げ部材に被害がある状態	仕上げのみの補修
III 級	鉄筋位置へ到達しない被害	強度、耐久性が低下している場合は、かぶりコンクリートをはつり落とし、現場打コンクリートまたはモルタルで被覆するなどの処置をとる
IV 級	主筋との付着に支障がある被害	部材体力が低下しているため、かぶりコンクリートをはつり落とし、主筋を完全に露出させ、現場打コンクリートで被覆する。場合により補修も行う。
V 級	主筋の座屈などの実質的な被害がある状態	補強、取り替え、増設

\*：建物の火害診断及び補修・補強方法，日本建築学会

## 排気筒の許容限界温度 325°C の設定根拠について

一般的に、鋼材は温度上昇に伴い強度が低下するが、その高温強度に対する公的規格は存在していない。一方、発電用原子力設備規格 設計・建設規格（一般社団法人 日本機械学会）では、鋼材の制限温度を 350°C としていること、また、文献<sup>※1</sup>では、鋼材の温度上昇に伴う強度低下率  $\kappa(T)$  が示されており、一般的な鋼材において温度が 325°C 以下であれば、その強度が常温時と変わらない ( $\kappa(T)=1$ ) <sup>※2</sup> としている（第1図）。

よって本評価では、保守的に鋼材の強度が常温時と変わらないとされる 325°C を許容限界温度とし、評価を実施する。



第1図 鋼材の温度上昇に伴う強度低下率<sup>※1</sup>（一部加筆）

※1：建築火災のメカニズムと火災安全設計，日本建築センター

※2：各温度における鋼材の1%ひずみ時耐力の測定値を常温の基準強度（F）で割ったものが強度低下率  $\kappa(T)$  であり、鋼材の強度が常温時と変わらない場合は、 $\kappa(T)=1$  となる。

## 各施設等の温度評価体系

## 1. 軽油タンクの温度評価体系

- ・火災時の輻射熱が軽油タンクに入射し、軽油およびタンク構造物の温度上昇に寄与すると想定する
- ・空気との熱伝達による放熱を考慮する
- ・軽油タンクの受熱時の面積  $S_1$  及び放熱時の面積  $S_2$  は、タンク屋根面積＋タンク側面面積／2 とする

$$S_1 = S_2 = \pi \frac{D_0}{4} + \frac{\pi}{2} D_0 H \quad [\text{m}^2]$$

- ・熱容量  $C$  は、軽油の熱容量＋タンク構造物の熱容量とする

$$C = \rho_p V c_p + \rho_s \left\{ \pi \frac{D_o^2 - D_i^2}{4} H + \pi \frac{D_o^2}{4} (e_1 + e_2) \right\} c_s \quad [\text{J/K}]$$

- ・タンクの温度上昇、輻射による入熱及びタンク表面からの放熱の関係は以下の式で表される。

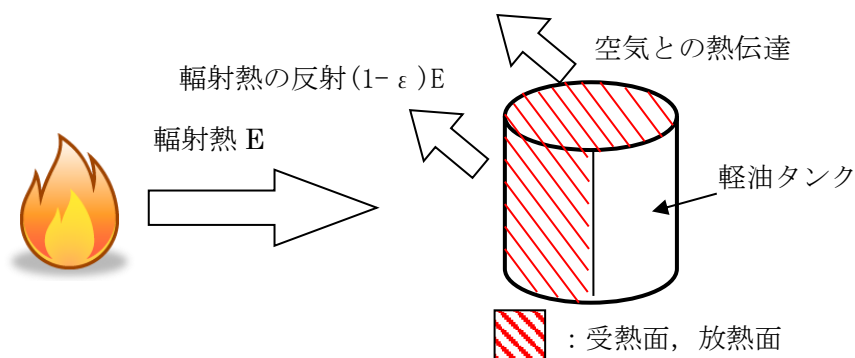
$$C \frac{dT}{dt} = \varepsilon E S_1 - h(T - T_{air}) S_2 \quad [\text{W}]$$

$T_{air}$  : 外気温度 [°C]

温度  $T$  は以下の式となる。

$$T = \frac{\varepsilon E S_1 + h S_2 T_{air}}{h S_2} - \left( \frac{\varepsilon E S_1 + h S_2 T_{air}}{h S_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-h S_2}{C} \right) t} \quad [^\circ\text{C}]$$

- ・使用するパラメータを表1に示す



第1図 軽油タンク温度評価体系図

第1表 評価に使用するパラメータ

パラメータ	数値	単位	備考
$T_0$ : 初期温度	38	°C	柏崎市の最高気温
$\varepsilon$ : 放射率	0.9	[-]	伝熱工学資料
$\rho_p$ : 軽油密度	918	[kg/m <sup>3</sup> ]	NUREG-1805
$c_p$ : 軽油比熱	1700	[J/kg・K]	石油便覧
$V$ : 軽油体積	528	[m <sup>3</sup> ]	保安規定による最低保有油量
$\rho_s$ : タンク構造材密度	7860	[kg/m <sup>3</sup> ]	伝熱工学資料
$c_s$ : タンク構造材比熱	473	[J/kg・K]	伝熱工学資料
$D_i$ : タンク内径	9.8	[m]	基本設計計算書
$D_0$ : タンク外形	9.872	[m]	設計図書
$e_1$ : タンク屋根厚	0.022	[m]	設計図書
$e_2$ : タンク底板厚	0.009	[m]	基本設計計算書
$H$ : タンク高さ	9.5	[m]	基本設計計算書
$h$ : 熱伝達率	17	[W/m <sup>2</sup> K]	空気調和衛生工学便覧
$C$ : 熱容量	$8.72 \times 10^8$	[J/K]	計算

## 2. 燃料移送ポンプの温度評価体系

燃料移送ポンプは、その周囲に設置する防護板によって、外部火災からの輻射による熱影響を受けないよう防護する。

防護板は、燃料移送ポンプの近傍で発生する軽油タンク火災を想定し、火炎の方向に面した箇所は、竜巻防護用の鋼板に耐火材・断熱材を設置することにより、その輻射による熱影響を受けないようにする。なお、それ以外の面については、他の外部火災による熱影響が軽微であることから、耐火材・断熱材を設置しない竜巻防護用の鋼板のみの仕様とする。

防護板の仕様としては、以下のとおり。

### ① 防護板（断熱）

燃料移送ポンプに隣接している軽油タンク火災を想定。燃料移送ポンプが輻射による熱影響を受けないようにするため、火炎に面した箇所に設置する耐火材・断熱材・鋼板（竜巻防護用）を有する防護板。

### ② 防護板（鋼板）

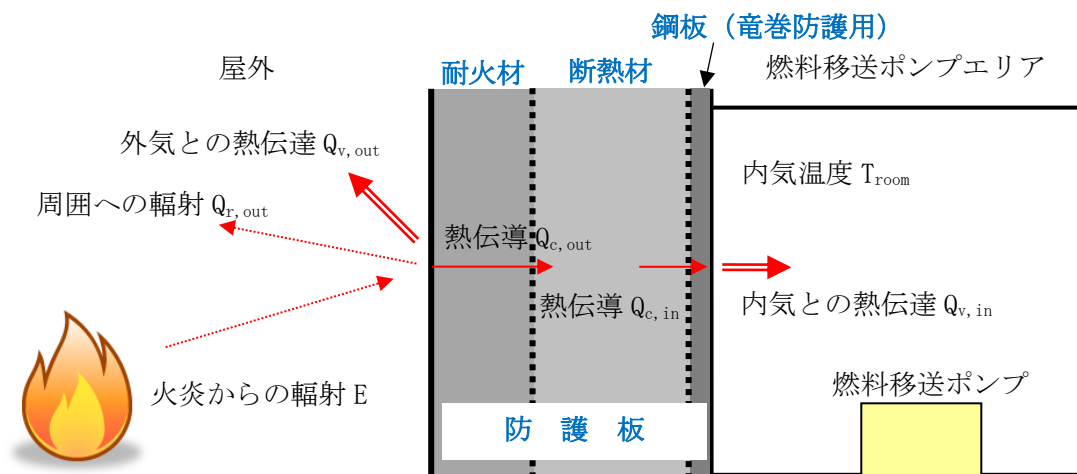
熱影響が軽微な面に設置する防護板。耐火材・断熱材は設置せず、竜巻防護用の鋼板のみの仕様。

防護板の仕様を踏まえた燃料移送ポンプの温度評価体系は、以下のとおり。

### 2.1 軽油タンク火災時

- 火災時の一定の輻射熱が燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（断熱）外面に入射し、一定時間維持されたと想定する

以下に概念図を示す。



第2図 防護板（断熱）における伝熱の概念図

- 以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、防護板（断熱）の内

面ならびに燃料移送ポンプエリア温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 防護板 (断熱) 外面からの距離,  $\alpha$  : 熱拡散率

- 防護板 (断熱) の外面および内面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

$$Q_{v,in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

$h_{in}$  : 防護板 (断熱) 内面熱伝達率, A : 防護板 (断熱) 内面の表面積,  $T_{in}$  : 防護板 (断熱) 内面温度,  $T_{room}$  : 燃料移送ポンプエリア温度

- 燃料移送ポンプエリア温度は, 火災による防護板 (断熱) 内面温度上昇に伴う熱負荷がポンプエリア内に蓄熱されることを考慮し, 次式で求める。

$$\Delta T_{room} = \frac{Q_{v,in}}{\rho CV}$$

$\rho$  : 空気密度, C : 空気比熱, V : ポンプエリア体積

## 2.2 軽油タンク火災以外の外部火災時

- 軽油タンク火災以外の外部火災時は, 保守的に輻射熱が防護板 (鋼板) に入射し, 防護板 (鋼板) の温度上昇に寄与すると想定する
- 空気との熱伝達による放熱を考慮する
- 防護板 (鋼板) の外面にて受熱 (面積 S/2), 放熱は外面及び内面 (面積 S) とし, 受熱は, 面積が最大となるよう側面の 2 面とした。
- 熱容量 C は, 防護板 (鋼板) の熱容量とする

$$C = \rho c V \quad [\text{J/K}]$$

- 防護板 (鋼板) の温度上昇, 輻射による入熱及び防護板 (鋼板) からの放熱の関係は以下の式で表される

$$C \frac{dT}{dt} = \varepsilon E \frac{S}{2} - h(T - T_{air})S \quad [\text{W}]$$

$T_{air}$  : 外気温度 [°C]

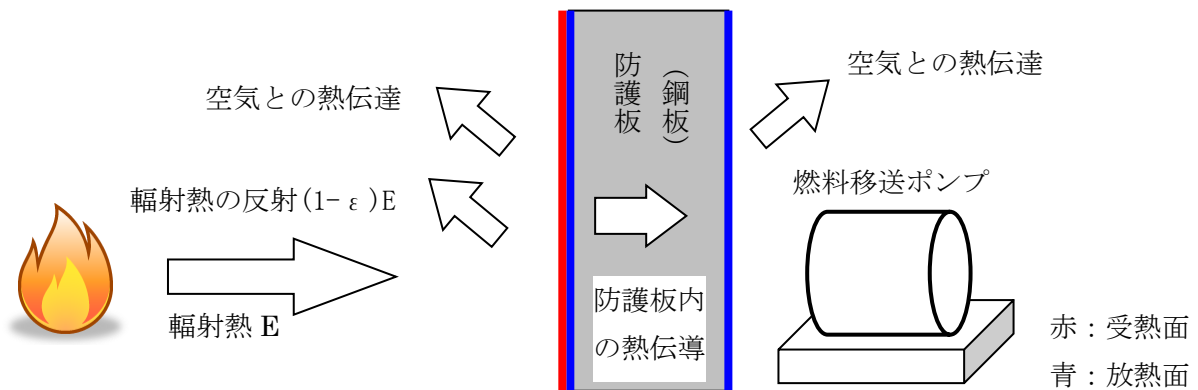
温度 T は以下の式となる。

$$T = \frac{\varepsilon E \frac{S}{2} + hST_{air}}{hS} - \left( \frac{\varepsilon E \frac{S}{2} + hST_{air}}{hS} - T_o \right) e^{\left(-\frac{hS}{C}\right)t} \quad [^\circ\text{C}]$$

<記号>

$T_0$ : 初期温度 55[°C],  $E$ : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\epsilon$ : 防護板(鋼板)外面の放射率(0.9)  
※<sup>1</sup>,  $h$ : 防護板(鋼板)表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S$ : 防護板(鋼板)放熱面積[m<sup>2</sup>]  
( $S/2$ : 受熱面積は外面のみ),  $C$ : 防護板(鋼板)の熱容量[J/K],  $\rho$ : 密度 7860[kg/m<sup>3</sup>]  
※<sup>1</sup>,  $c$ : 比熱 473[kJ/kgK]※<sup>1</sup>,  $v$ : 体積[m<sup>3</sup>],  $t$ : 燃焼継続時間[s],  $T_{air}$ : 外気温度  
55[°C]

※1: 伝熱工学資料, ※2: 空気調和・衛生工学便覧



第6図 防護板(鋼板)温度評価体系図



### 3. 排気筒の温度評価体系

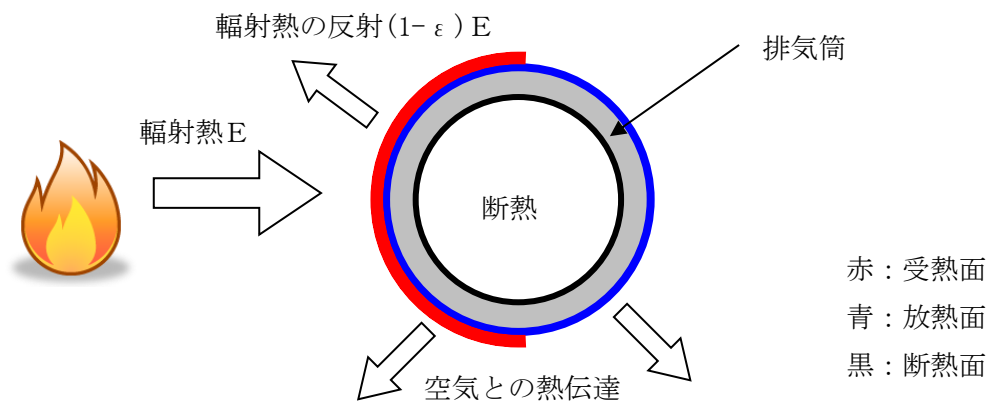
- 火災時の輻射熱が排気筒に入射し，排気筒の温度上昇に寄与すると想定する
- 排気筒外表面からの放熱を考慮し以下の式を解く

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = \varepsilon E \frac{S}{2} - h(T - T_0)S$$

$t \rightarrow \infty$ の場合で最大温度となり，その温度は以下の式となる

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$\rho$  : 排気筒部材密度 [kg/m<sup>3</sup>]， $C$  : 排気筒部材比熱 [J/kg/K]， $S$  : 排気筒単位長さあたりの外周面積 [m<sup>2</sup>]， $V$  : 排気筒単位長さあたりの体積 [m<sup>3</sup>]， $T$  : 最高温度 [°C]， $T_0$  : 初期温度 50 [°C] (柏崎市の最高気温)， $E$  : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]， $h$  : 熱伝達係数 17 [W/m<sup>2</sup>/K] (出典：空気調和・衛生工学便覧)， $\varepsilon$  : 放射率 0.9 [-] (出典：伝熱工学資料)

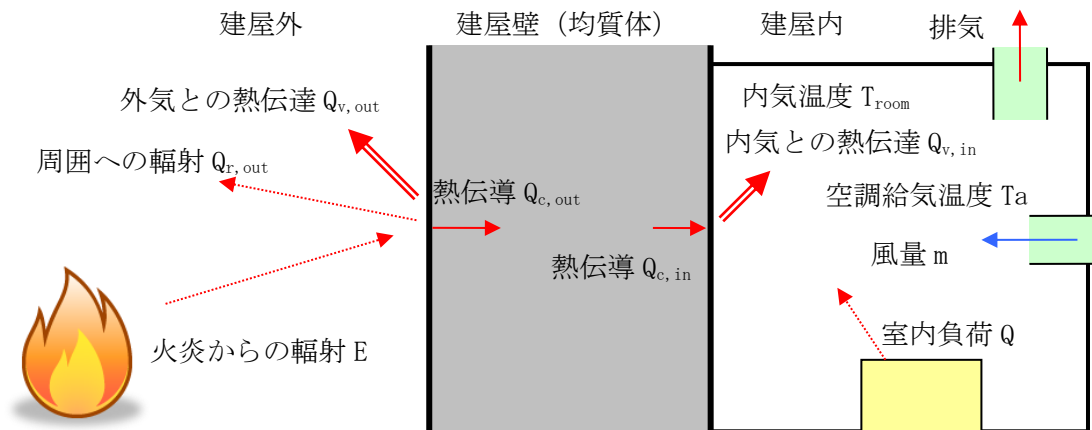


第3図 排気筒温度評価体系図

#### 4. 建屋内気温度の温度評価体系

- 火災時の一定の輻射熱が建屋外壁面に入射し、一定時間維持されたと想定する

以下に概念図を示す。



第4図 伝熱の概念図

- 以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、外壁および内壁面温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

$T$  : 温度,  $t$  : 時刻,  $x$  : 建物壁内における外壁面からの距離,  
 $\alpha$  : 熱拡散率

- 外壁および内壁面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

$$Q_{v, in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

$h_{in}$  : 内壁面熱伝達率,  $A$  : 内壁の表面積,  $T_{in}$  : 内壁面温度,  $T_{room}$  : 内気温度

- 内気温度は、火災による内壁面温度上昇に伴う熱負荷と室内の熱負荷および空調による除熱を考慮し、次式で求める。

$$T_{room} = \frac{Q + Q_{v, in}}{m \rho C} + T_a$$

$Q$  : 室内負荷,  $m$  : 風量,  $\rho$  : 空気密度,  $C$  : 空気比熱,  $T_a$  : 空調給気温度

5. 一定の輻射熱を受ける壁面（コンクリート）の温度評価体系

十分に厚い固体の表面が放射熱で加熱される場合の温度分布は、以下の一次元の熱伝導方程式により表すことができる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

これを表面（ $x = 0$ ）における境界条件

$$\varepsilon q = h\{T(0,t) - T_0\} - k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}$$

の下で入射熱流束が時間的に一定であれば、次式が得られる。

$$T_s(t) = T_0 + \frac{\varepsilon q}{h} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h^2 t}{k\rho c}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{h^2 t}{k\rho c}}\right) \right\}$$

ただし、 $\operatorname{erfc}(z)$ は余誤差関数であり、 $T_s(t) = T(0,t)$ とおいた。  
また、 $\varepsilon q/h(T_s - T_0) < 10$ の範囲では、以下のとおり近似できる。

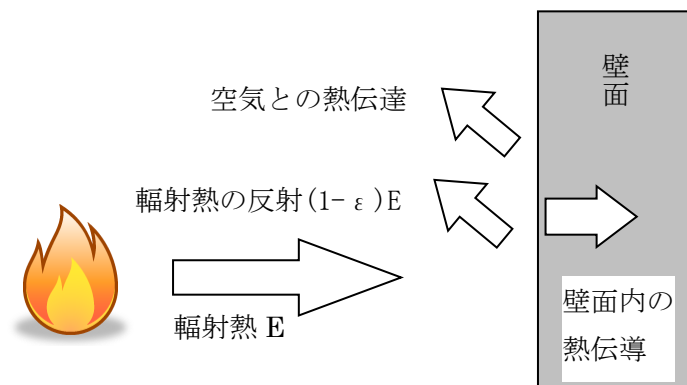
$$\frac{\varepsilon q}{h(T_s - T_0)} = \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1$$

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left(\frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1\right) \frac{h}{\varepsilon q}}$$

<記号>

$c$  : 比熱[kJ/kgK],  $T$  : 温度[K],  $\operatorname{erfc}(z)$  : 余誤差関数,  $T_s$  : 表面温度[K],  $h$  : 熱伝達率[kW/m<sup>2</sup>K],  $\varepsilon$  : 表面の放射率,  $k$  : 熱伝導率[kW/mK],  $\rho$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>],  $q$  : 入射熱流束[kW/m<sup>2</sup>],  $t$  : 燃焼継続時間[s]

出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター



第5図 建屋温度評価体系図

## 初期温度の考え方

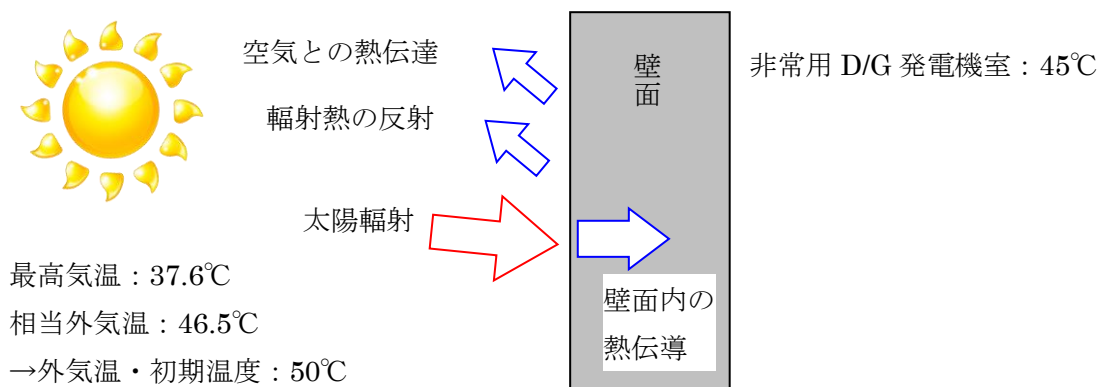
## 1. 外壁（コンクリート）面の初期温度

空気調和・衛生工学便覧を基に、日射の影響を考慮した相当外気温を求め、その値を切り上げた値を外気温および評価対象施設の初期温度として設定した。なお、受熱面は各壁面の方向（東西南北）とした。

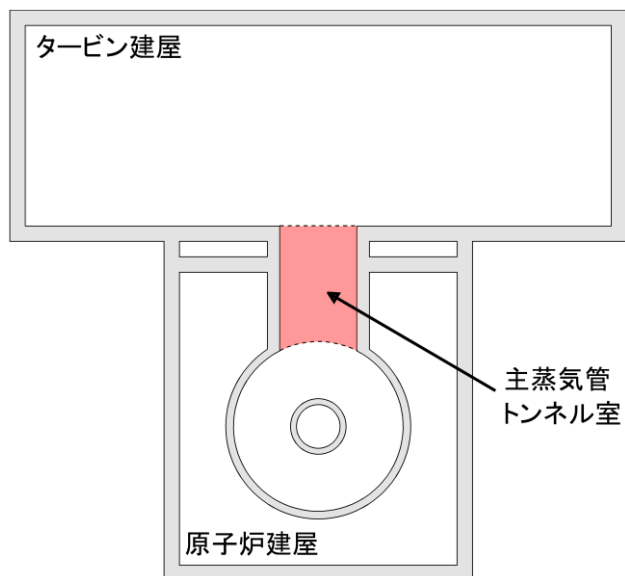
柏崎市の最高気温 37.6℃に対して、外壁面の相当外気温の最大値は 46.5℃となる。46.5℃を切り上げ、50℃を外気温および初期温度として設定する。

なお、原子炉建屋内で最も室温が高いのは、主蒸気管トンネル室（設計温度：55℃）であり、外壁面の初期温度 50℃より高いものの、その外壁は原子炉建屋とタービン建屋の間に位置しており、外部火災による輻射の影響を受けない。

次いで室温が高いのは、非常用 D/G 発電機室（設計室温：45℃）となるが、外壁面の初期温度 50℃未満であることから、初期温度の設定は妥当なものとする。



第 1 図 原子炉建屋外壁面温度評価体系図



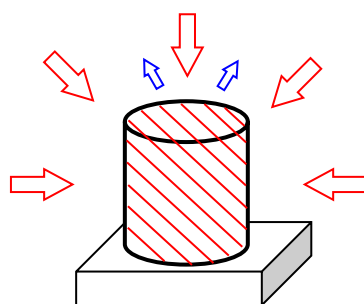
第2図 主蒸気管トンネル室の位置

## 2. 軽油タンクの初期温度

太陽輻射熱は、日の出から日中の日射の最大値約  $1\text{kW/m}^2$  まで増加するので、平均的には  $0.5\text{kW/m}^2$  の日射が最大値をとるまでの7時間（6～13時）継続して軽油タンクを加熱すると仮定する。最大値以降は日射量の減少に伴う放熱により軽油温度は減少に向かうと考える。受熱面はタンクの側面及び上面とする。


日中の軽油タンクの最高温度は、最低気温の最高値  $27^\circ\text{C}$  から、日射及び外気からの入熱による温度上昇分  $6.7^\circ\text{C}$  を加味し、 $33.7^\circ\text{C}$  と算定される。


一方、柏崎市の最高気温の最高値は、 $37.6^\circ\text{C}$  であり、日射及び外気からの入熱を考慮し算出した温度を大きく超えないことから、外気温の最高値  $37.6^\circ\text{C}$  を切り上げ、 $38^\circ\text{C}$  を外気温および初期温度として設定する。



最高気温： $37.6^\circ\text{C}$

→外気温・初期温度： $38^\circ\text{C}$

太陽輻射：

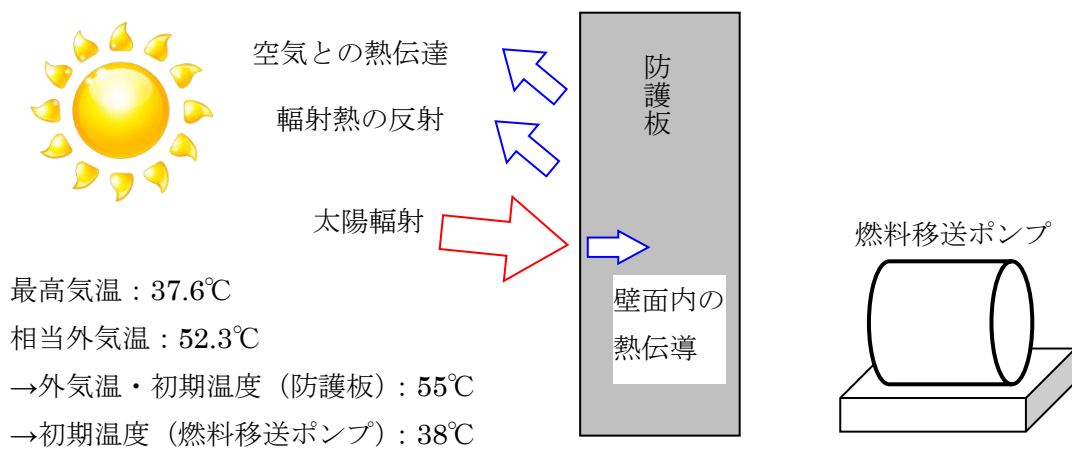
空気との熱伝達・輻射熱の反射・熱伝導：

第3図 軽油タンク温度評価体系図

### 3. 燃料移送ポンプ（防護板）の初期温度

空気調和・衛生工学便覧を基に、日射の影響を考慮した相当外気温を求め、その値を切り上げた値を外気温および評価対象の初期温度として設定した。なお、受熱面はポンプ周囲に設置している防護板とする。

柏崎市の最高気温 37.6℃に対して、燃料移送ポンプの周囲に設置している防護板外表面の相当外気温の最大値は 52.3℃となる。52.3℃を切り上げ、55℃を外気温の初期温度として設定する。また、燃料移送ポンプについては、周囲に防護板が設置されており、日射の影響を受けないことから、柏崎市の最高気温の最高値 37.6℃を切り上げ、38℃を初期温度として設定する。



第4図 燃料移送ポンプ温度評価体系図

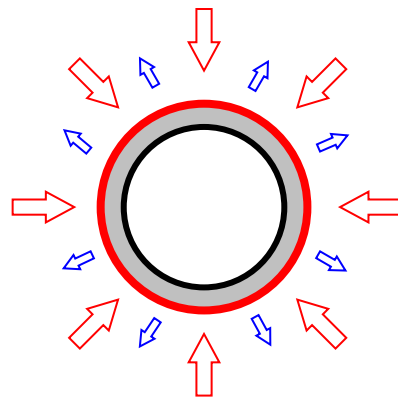
#### 4. 排気筒の初期温度



空気調和・衛生工学便覧を基に，日射の影響を考慮した相当外気温を求め，その値を切り上げた値を外気温および評価対象の初期温度として設定した。なお，受熱面は排気筒の側面とした。

柏崎市の最高気温 37.6℃に対して，排気筒外表面の相当外気温の最大値は 45.1℃となる。45.1℃を切り上げ，50℃を初期温度として設定する。



最高気温：37.6℃  
相当外気温：45.1℃  
→外気温・初期温度：50℃



太陽輻射：   
空気との熱伝達・輻射熱の反射・熱伝導： 

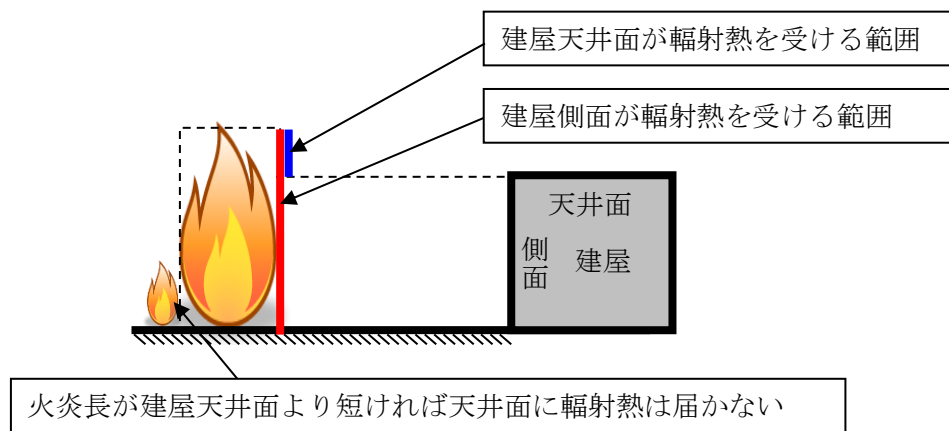
第 5 図 排気筒温度評価体系図

## 建屋天井面への熱影響評価

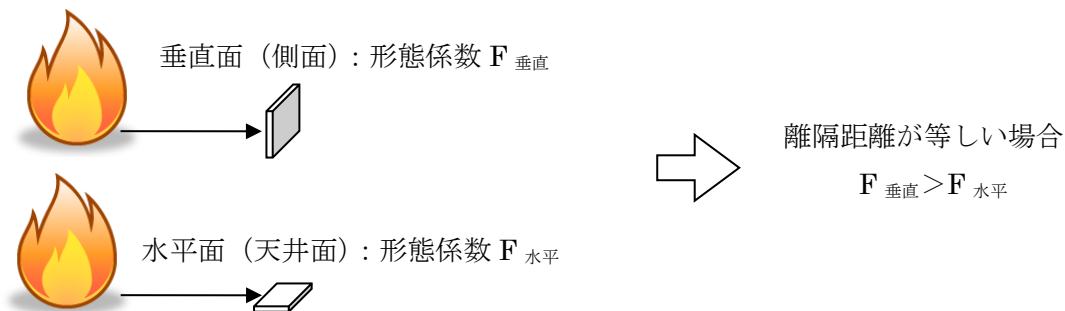
建屋側面への熱影響を実施したが、天井面についての熱影響を検討する。

- ・ 火炎長が建屋天井面より短い場合は天井面に輻射熱は届かないことから熱影響はない。(第1図)
- ・ 火炎長が建屋天井面より長くなる場合は輻射熱が天井面に届くが、その輻射熱は側面の輻射熱より小さい。(第1図)
- ・ 火炎からの離隔距離が等しい場合、垂直面(側面)と水平面(天井面)の形態係数は、垂直面の方が大きいことから、天井面の熱影響は側面に比べて小さい。(第2図)
- ・ コンクリートの厚さは側面より天井面の方が薄いことから、天井面の方が建屋内側の熱伝達による放熱の効果が大きくなるため熱影響は小さい。

以上より、側面の熱影響を実施することで天井面の熱影響は包絡されることを確認した。



第1図 天井面への輻射熱の影響



第2図 垂直面と水平面の形態係数の大きさ



## 発電所北部で発生する森林火災について

### 1. 森林火災の想定

森林火災における火線強度は風下方向が強くなるため、これまでの発火点（ケース 1～3）は発電所の風上方向に設定しているが、ケース 2 の解析結果より火災前線の広がりや火線強度分布が確認された。このため、風向を考慮した場合、発電所は風下とならないものの、発電所北部で発生する森林火災を想定し感度解析を実施する。

#### (1) 発火点の設定

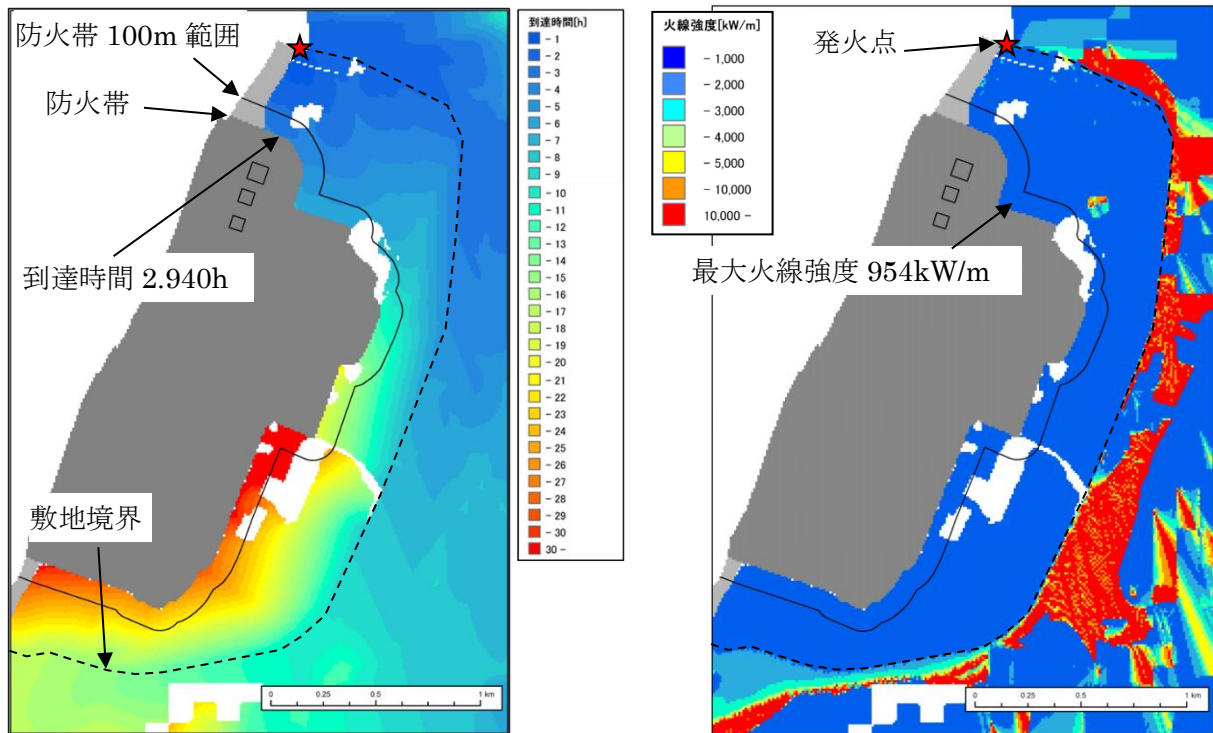
発電所近隣からの発火の方が防火帯周辺に火災が到達するまでの時間が短くなること、最大風速観測時に出現頻度が多い風向は北北西であることから、発電所敷地境界北部の発火を想定する。たき火などによる火災を考慮し、防火帯までの距離が短くなる北北東方向の海岸沿いに発火点をケース 4 として選定する。(防火帯から約 0.4km)

#### (2) 必要データ

風向は北北西とするが、それ以外の気象条件や植生データ等の FARSITE 入力データは発火点（ケース 1～3）と同等とする。

#### (3) 解析結果

FARSITE による解析結果を第 1 図に示す。



第1図 解析結果 敷地周辺拡大（左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布）

(4) 火線強度および火炎の到達時間の算出結果

火線強度および火炎の到達時間の算出結果を第1表に示す。

第1表 火線強度および火炎の到達時間

評価項目	ケース4	ケース1～3
最大火線強度[kw/m]	954	2948 <sup>※1</sup>
火炎の到達時間[hour]	2.940	2.952 <sup>※2</sup>

※1：ケース2の火線強度（最大値）

※2：ケース3の火炎の到達時間（最小値）

2. 評価結果

発電所が風下ではないことから、防火帯100mの範囲におけるケース4の最大火線強度はケース2と比較し小さい値となり、発電用原子炉施設への熱影響はケース2の評価に包絡される。

また、火炎の到達時間が40秒程度短くなるが、防火帯付近への予防散水は敷地境界域での火災発見から約50分で開始可能であり、自衛消防隊の対応に影響をおよぼすことはないと評価する。

## 8月の気象条件を考慮した森林火災について

## 1. 森林火災の想定

森林火災の想定における気象条件は、過去 10 年間（2003～2012 年）を調査し、森林火災の発生件数の多い 3～5 月の卓越風向、最大風速、最高気温、及び最小湿度の組合せとしているが、3～5 月を除き、新潟県、柏崎市・刈羽村・出雲崎町における 8 月の森林火災発生件数が比較的多く発生していることから、8 月の気象条件を適用した森林火災の感度解析を実施する。

なお、発火点は最大火線強度が大きくなると考えられるケース 2 の発火点とし、これを代表ケースとして解析を実施する。

## (1) 気象条件の設定

8 月における過去 10 年間の気象条件を調査した結果を第 1 表（上段）に示す。

第 1 表 8 月の気象条件を適用した気象条件と 3～5 月の気象条件との比較

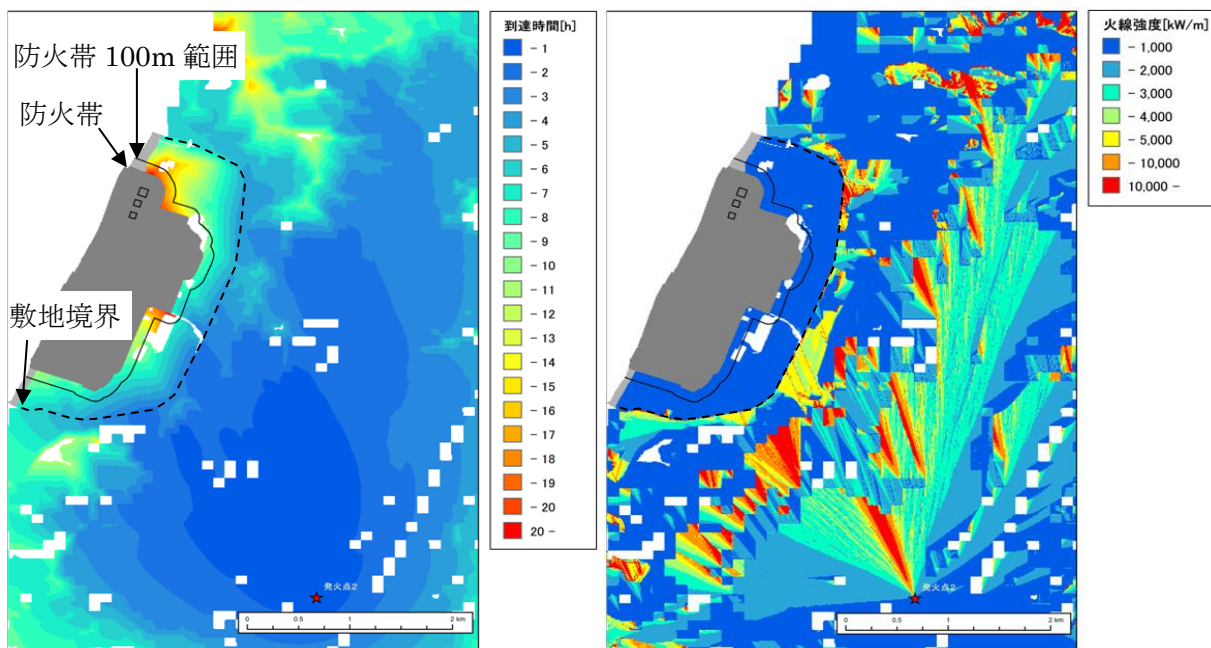
	風向[16 方位]	最大風速[m/s]	最高気温[°C]	最小湿度[%]
8 月	南南東	11.0	37.5	31
3～5 月 (ケース 2)	南南東	16.0	31.9	12

## (2) 必要データ

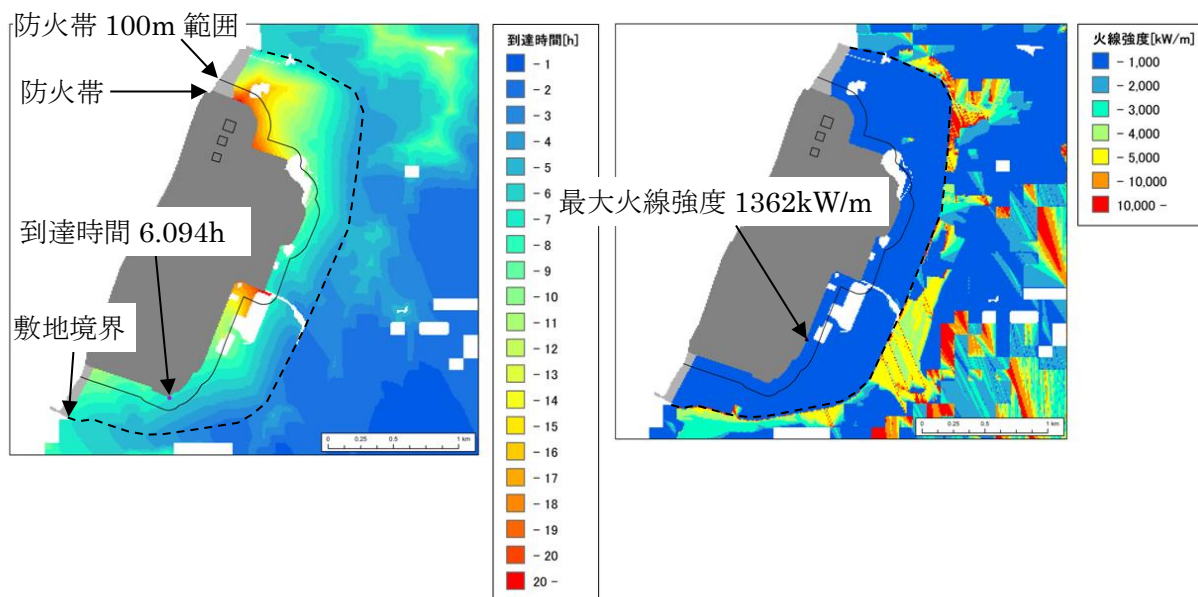
気象条件以外の植生データ等の FARSITE 入力データは、ケース 2 と同等とする。

## (3) 解析結果

FARSITE による解析結果を第 1 図、第 2 図に示す。



第1図 解析結果（左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布）



第2図 解析結果 敷地周辺拡大（左：火炎到達時間分布，右：火線強度分布）

(4) 火線強度および火炎の到達時間の算出結果

火線強度および火炎の到達時間の算出結果を第2表に示す。

第 2 表 火線強度および火炎の到達時間

評価項目	8 月	3～5 月
最大火線強度 [kw/m]	1362	2948 <sup>※1</sup>
火炎の到達時間 [hour]	6.094	2.952 <sup>※2</sup>

※ 1 : ケース 2 の火線強度 (最大値)

※ 2 : ケース 3 の火炎の到達時間 (最小値)

## 2. 評価結果

8 月の気象条件を適用したケースでは、気象条件における気温は上昇しているものの、風速の低下や湿度の上昇による影響が大きく最大火線強度が低下していることから、発電用原子炉施設への熱影響はケース 2 の評価に包絡される。

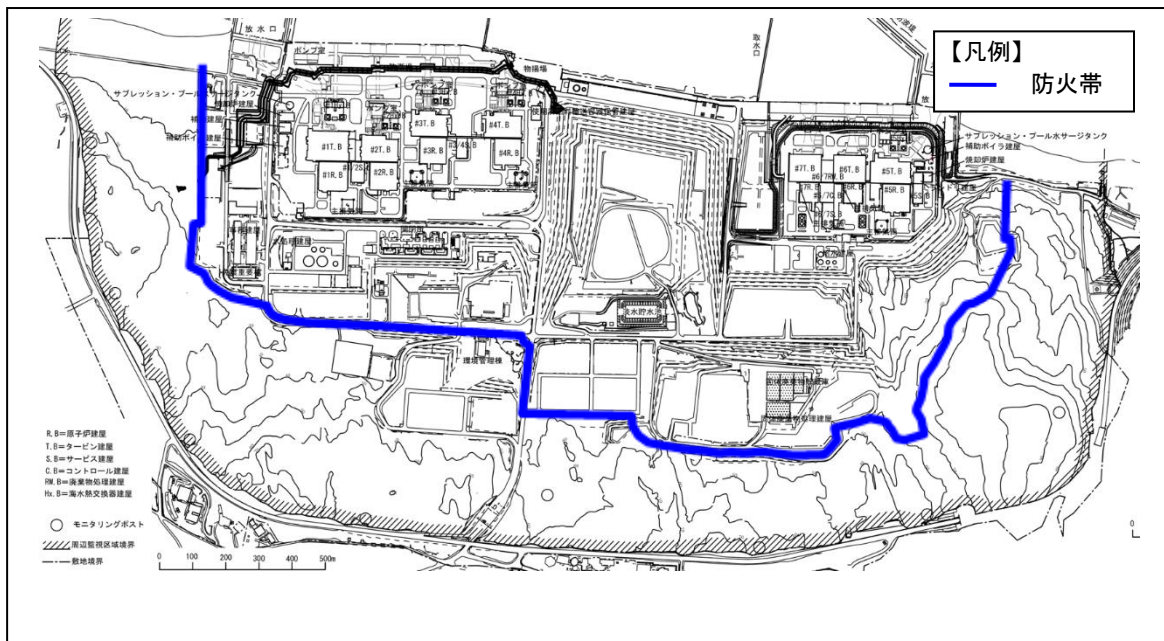
また、同様の影響によって延焼速度が遅く、火炎の到達時間はケース 3 に対して 2 倍以上となっており、自衛消防隊の対応に影響をおよぼすことはないと評価する。

斜面に設定している防火帯の地盤安定性の観点からの考え方について

1. 防火帯の概要

防火帯は、第 1 図に示すとおり発電所設備の配置状況等を考慮し、干渉しないように設定している。

設定にあたっては、草木を伐採する等、可燃物を排除し、その後、除草剤を散布した上で、モルタル吹付け等を行い、草木の育成を抑制し、可燃物が無い状態を維持する。



第 1 図 防火帯位置

## 2. 防火帯斜面部の崩壊による影響評価

### (1) 防火帯斜面部の崩壊箇所の抽出方法

防火帯斜面部の崩壊箇所の抽出は、保管場所及びアクセスルートの周辺斜面及び敷地下斜面と同様に、第2図に示す「宅地防災マニュアルの解説」※1に基づき抽出する。崩壊後の堆積形状及び影響範囲のイメージを第3図に示す。

崩壊後の堆積形状は、第3図に示すとおり崩壊面積と等価となるように設定した。

土砂災害に係る危険箇所のうち、宅地造成に伴う災害に最も関連の深い急傾斜地崩壊危険箇所の考え方を以下に示す。

#### 【危険箇所としての要件】

- ① 水平面とのなす角度が30度以上であること。
- ② 斜面の高さが5m以上であること。
- ③ 斜面上部又は下部に人家が5戸以上あること（官公署、学校、病院、旅館等がある場合は5戸未満でも可）。

斜面上部又は下部とは、下図に示すように急傾斜地（傾斜30度以上のがけ）の下端及び上端から当該急傾斜地の高さの、それぞれ2倍及び1倍程度の範囲（概ね50mを限度とする）をいう。

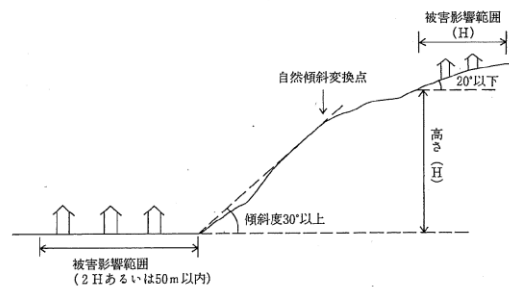


図 X.1 急傾斜地崩壊危険箇所の要件

### 第2図 「宅地防災マニュアルの解説」※1における急傾斜地崩壊危険箇所の要件

※1：「宅地防災マニュアルの解説」（宅地防災研究会編集，2007）

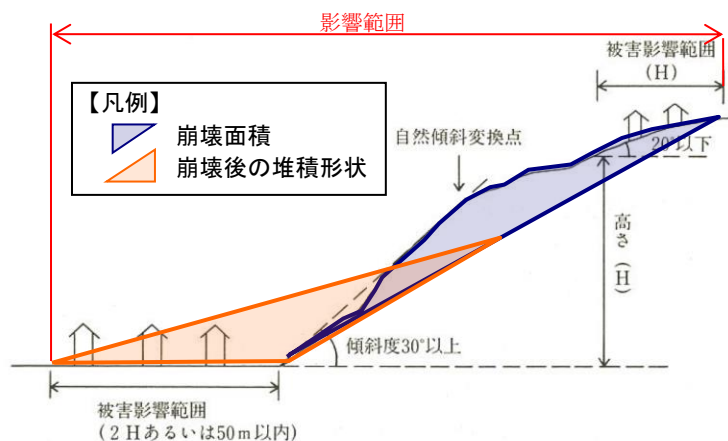


図 X.1 急傾斜地崩壊危険箇所の要件

「宅地防災マニュアルの解説」に一部加筆

### 第3図 崩壊後の堆積形状及び影響範囲のイメージ

(2) 防火帯斜面部の崩壊箇所の抽出

抽出された防火帯斜面部の崩壊箇所は第4図に示すとおり2箇所であり、当該箇所では防火帯設定範囲及びその内側へ崩壊した土砂が流入する可能性がある。



第4図 崩壊する可能性がある斜面の抽出結果

(3) 防火帯斜面部の崩壊の影響

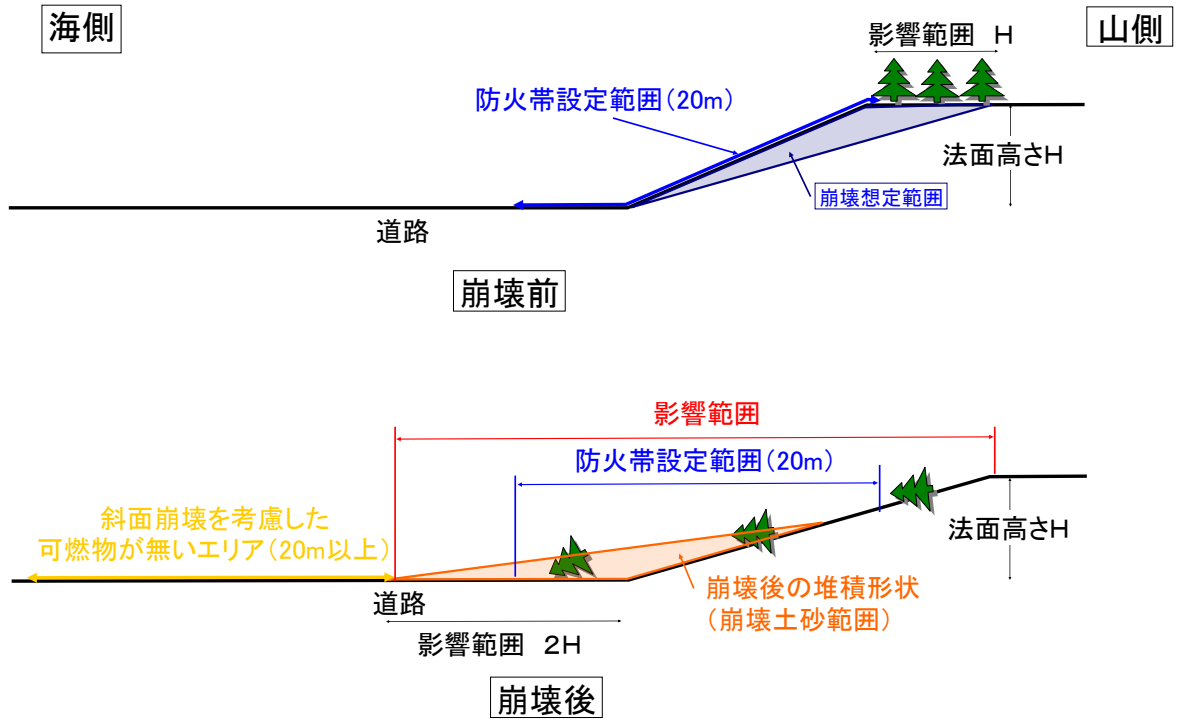
a. 崩壊箇所①

当該箇所の斜面が崩壊した場合の防火帯への影響イメージを第5図に、防火帯設定範囲と斜面崩壊影響範囲を第6図に示す。

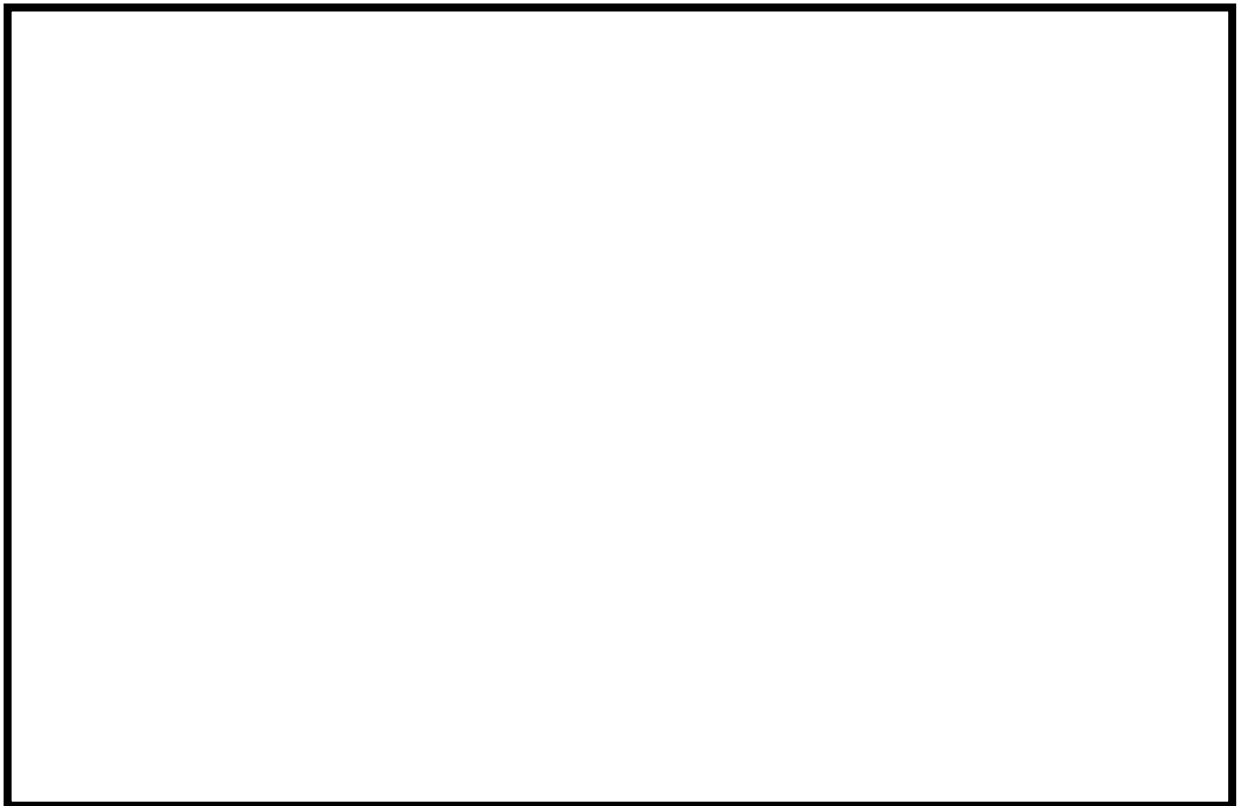
斜面が万が一崩壊した場合、防火帯設定範囲に斜面上部から草木が混入する可能性があるが、崩壊土砂範囲より内側に斜面崩壊を考慮した防火帯幅（20m）以上の可燃物が無いエリアを設定することから、防火帯としての機能は喪失しない。



防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません



第5図 斜面が崩壊した場合の防火帯への影響イメージ（崩壊箇所①）

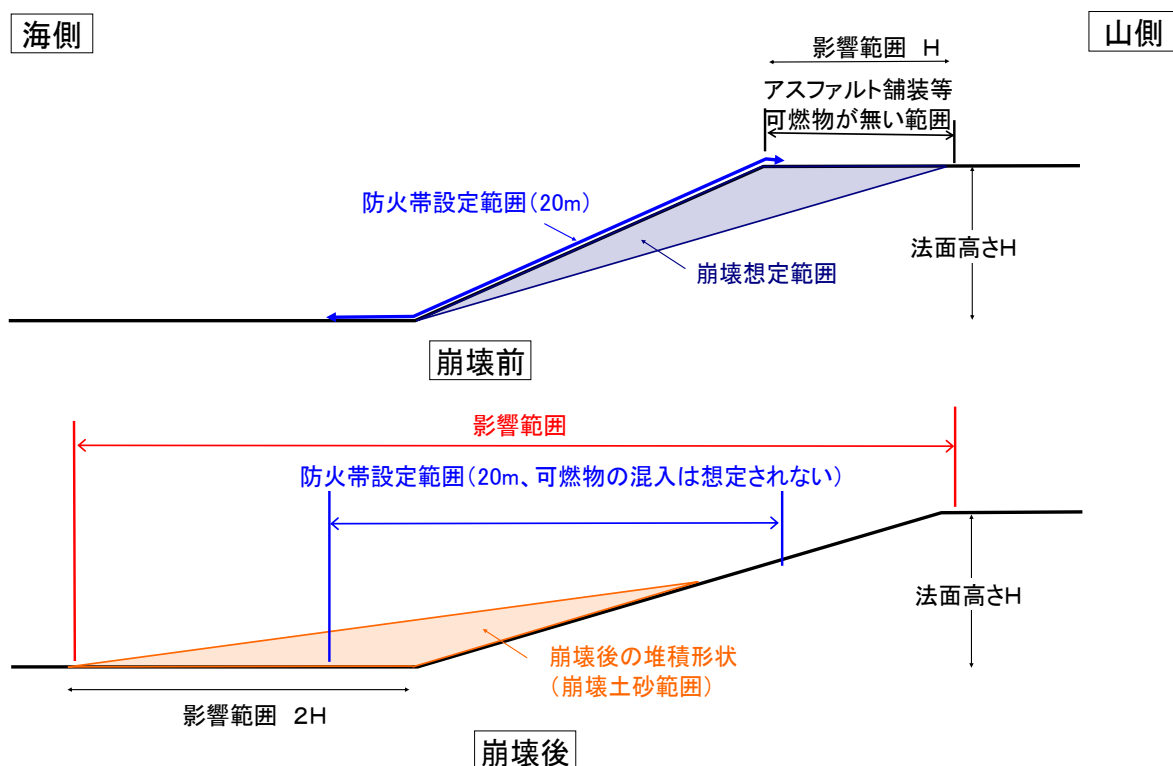


第6図 斜面崩壊影響範囲（崩壊箇所①）

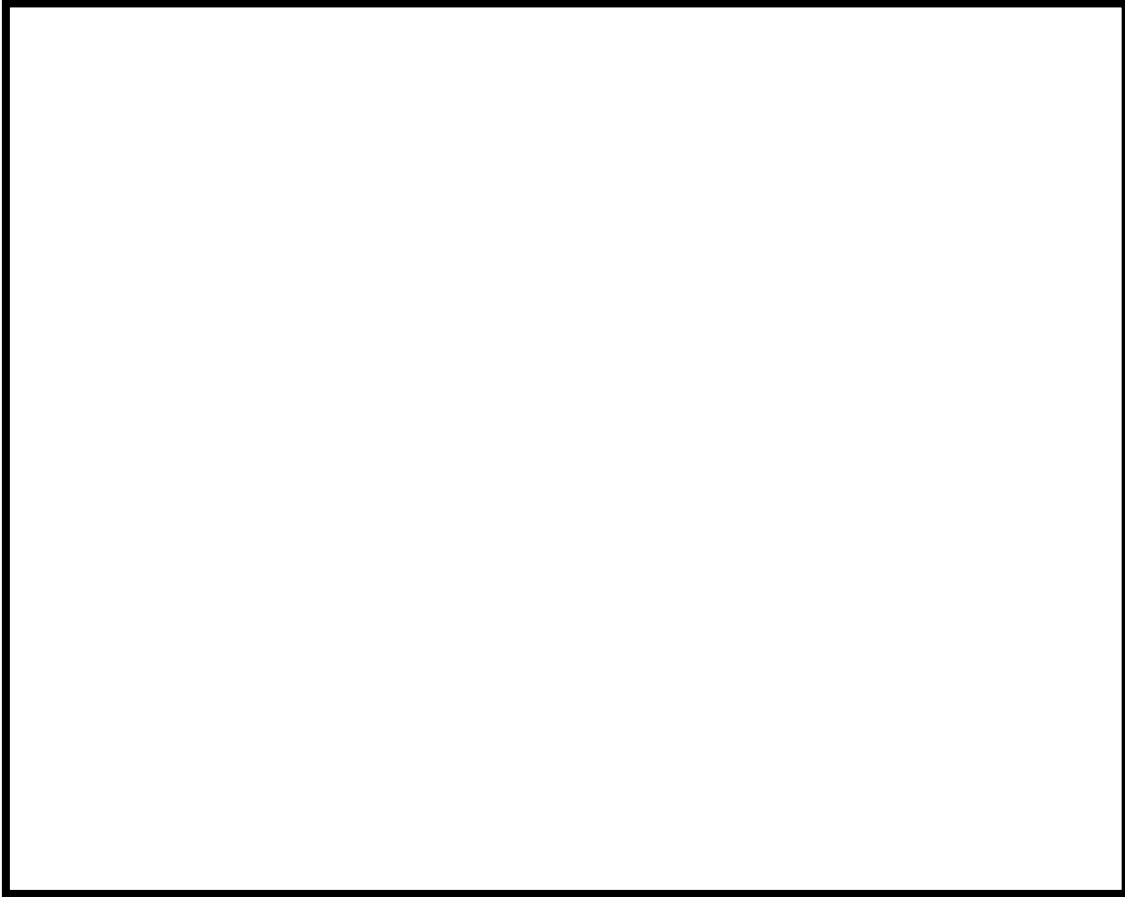
b. 崩壊箇所②

当該箇所の斜面が崩壊した場合の防火帯への影響イメージを第7図に、斜面崩壊影響範囲を第8図に示す。

当該箇所においては、斜面上部の影響範囲はアスファルト舗装等可燃物が無い範囲であることから、斜面が万が一崩壊した場合においても、防火帯設定範囲に可燃物が混入する可能性はないことから、防火帯としての機能は喪失しない。



第7図 斜面が崩壊した場合の防火帯への影響イメージ（崩壊箇所②）



第8図 斜面崩壊影響範囲（崩壊箇所②）

(4) まとめ

防火帯斜面部の崩壊による影響評価の結果、抽出された防火帯斜面部の崩壊箇所は2箇所あるものの、以下の理由により、防火帯の機能は維持されることを確認した。

a. 崩壊箇所①

崩壊土砂範囲より内側に斜面崩壊を考慮した防火帯幅（20m）以上の可燃物が無いエリアを設定する。

b. 崩壊箇所②

斜面が万が一崩壊した場合においても、防火帯設定範囲に可燃物が混入する可能性はない。

### 防火帯内植生による火災について

第 1 図に防火帯内の植生（平成 27 年 1 月現在）を示す。

発電用原子炉施設の周囲の植生は一部が低中木や広葉樹であるものの大半が芝地である。また、重大事故等対処設備の周囲は広葉樹や 10 年生以上のマツで火線強度が低くなる植生であることから、防火帯内の植生による発電用原子炉施設および重大事故等対処設備に対しての影響はない。

なお、重大事故等対処設備からの出火を想定した場合、炎感知器やサーモカメラにて火災の早期検知が可能であること、周囲の広葉樹等に延焼した場合を想定したとしても、発電所の防火帯内には道路（幅 10m 程度）や非植生のエリアが多くあることから、更なる延焼の可能性は低い。

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

6 条-別添 4 (外火)-1-添付 2-109

第1図 発電所防火帯内植生図

## 被ばく評価で使用している気象条件との違いについて

被ばく評価で使用している気象条件との違いについて以下に示す。

なお、被ばく評価は、発電所からの放射性物質の拡散状況を把握するために発電所構内の気象観測所のデータを用いている。一方、森林火災は発電所構外からの火災の進展を評価するため、発電所周辺の気象を代表するように発電所構外の気象観測所のデータを用いた

第1表 被ばく評価で使用している気象条件との違い

	森林火災	被ばく評価
データ取得場所	柏崎気象観測所 新潟気象台	発電所構内気象観測装置
データ取得期間	過去10年（2003～2012年）	1985年10月から1年間（KK7）
風速	3～5月の最大風速 風速が大きい方が延焼しやすく 保守的	大気安定度の算出に使用 風速が小さい方が拡散しやすくなる
風向	3～5月の卓越風向（16方位）	16方位の風向出現回数を考慮して評価
気温	3～5月の最高気温 気温が高い方が可燃物の水分量が少なくなり保守的	評価には使用しない
湿度	3～5月の最小湿度 湿度が低い方が可燃物の水分量が少なくなるため保守的	評価には使用しない
日射量	最大日射量（雲なし）とする 日射量が多い方が可燃物の水分量が少なくなるため保守的	大気安定度の算出に使用 日射量が大きい方が拡散しやすくなる
降雨量	降水量なしとする 降水が無い方が可燃物の水分量が少なくなるため保守的	評価には使用しない

マツ 10 年生と設定することの妥当性について

マツ 10 年生未満とマツ 10 年生では、可燃物データのうち生きた木質の fuel 量のみ異なり他のパラメータは同じである。

10 年生未満のマツが 1 本でも存在していれば 10 年生未満のマツを選択するのではなく、10 年生未満のマツが一様に広がり、生きた木質の fuel 量が少ない状態であれば 10 年生未満とする。10 年以上のマツが存在している中に 10 年生未満のマツが存在するようなエリアであれば、10 年生未満よりも生きた木質の fuel 量は多く延焼を抑制する効果があることから 10 年生未満のデータではなく 10 年生のデータを用いることは適当である。また、柏崎刈羽原子力発電所構内の森林簿から生きた木質の fuel 量を算出すると<sup>※2</sup>、約 80ton/ha であり、マツ 10 年生の生きた木質の fuel 量より大きいことから、10 年生のデータを入れることは妥当である。

第 1 表 マツおよび落葉広葉樹の可燃物データ

パラメータ	下草の有無	1 時間以内に乾燥する木質の fuel 量 <sup>*1</sup>	10 時間以内に乾燥する木質の fuel 量 <sup>*1</sup>	4 日以内に乾燥する木質の fuel 量 <sup>*1</sup>	生きた草の fuel 量 <sup>*1</sup>	生きた木質の fuel 量 <sup>*1</sup>	1 時間以内に乾燥する木質の表面積 / 体積	生きた草の表面積 / 体積	生きた木質の表面積 / 体積	林床可燃物の深さ	1 時間以内に乾燥する木質で延焼が止まる水分量	枯死可燃物の熱容量	生体可燃物の熱容量
単位	-	ton/ha	ton/ha	ton/ha	ton/ha	ton/ha	1/cm	1/cm	1/cm	cm	%	J/kg	J/kg
マツ 10 年生未満	有	6.75	4.48	11.23	0	<u>15.71</u>	70.44	59	48	182.9	31	19958	19958
マツ 10 年生	有	6.75	4.48	11.23	0	<u>44.24</u>	70.44	59	48	182.9	31	19958	19958
マツ 20 年生	有	4.48	2.24	1.12	0	75.03	70.44	59	48	182.9	31	19958	19958
マツ 30 年生	無	4.48	2.24	1.12	0	102.56	70.44	59	48	6.1	31	19958	19958
マツ 40 年生	無	1.66	0	0	0	130.20	70.44	59	48	6.1	31	19958	19958
落葉広葉樹	有	6.75	4.48	11.23	0	62.66	149.48	59	48	182.9	25	18524	18524

福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価 独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES) 平成24年6月より抜粋

※1: fuel 量とは, 単位面積当たりの可燃物(燃料)の量[ton/ha]

※2: 森林簿に記載の区画毎の面積  $S$ [ha], 材積  $V$ [ $m^3$ ] および, マツの気乾比重  $520$ [ $kg/m^3$ ] <sup>※3</sup> から, 生きた木質の fuel 量[ton/ha] を算出した。 生きた木質の fuel 量  $= 520 \times V \div S \times 1000$

※3: 一般財団法人日本木材総合情報センターより

気乾比重: 大気中に放置された木材が大気の温度条件と湿度条件に対応し, 含有水分が平衡に達した状態での比重



石油コンビナート等の火災・爆発について

## 1. はじめに

本評価は、発電所敷地外で発生する石油コンビナート等の火災やガス爆発に対してより一層の安全性向上の観点から、その火災やガス爆発が発電所に隣接する地域で起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。

## 2. 石油コンビナート等の火災・爆発影響評価

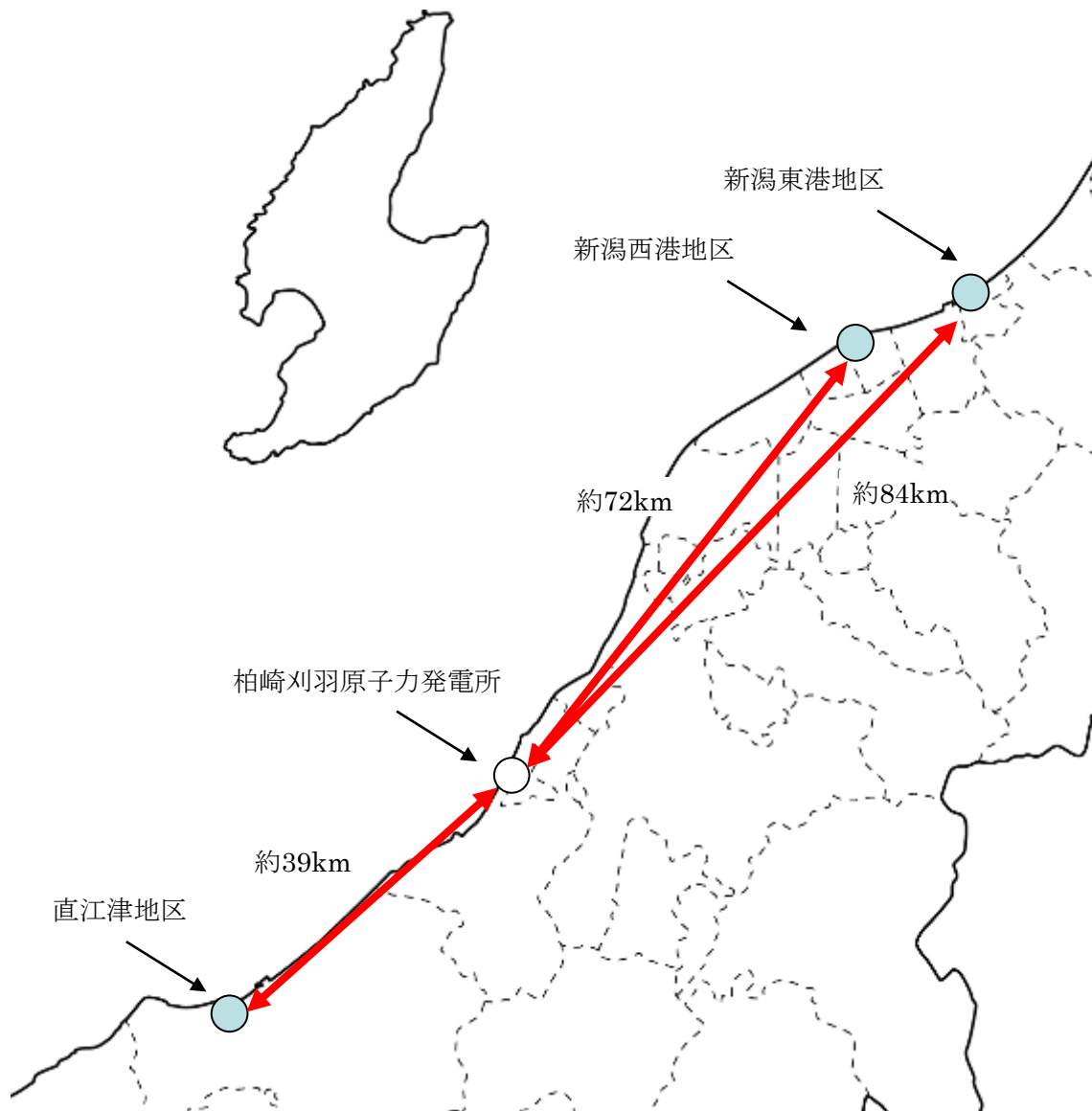
発電用原子炉施設の周りには周辺監視区域があり、敷地境界との間には少なくとも約 811m の離隔距離が確保されている。仮に火災・爆発が発生した場合に影響が大きいと考えられるものとして、爆発物や化学物質を大量に扱う石油コンビナート等について評価を実施する。

### (1) 評価対象範囲

評価対象は、発電所敷地外の半径 10km 圏内に存在する石油コンビナート等とする。なお、石油コンビナート等とは、石油コンビナート等災害防止法で規制される特別防災区域内の特定事業所およびコンビナート等保安規則で規制される特定製造事業所とする。

### (2) 評価結果

石油コンビナート等災害防止法で規制される新潟県内の特別防災区域は「直江津地区」「新潟西港地区」「新潟東港地区」の三カ所存在するが、これらは、それぞれ発電所から約 39km、約 72km 及び約 84km であり、いずれも発電所から 10km 以遠である（第 2-1 図）。また、コンビナート等保安規則で規制される特定製造事業所が評価対象範囲内に存在しないことを新潟県防災局に確認した。以上より、評価対象範囲内に石油コンビナート等は存在せず、発電用原子炉施設に影響を及ぼすことはない。



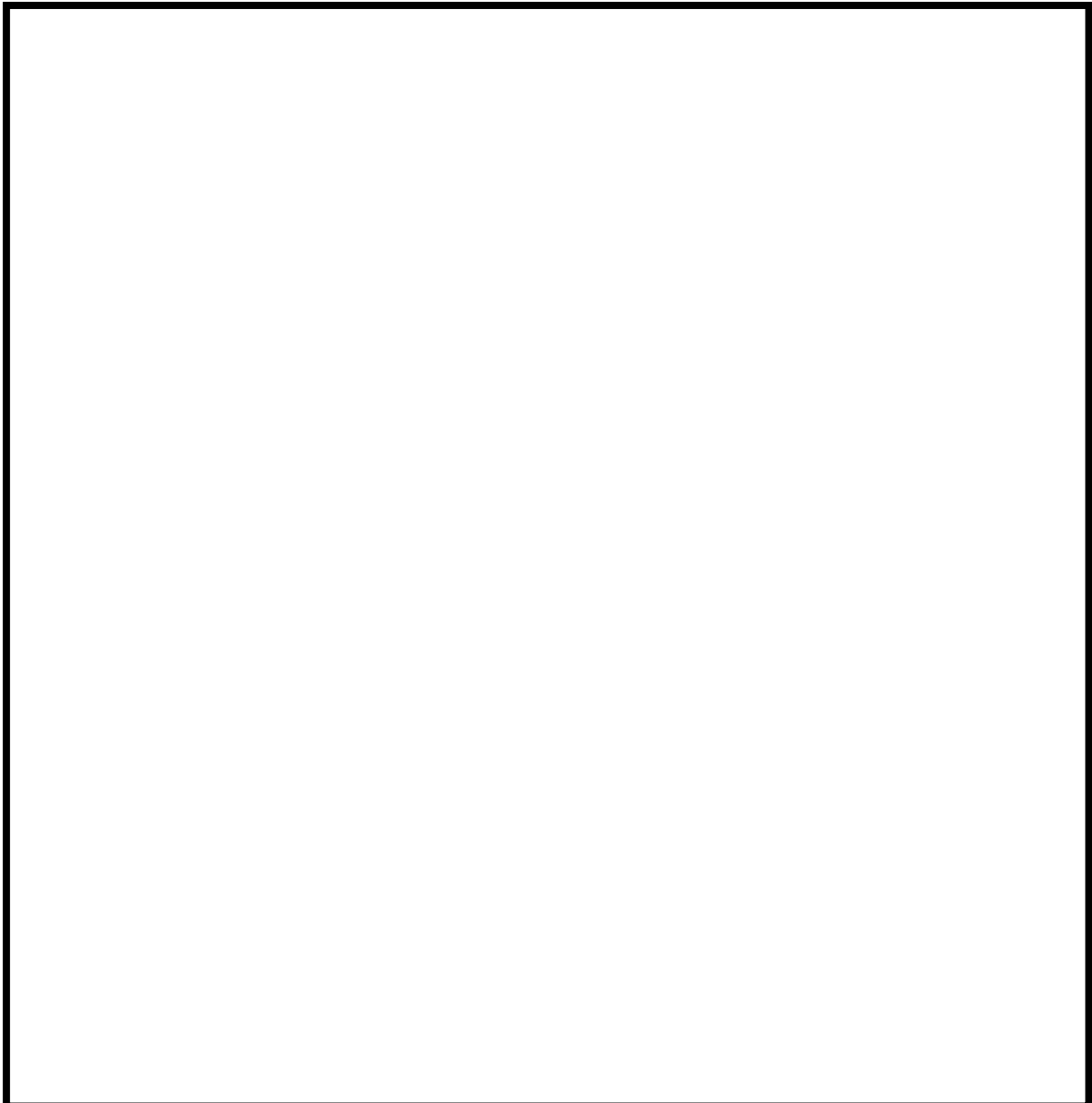
注) 図の位置は、おおよその場所を表している

第 2-1 図 新潟県内の石油コンビナート等特別防災区域の位置と発電所までの距離

3. 石油コンビナート等以外の火災・爆発影響評価

柏崎刈羽原子力発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設（危険物貯蔵施設，高圧ガス貯蔵施設，ガスパイプライン）を抽出し，発電所から最も近い施設および発電所から 10km 圏内の施設における最大数量をそれぞれ抽出した。なお，危険物貯蔵施設については柏崎市消防本部ならびに長岡市消防本部，高圧ガス貯蔵施設については新潟県防災局，ガスパイプラインについては天然ガス鉱業会に確認した。

発電所から 10km 圏内の危険物施設を第 3-1 図及び第 3-1～3 表に示す。



第 3-1 図 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設

商業秘密に該当するため公開できません

第 3-1 表 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設【危険物貯蔵施設】(1/3)

--

第 3-1 表 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設【危険物貯蔵施設】(2/3)

--

第 3-1 表 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設【危険物貯蔵施設】(3/3)

--

第 3-2 表 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設【高圧ガス貯蔵施設】(1/2)

--

第 3-2 表 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設【高圧ガス貯蔵施設】(2/2)

--

第 3-3 表 発電所から 10km 圏内に位置する危険物施設【ガスパイプライン】

--



### 3.1 危険物貯蔵施設

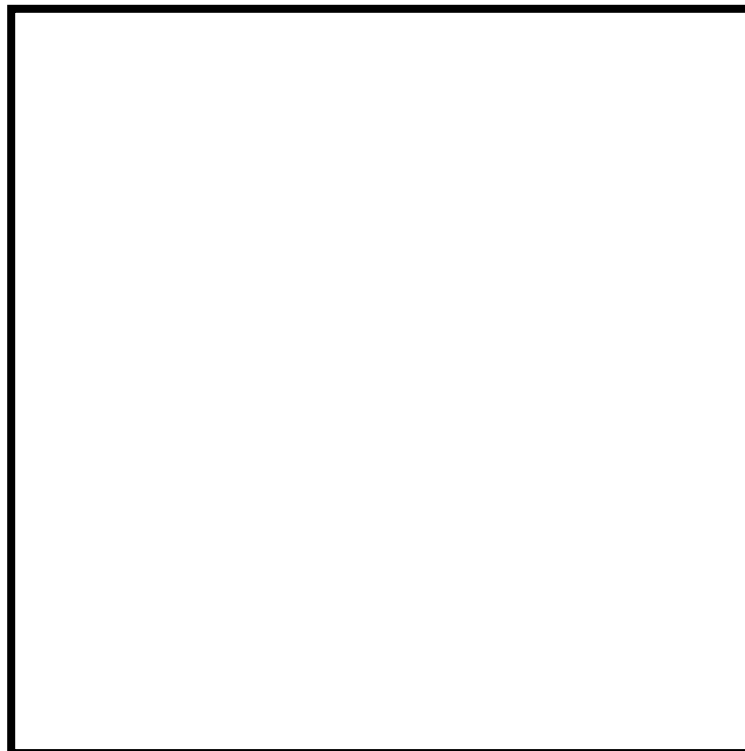
発電所から 10km 圏内 (敷地内を除く) における危険物貯蔵施設の最大貯蔵量は、 であり、発電所から最短の危険物貯蔵施設までの距離は約 2.3km であった (第 3.1-1 図)。

仮に最短距離の危険物貯蔵施設に最大貯蔵量  が有ったと仮定し、熱影響評価を実施したところ、危険距離は約 56m であり、発電所との距離約 2.3km よりも小さいことを確認した。

よって、発電所敷地外の危険物貯蔵施設において火災が発生した場合においても発電所への影響はない。

第 3.1-1 表 10km 圏内における最大の危険物貯蔵施設の貯蔵量

種類	貯蔵量[kl]
原油	
メチルアルコール	
合計	



第 3.1-1 図 最大貯蔵量の危険物貯蔵施設と最短距離の危険物貯蔵施設

#### (1) 評価条件

以下に示す通り、輻射発散度は原油の方が大きいことから、原油の輻射発散度を用いる。また、燃焼継続時間は原油とメタノールが同じ防油堤の中に設置され

ていることから、原油とメタノールの燃焼継続時間を加算した値を用いて評価を実施する。

第 3.1-2 表 原油とメタノールの評価条件

燃料の種類	原油	メタノール
燃料量[k1]		
防油堤面積[m <sup>2</sup> ]		
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	41	9.8
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s] <sup>2)</sup>	0.022~0.045	0.017
燃料密度[kg/m <sup>3</sup> ] <sup>2)</sup>	830~880	796
燃焼速度[m/s] <sup>3)</sup>	2.5~5.4×10 <sup>-5</sup>	2.135×10 <sup>-5</sup>

- 1) 評価ガイド付属書 B より
- 2) NUREG-1805 より
- 3) 燃焼速度 = 質量低下速度 ÷ 燃料密度

(2) 燃焼半径の算出

燃焼面積は、防油堤面積に等しいものとする。従って、燃焼半径 R[m]の防油堤面積を円筒の底面と仮定し算出した。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

S : 防油堤面積 (火炎円筒の底面積) =

R =

(3) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>], m : 質量[kg]

ここで、V<sub>原油</sub> = , v<sub>原油</sub> = 2.5 × 10<sup>-5</sup> [m/s], V<sub>メタノール</sub> = ,

v<sub>メタノール</sub> = 2.136 × 10<sup>-5</sup> [m/s] として、燃焼継続時間を求めると、

$$t = \frac{V_{原油} + V_{メタノール}}{\pi R^2 \times v_{原油} + \pi R^2 \times v_{メタノール}} = 35741 [s] = 9.92 [h]$$

(4) 危険輻射強度の算出

a. 外壁面の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式

の解の式より, コンクリートの表面温度が 200°C となる危険輻射強度を求める。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典：田中 哮義, 改訂版建築火災安全工学入門, 日本建築センター

$T_0$ : 初期温度 [50°C],  $E$ : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$ : コンクリート表面の放射率 (0.95)

※,  $h$ : コンクリート表面熱伝達率 [34.9W/m<sup>2</sup>K]※,  $k$ : コンクリート熱伝導率

[1.6W/mK] ※,  $\rho$ : コンクリート密度 [2200kg/m<sup>3</sup>] ※,  $c$ : コンクリート比熱

[879J/kgK] ※,  $t$ : 燃焼継続時間 [s]

※: 建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

$$E=6762[\text{W/m}^2]$$

#### b. 軽油タンクの危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間, 一定の輻射強度で軽油タンクが昇温されるものとして, 下記の式より軽油の温度が 225°C となる危険輻射強度を求める。

$$T = \frac{\varepsilon E S_1 + h S_2 T_{air}}{h S_2} - \left( \frac{\varepsilon E S_1 + h S_2 T_{air}}{h S_2} - T_0 \right) e^{\left( -\frac{h S_2}{C} \right) t}$$

$T_0$ : 初期温度 [38°C],  $E$ : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$ : 軽油タンク表面の放射率 (0.9)

※<sup>1</sup>,  $h$ : 軽油タンク表面熱伝達率 [17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S_1$ : 軽油タンク受熱面積 [m<sup>2</sup>],

$S_2$ : 軽油タンク放熱面積 [m<sup>2</sup>],  $C$ : 軽油タンクおよび軽油の熱容量 [8.72×10<sup>8</sup>J/K],

$t$ : 燃焼継続時間 [s],  $T_{air}$ : 外気温度 [°C]

※1: 伝熱工学資料, ※2: 空気調和・衛生工学便覧

$$E=24460[\text{W/m}^2]$$

#### c. 燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板)) の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間, 一定の輻射強度で燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板 (鋼板) が昇温されるものとして, 下記の式より燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板)) の温度が 100°C となる危険輻射強度を求める。

$$E_{max} = \frac{2}{\varepsilon S} \left( \frac{h S (T - T_{air})}{1 - e^{\left( -\frac{h S}{C} \right) t}} \right)$$

$\varepsilon$ : 防護板 (鋼板) 外面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>,  $S$ : 防護板 (鋼板) 受熱面積 [16.2m<sup>2</sup>],

h : 防護板 (鋼板) 表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※2</sup>, C:防護板 (鋼板) の熱容量[2.41 × 10<sup>6</sup>J/K], t : 燃焼継続時間[s], T : 許容温度[100℃], T<sub>air</sub> : 外気温度 (初期温度) [55℃]

※1 : 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E=1700[W/m^2]$$

d. 排気筒の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間, 一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして, 下記の式より排気筒の温度が 325℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

T<sub>0</sub> : 初期温度[50℃], E : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>], ε : 排気筒表面の放射率 (0.9) <sup>※1</sup>, h : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※2</sup>, S : 排気筒受熱面積[m<sup>2</sup>]

※1 : 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E=10388[W/m^2]$$

(5) 形態係数の算出

火災から任意の位置にある点 (受熱点) の輻射強度は, 輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。危険輻射強度となる形態係数を算出する。

$$E_{max} = R_f \times \phi$$

E<sub>max</sub> : 危険輻射強度, R<sub>f</sub> : 輻射発散度, φ : 形態係数

E<sub>max</sub> = [W/m<sup>2</sup>], R<sub>f</sub> : 輻射発散度=41000[W/m<sup>2</sup>]とすると,

第 3.1-3 表 形態係数の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
危険輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	6762	24460	1700	10388
輻射発散度[W/m <sup>2</sup> ]	41000			
形態係数	0.1649447	0.5965911	0.0414750	0.2533875

(6) 危険距離の算出

火災から任意の位置にある点 (受熱点) の形態係数は以下の式から求まる。次の式から危険距離を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$  : 形態係数, L : 危険距離 [m], H : 火炎高さ [m], R : 燃焼半径 [m]

第 3.1-4 表 危険距離の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
形態係数	0.1649447	0.5965911	0.0414750	0.2533875
燃焼半径 [m]	[ ]			
危険距離 [m]	約 56m	約 20m	約 134m	約 39m

(7) 火災による熱影響の有無の評価

最大貯蔵量の危険物貯蔵施設における危険距離は最大でも約 134m であり、離隔距離が危険距離を上回っていることを確認した。よって、発電所敷地外の危険物貯蔵施設において火災が発生した場合においても発電所への影響はない。

3.2 高圧ガス貯蔵施設

発電所から 10km 圏内 (敷地内を除く) における高圧ガス貯蔵施設の最大貯蔵量は、[ ] であり、発電所から最短の高圧ガス貯蔵施設までの距離は約 5km であった (第 3.2-1 図)。

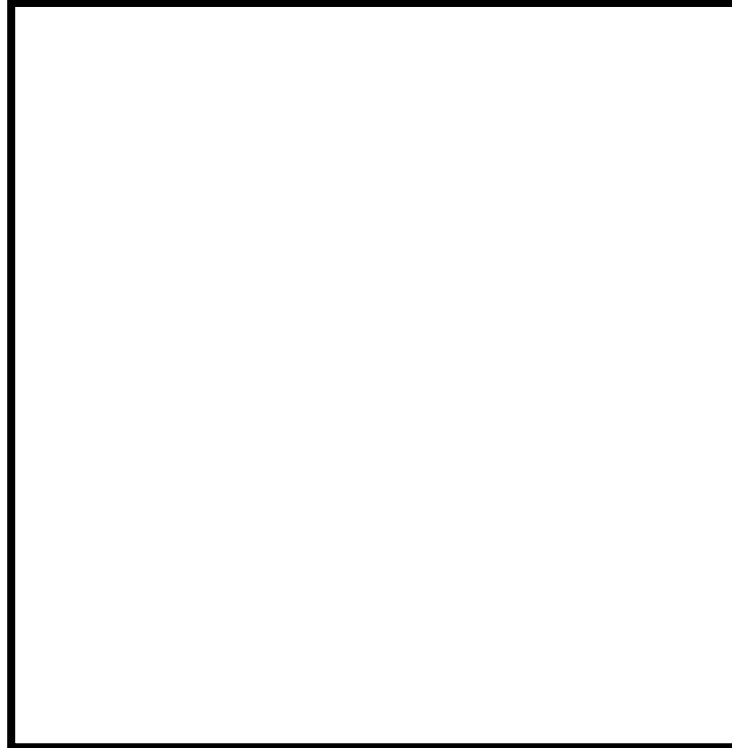
仮に最短距離の高圧ガス貯蔵施設に最大貯蔵量 [ ] が有ったと仮定し、熱影響評価を実施し危険距離は約 30m、爆風圧による影響評価を実施し危険限界距離は [ ] となり、発電所との距離約 5km よりも小さいことを確認した。また、飛来物の影響について評価を実施し、飛来物の最大飛散距離は [ ] となり、発電所との距離約 5km よりも小さいことを確認した。

よって、発電所敷地外の石油類貯蔵施設において火災・爆発が発生した場合においても発電所への影響はない。



第 3.2-1 表 10km 圏内における最大の高圧ガスの貯蔵量

種類	貯蔵量[トン]
液化石油ガス	



第 3.2-1 図 最大貯蔵量の高圧ガス貯蔵施設と最短距離の高圧ガス貯蔵施設

### 3.2.1 熱影響評価

#### (1) 熱影響評価の評価条件

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3.2.1-1 表 プロパンの評価条件

評価条件	
燃料の種類	プロパン
燃料量[トン]	
防油堤面積[m <sup>2</sup> ]	
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	74
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s] <sup>2)</sup>	0.099

1) 評価ガイド付属書 B より

2) NUREG-1805 より

(2) 燃焼半径の算出

燃焼面積は、防油堤面積に等しいものとする。従って、燃焼半径 R[m]の防油堤面積を円筒の底面と仮定し算出した。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

S : 防油堤面積 (火炎円筒の底面積) =

R =

(3) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho} \quad \text{より}, \quad t = \frac{m}{\pi R^2 \times M}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>], m : 質量[kg]

ここで、, M=0.099[kg/m<sup>2</sup>・s]として、燃焼継続時間を求めると、

$$t = \text{} = 2419[s] = 0.671[h]$$

(4) 危険輻射強度の算出

a. 外壁面の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面温度が 200℃となる危険輻射強度を求める。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター

T<sub>0</sub>: 初期温度[50℃], E: 輻射強度[W/m<sup>2</sup>], ε : コンクリート表面の放射率(0.95)

※, h : コンクリート表面熱伝達率[34.9W/m<sup>2</sup>K]※, k : コンクリート熱伝導率[1.6W/mK] ※, ρ : コンクリート密度[2200kg/m<sup>3</sup>] ※, c : コンクリート比熱[879J/kgK] ※, t : 燃焼継続時間[s]

※ : 建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

$$E = 10333[W/m^2]$$

b. 軽油タンクの危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より軽油の温度が 225℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS_2}{C} \right) t}$$

$T_0$  : 初期温度[38℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 軽油タンク表面の放射率 (0.9)  
 ※<sup>1</sup>,  $h$  : 軽油タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S_1$  : 軽油タンク受熱面積[m<sup>2</sup>],  $S_2$  :  
 軽油タンク放熱面積[m<sup>2</sup>],  $C$  : 軽油タンクおよび軽油の熱容量[8.72×10<sup>8</sup>J/K],  $t$  :  
 燃焼継続時間[s],  $T_{air}$  : 外気温度[℃]

※1 : 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 336369 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

c. 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）が昇温されるものとして、下記の式より燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度が100℃となる危険輻射強度を求める。

$$E_{max} = \frac{2}{\varepsilon S} \left( \frac{hS(T - T_{air})}{1 - e^{\left( \frac{-hS}{C} \right) t}} \right)$$

$\varepsilon$  : 防護板（鋼板）外面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>,  $S$  : 防護板（鋼板）受熱面積[16.2m<sup>2</sup>],  
 $h$  : 防護板（鋼板）表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $C$  : 防護板（鋼板）の熱容量[2.41  
 ×10<sup>6</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T$  : 許容温度[100℃],  $T_{air}$  : 外気温度（初期温度）[55℃]

※1 : 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 4001 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

d. 排気筒の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より排気筒の温度が325℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>,  
 $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S$  : 排気筒受熱面積[m<sup>2</sup>]

※1: 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 10385 \text{ [W/m}^2\text{]}$$



(5) 形態係数の算出

火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。危険輻射強度となる形態係数を算出する。

$$E_{max} = R_f \times \phi$$

$E_{max}$ ：危険輻射強度， $R_f$ ：輻射発散度， $\phi$ ：形態係数

$E_{max} = 10385$  [W/m<sup>2</sup>]， $R_f$ ：輻射発散度 = 74000 [W/m<sup>2</sup>] とすると，

第 3.2.1-2 表 形態係数の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
危険輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	10333	336369	4001	10385
輻射発散度 [W/m <sup>2</sup> ]	74000			
形態係数	0.1396392	4.5455275	0.0540748	0.1403903

(6) 危険距離の算出

火炎から任意の位置にある点（受熱点）の形態係数は以下の式から求まる。次の式から危険距離を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし，  $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$ ：形態係数， $L$ ：危険距離， $H$ ：火炎高さ， $R$ ：燃焼半径

$\phi$ ：形態係数， $L$ ：危険距離 [m]， $H$ ：火炎高さ [m]， $R$ ：燃焼半径 [m]

第 3.2.1-3 表 危険距離の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
形態係数	0.1396392	4.5455275	0.0540748	0.1403903
燃焼半径 [m]	[ ]			
危険距離 [m]	約 30m	約 10m	約 54m	約 30m

(7) 火災による熱影響の有無の評価

最大貯蔵量の高圧ガス貯蔵施設における危険距離は最大でも約 54m であり，離隔距離が危険距離を上回っていることを確認した。よって，発電所敷地外の高圧

ガス貯蔵施設において火災が発生した場合においても発電所へ影響はない。

### 3.2.2 爆風圧の影響評価

評価ガイドの付属書Bに基づき爆風圧の評価を行ったところ、評価上必要とされる危険限界距離（爆風圧が0.01MPa以下となる距離）に対し、発電所までの離隔距離が危険限界距離以上あることを確認した。

第3.2.2-1表 高圧ガス爆発の評価条件

評価条件	
貯蔵ガス	液化石油ガス
貯蔵ガスK値	888×1000（プロパン）
貯蔵量	
処理設備のW値	
爆発形態	高圧ガスの漏えい後、引火によりガス爆発が発生

危険限界距離の算出方法

評価ガイドに基づき、危険限界距離を以下の式から算出した。

$$X = 0.04\lambda \cdot \sqrt[3]{K \times W}$$

X：危険限界距離[m]，λ：換算距離14.4[m・kg<sup>-1/3</sup>]，K：石油類の定数，W：設備定数

となり、危険限界距離Xは [ ] となる。

よって、発電所との離隔距離は5kmあることから、爆風圧による発電所への影響はない。

### 3.2.3 飛来物の影響評価

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」（平成25年3月消防庁特殊災害室）\*に基づき、飛来物の最大飛散距離の評価を行ったところ、評価上必要とされる距離に対し、発電所までの離隔距離が評価上必要となる距離以上あることを確認した。

※：石油コンビナート等特別防災区域を有する都道府県が防災計画を作成するにあたって、災害の想定をできるだけ客観的かつ現実的に行うための評価手法を示した指針

第 3.2.3-1 表 飛来物の評価条件

評価条件	
貯蔵ガス	液化石油ガス
貯蔵量	
爆発形態	高压ガスの漏えい後，引火によりガス爆発が発生し，飛来物が発生

飛来物の最大飛散距離の算出方法

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に基づき，容器の破損による破片の飛散範囲を以下の式にて算出した。

$$L = 465M^{0.10}$$

L：破片の最大飛散範囲[m]，M：破裂時の貯蔵物質質量[kg]

□

となり，飛来物の最大飛散距離 L は □ となる。

よって，発電所との離隔距離は 5km あることから，飛来物による発電所への影響はない。

以下に石油コンビナートの防災アセスメント指針の抜粋を示す。

#### (6) 飛散物

容器の破裂による破片の飛散範囲は，破裂エネルギーのほか，破片の数、重量や形状、射出角度や初速度により異なってくる。文献 11) には飛散物に関するいくつかの推定式が示されているが，防災アセスメントのような事前評価において，これらの飛散条件を考慮して評価を行うことは事実上困難といえる。ただし，LPG 容器の BLEVE に伴う破片の飛散範囲に関しては，次のような簡易式が示されている 11)。

$$\begin{aligned} L &= 90 M^{0.333} \text{ (容積 } 5\text{m}^3 \text{ 未満の容器)} \\ &= 465 M^{0.10} \text{ (容積 } 5\text{m}^3 \text{ 以上の容器)} \end{aligned} \quad \text{(式 31)}$$

ただし、

L：破片の最大飛散範囲(m)

M：破裂時の貯蔵物質質量(kg)

この式を東日本大震災の LPG 爆発火災 (M=300,000kg) に適用すると次のようになる。

$$L = 465 \times 300000^{0.10} = 1640\text{m}$$

この事故では，タンク破片が最大約 1,300m、板金が最大約 6,200m まで飛散している。板金は厚さ 0.5mm の薄板であり，揚力によって遠方まで達したものと考えられる。一方，タンク本体の破片や付属重量物が飛散した場合には，落下・衝突による被害が懸念されるが，この事故によるタンク破片の飛散距離最大約 1,300m と照らし合わせると，式 31 により大まかな推定は可能と考えられる。なお，プラントの異常反応に伴う容器破裂に関しては式 31 は適用できないため，過去の事故事例などをもとに推定することになる。

燃料輸送車両の火災・爆発について

## 1. はじめに

本評価は、発電所敷地外で発生する燃料輸送車両の火災やガス爆発に対してより一層の安全性向上の観点から、その火災やガス爆発が発電所に隣接する地域で起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。

## 2. 燃料輸送車両の火災影響評価

### (1) 燃料輸送車両の火災の想定条件

- ・ 発電所敷地外 10km 以内の施設において液化石油ガス輸送車両が許可申請されていることから、最大規模の液化石油ガス輸送車両が発電所敷地周辺道路で火災・爆発を起こした場合を想定した。
- ・ 燃料積載量は液化石油ガス輸送車両の中で最大クラスのもの（16 トン<sup>※</sup>）とした。
- ・ 燃料輸送車両は燃料を満載した状態を想定した。
- ・ 輸送燃料は液化石油ガス（プロパン）とした。
- ・ 発電所敷地境界の道路での燃料輸送車両の全面火災を想定した。
- ・ 気象条件は無風状態とした。
- ・ 火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の 3 倍とした。

※：LP ガスタンクローリー製造会社、LP ガスプラント協会への聞き取りおよび JX 日鉱日石エネルギー 石油便覧より。なお、家庭業務用では容器（主として 10～50kg 容器）で、中・大規模工場ではバルク容器（1～1,000 kg 型）やタンクローリー（主として 8～11 トン積み）のものが使われている。

### (2) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する燃料輸送車両の火災影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第 2-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	火災の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	燃料輸送車両の投影面積より求めた燃焼半径
危険距離[m]	火災による輻射熱により許容限界温度になる距離

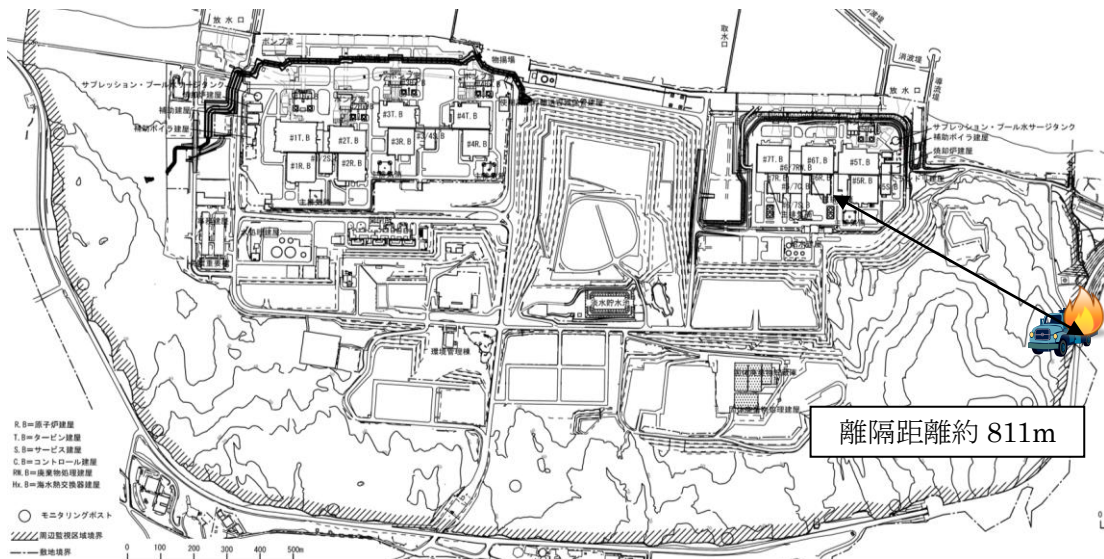
上記の評価指標は、受熱面が輻射体の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。油の液面火災では、火炎面積の半径が 3m を超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うため

に、火災規模による輻射発散度の低減が無いものとする。

輻射熱に対する設備の危険輻射強度を調査し、輻射強度がその設備の危険輻射強度以下になるように発電用原子炉施設は危険距離（離隔距離）を確保するものとする。

### (3) 評価対象範囲

評価対象範囲は、発電所敷地境界の道路で出火する最大規模の燃料輸送車両とする（第2-1図）。なお、発電所構内には、1k1未満の軽油を貯蔵したタンクローリーが存在するが、6、7号炉に設置している軽油タンクが565k1であり、発電用原子炉施設からの距離がタンクローリー配置位置より軽油タンクの方が近いことから軽油タンクの火災影響評価に包絡される。



第2-1図 燃料輸送車両の離隔距離

### (4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第2-2表 プロパンの評価条件

燃料の種類	プロパン
燃料量[ton]	16
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	74
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s] <sup>2)</sup>	0.099
燃料輸送車両投影面積[m <sup>2</sup> ] <sup>3)</sup>	16.5×2.5

1) 評価ガイド付属書Bより

2) NUREG-1805より

3) 車両長16.5[m]：車両制限令 第三条

(5) 燃焼半径の算出

燃料輸送車両の火災においては様々な燃焼範囲の形態が想定されるが、円筒火炎を生ずるものとする。ここでの燃焼面積は、燃料輸送車両の投影面積に等しいものとする。従って、燃焼半径 R[m]は燃料輸送車両の投影面積を円筒の底面と仮定し算出した。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

S : 燃料輸送車両の投影面積 (火炎円筒の底面積) = 41.25 [m<sup>2</sup>]

$$R = (41.25 / \pi)^{0.5} = 3.62 \text{ [m]}$$

(6) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho} \quad \text{より}, \quad t = \frac{m}{\pi R^2 \times M}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>], m : 質量[kg]

ここで、m=16000[kg], M=0.099[kg/m<sup>2</sup>・s]として、燃焼継続時間を求めると、

$$t = 16000 / (41.25 \times 0.099) = 3918 \text{ [s]} = 1.08 \text{ [h]}$$

(7) 危険輻射強度の算出

a. 外壁面の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇が 200℃となる危険輻射強度を求める。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター

T<sub>s</sub> : 外表面温度 [200℃], T<sub>0</sub> : 初期温度 [50℃], E : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>], ε : コン

クリート表面の放射率 (0.95) ※, h : コンクリート表面熱伝達率 [34.9W/m<sup>2</sup>K]

※, k : コンクリート熱伝導率 [1.6W/mK] ※, ρ : コンクリート密度 [2200kg/m<sup>3</sup>]

※, c : コンクリート比熱 [879J/kgK] ※, t : 燃焼継続時間 [s]

※ : 建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

$$E = 9295 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

b. 軽油タンクの危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より軽油の温度が 225℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS_2}{C} \right) t}$$

$T_0$  : 初期温度[38℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 軽油タンク表面の放射率 (0.9)  
※<sup>1</sup>,  $h$  : 軽油タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S$  : 軽油タンク受熱面積[m<sup>2</sup>],  
 $C$  : 軽油タンクおよび軽油の熱容量[8.72×10<sup>8</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T_{air}$  :  
外気温度[℃]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 208372 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

c. 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）が昇温されるものとして、下記の式より燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度が 100℃となる危険輻射強度を求める。

$$E_{max} = \frac{2}{\varepsilon S} \left( \frac{hS(T - T_{air})}{1 - e^{\left( \frac{-hS}{C} \right) t}} \right)$$

$\varepsilon$  : 防護板（鋼板）外面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>,  $S$  : 防護板（鋼板）受熱面積[16.2m<sup>2</sup>],  
 $h$  : 防護板（鋼板）表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $C$  : 防護板（鋼板）の熱容量[2.41  
×10<sup>6</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T$  : 許容温度[100℃],  $T_{air}$  : 外気温度（初期  
温度）[55℃]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 2873 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

d. 排気筒の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より排気筒の温度が 325℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>,  
 $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S$  : 排気筒受熱面積[m<sup>2</sup>]



※1：伝熱工学資料， ※2：空気調和・衛生工学便覧

$$E=10380 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

(8) 形態係数の算出

火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は，輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。危険輻射強度となる形態係数を算出する。

$$E_{\max}=R_f \times \phi$$

$E_{\max}$ ：危険輻射強度，  $R_f$ ：輻射発散度，  $\phi$ ：形態係数

$R_f$ ：輻射発散度 $=74 \times 10^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$ とすると，

第2-3表 形態係数の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
危険輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	9295	208372	2873	10380
輻射発散度 [W/m <sup>2</sup> ]	74000			
形態係数	0.1256088	2.8158438	0.0388239	0.1403903

(9) 危険距離の算出

次の式から危険距離を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right] \right\}$$

ただし，  $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$ ：形態係数，  $L$ ：危険距離 [m]，  $H$ ：火炎高さ [m]，  $R$ ：燃焼半径 [m]

第2-4表 危険距離の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
形態係数	0.1256088	2.8158438	0.0388239	0.1403903
燃焼半径 [m]	3.62			
危険距離 [m]	約 13m	約 4m	約 26m	約 12m

(10) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から，燃料輸送車両において火災が発生した場合を想定したとしても，離隔距離(約 811m)が危険距離(最大約 26m)以上であることから，発電用

原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないとは評価できる。

### 3. 燃料輸送車両の爆発影響評価

#### (1) 燃料輸送車両の火災の想定条件

- ・ 発電所敷地外 10km 以内の施設において液化石油ガス輸送車両が許可申請されていることから、最大規模の液化石油ガス輸送車両が発電所敷地周辺道路で火災・爆発を起こした場合を想定した。
- ・ 燃料積載量は液化石油ガス輸送車両の中で最大クラスのもの（16 トン）とした。
- ・ 燃料輸送車両は燃料を満載した状態を想定した。
- ・ 輸送燃料は液化石油ガス（プロパン）とした。
- ・ 発電所敷地境界の道路での高圧ガス漏えい，引火による燃料輸送車両の爆発を想定した。
- ・ 気象条件は無風状態とした。

#### (2) 評価手法の概要

本評価は，発電所に対する燃料輸送車両のガス爆発による影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第 3-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
危険限界距離[m]	ガス爆発の爆風圧が 10kPa 以下になる距離

#### (3) 評価対象範囲

評価対象範囲は，発電所敷地境界の道路で出火する燃料輸送車両とする。

#### (4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3-2 表 高圧ガス爆発の評価条件

データ種類	内容
石油の K 値	コンビナート等保安規則第 5 条別表第二に掲げる数値 K=888000（プロパンの最大値）
貯蔵設備又は処理設備の W 値	コンビナート等保安規則第 5 条貯蔵設備又は処理設備の区分に応じて次に掲げる数値 貯蔵設備：液化ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力（単位 トン）の数値の平方根の数値（貯蔵能力が一トン未満のものにあつては、

	貯蔵能力（単位 トン）の数値），圧縮ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力（単位 立方メートル）を当該ガスの常用の温度及び圧力におけるガスの質量（単位 トン）に換算して得られた数値の平方根の数値（換算して得られた数値が一未満のものにあつては，当該換算して得られた数値） 処理設備：処理設備内にあるガスの質量（単位 トン）の数値 $W=16^{1/2}=4$
離隔距離[m]	発電所敷地境界の道路から発電用原子炉施設までの距離 約 811[m]

(5) W値の算出

最大規模の燃料輸送車両の積載量を貯蔵能力とし，W値を算出した。

積載量（貯蔵能力）=16[トン]

$$W=16^{1/2}=4$$

(6) 危険限界距離の算出

次の式から危険限界距離を算出する。ここで算出した危険限界距離が燃料輸送車両と発電用原子炉施設の間に必要な離隔距離となる。

$$X = 0.04\lambda \cdot \sqrt[3]{K \times W}$$

X：危険限界距離[m]， $\lambda$ ：換算距離 14.4[m・kg<sup>-1/3</sup>]，K：石油類の定数，W：設備定数

K=888000，W=4 として，危険限界距離を求める。

$$X = \text{約 } 88[\text{m}]$$

(7) 爆発による影響評価結果

以上の結果から，燃料輸送車両において爆発が発生した場合を想定したとしても，離隔距離（約 811m）が危険限界距離（約 88m）以上であることから，発電用原子炉施設に爆風圧による影響はないと評価する。

4. 燃料輸送車両の飛来物の影響評価

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」（平成 25 年 3 月 消防庁特殊災害室）\*に基づき，飛来物の最大飛散距離の評価を行ったところ，最大飛散距離に対し発電所までの離隔距離が評価上必要となる距離以下であった。

このため，飛来物を想定した上での詳細な評価を実施したところ，飛来物は発電用原子炉施設に衝突することはない。

※：石油コンビナート等特別防災区域を有する都道府県が防災計画を作成するにあたって，災害の想定をできるだけ客観的かつ現実的に行うための評価手法

を示した指針

第 4-1 表 飛来物の評価条件

評価条件	
貯蔵ガス	液化石油ガス
貯蔵量	16 トン
爆発形態	高压ガスの漏えい後，引火によりガス爆発が発生し，飛来物が発生

(1) 飛来物の最大飛散距離の算出方法

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に基づき，容器の破損による破片の飛散範囲を以下の式にて算出した。

$$L = 465M^{0.10}$$

L：破片の最大飛散範囲[m]，M：破裂時の貯蔵物質量[kg]

$$L = 465 \times (16,000)^{0.10} = 1,224.23$$

となり，飛来物の最大飛散距離 L は約 1,225m となる。

(2) 飛来物の最大飛散距離の詳細な評価

上記「石油コンビナート防災アセスメント指針」に基づく飛散範囲の推定式によると，飛来物が発電用原子炉施設に到達するおそれがあることから，燃料輸送車両（第 4-1 図参照）から発生すると考えられる飛来物を想定した上での評価を行った。飛来物の想定にあたり，BLEVE 現象<sup>\*1</sup>を引き起こす可能性がある液化石油ガス輸送車両のうち積載量が国内最大クラスものの構造図をもとに，飛来物化することが想定される爆風の影響を直接受ける可能性がある部位を選定したところ，タンク本体・はしご・バンパー部が抽出された。台車部などタンク下部に位置する部品は，爆発力の方向をふまえると，発電用原子炉施設に到達せず，また横転した場合を考えても，下部の部品の飛散方向は発電所周辺道路の地形の高まりや森林の樹木に干渉し発電用原子炉施設に到達しないことから影響はない。トラクターについては，鋼板で構成されており，その大きさからタンク本体の評価に包絡される。

抽出した飛来物に対して，第 4-2 表のとおり液化石油ガス輸送車両の構造図，車両制限令に定められる限界値，「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に例示の飛来物から，包絡的な飛来物を設定した。

はしごおよび，バンパーの長さはともに 2.5m 程度である。棒状の物体は長さが大きくなると飛距離が大きくなる傾向にあることから，保守的な評価として鋼製パイプ及び鋼製材については車両制限令に定められる車両長さの最大限度の 16.5m での評価を実施する。

また，タンク板の破片としては鏡板部分の破損を想定し 2.5m×2.5m 程度が最大と考えられるが，平板は幅，長さが大きくなるほど，飛距離が大きくなる傾向に

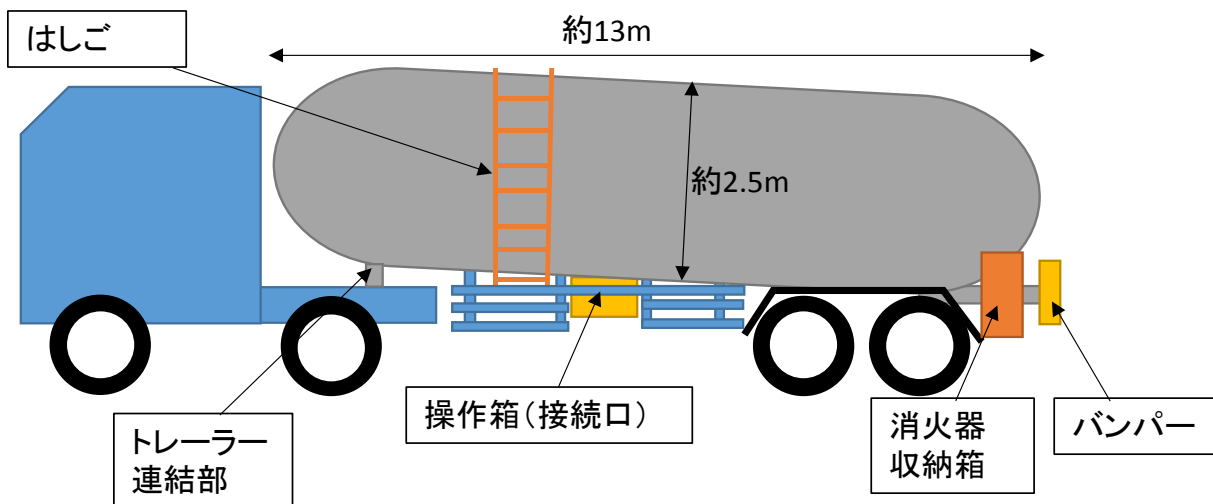
あることから、保守的な評価としてタンクの半分が破片となる想定をする。幅は車両制限令に定められる車両の幅の最大限度の 2.5m、長さを車両制限令に定められる車両長さの最大限度の 16.5m の平板について評価を実施する。厚さについては、構造図から 0.01m とする。

竜巻飛来物の飛行解析モデル (Simiu and Cordes, 1976) (東京工芸大, 2011) (江口ら, 2014 および 2015) と同じモデルを使用し、空中では物体はランダムに回転すると仮定し、外力としては重力および平均抗力 (各方向に平均化した抗力係数と投影面積の積に比例して定義されるもの) を受けるものとする。

「BLEVE 時の破片最大速度は 150-200m/s」 (Handbook of Hazardous Materials Spills Technology の 22.4.4 節) であることから、初期条件として地上にあるタンクローリー破片の初期速度を 200m/s とする。また、放出角は感度解析の結果もともと遠くまで到達する 30° とする。

想定飛来物の諸元および、飛散距離の計算結果を第 4-2 表に示す。離隔距離 811m は、最大飛散距離である鋼製パイプの 549.6m を上回ることから、飛来物が発電用原子炉施設に到達することはない。

※ 1 : BLEVE 現象 (沸騰液膨張蒸気爆発) : 液化ガスを貯蔵するタンク火災などで、タンクが破損した場合に急激に液化ガスが気化することに伴う爆発現象。



第 4-1 図 燃料輸送車両概要図

第 4-2 表 想定飛来物の諸元・飛散距離

飛来物の種類	鋼製パイプ (はしご)	鋼製材 (バンパー)	鋼板 (タンク本体)
サイズ (m)	長さ×直径 16.5 <sup>*1</sup> ×0.05 <sup>*2</sup>	長さ×幅×奥行 16.5 <sup>*1</sup> ×0.3 <sup>*3</sup> ×0.2 <sup>*3</sup>	長さ×幅×厚さ 16.5 <sup>*1</sup> ×2.5 <sup>*1</sup> ×0.01 <sup>*4</sup>
質量 (kg)	69.3 <sup>*2</sup>	530.4 <sup>*3</sup>	3238.1
飛散距離 (m)	549.6	504.1	403.1
離隔距離(m)	811		

※ 1 : 車両制限令に定められる車両の幅 2.5m, 長さ 16.5m (高速自動車国道を通行するセミトレーラ連結車) の最大限度。

※ 2 : 鋼製パイプの直径および質量については、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考に設定した。直径 0.05m は、構造図上のはしごの直径約 0.04m を包絡する。

※ 3 : 鋼製材の幅, 奥行および質量は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考に設定した。構造図上のバンパー部の幅約 0.03m, 奥行約 0.02m と同程度である。

※ 4 : 積載 16t 液化石油ガスタンクローリーの構造図よりタンク板厚 10mm

(参考文献)

- 1) Simiu, E. and Cordes, M., NBSIR 76-1050 Tornado-Borne Missile Speeds (1976).
- 2) 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究 成果報告書 (2011).
- 3) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002 (2014).
- 4) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, [DOI: 10.1299/transjsme.14-00478] (2015).
- 5) J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, and J. A. Vázquez, Modeling and Understanding BLEVEs, in Handbook of Hazardous Materials Spills Technology (ed.:M. Fingas), chapter 22 (2002)

### (3) 飛来物影響評価結果

燃料輸送車両からの飛来物を想定した上での評価を実施したところ、離隔距離(約 811m)が最大飛散距離(約 550m)を上回る結果となった。したがって、発電所周辺道路で燃料輸送車両が事故等により爆発し、なおかつその飛来物が発電用原子炉施設に衝突することはなく、影響はない。

## 燃料物性値について

燃料輸送車両の火災影響評価では、爆発による影響が大きいことを考慮し、最大クラスの液化石油ガス輸送車両が火災、爆発を起こした場合を想定している。液化石油ガスはガソリンに対して、輻射発散度が大きく輻射強度も大きくなるため保守的であるが、質量低下速度が速く燃焼時間が短い。このため、燃料積載量が多いガソリンを搭載したタンクローリーと比較し、想定の妥当性について評価した。

評価に必要なデータを以下に示す。

第 1 表 プロパンとガソリンの評価条件

燃料の種類	プロパン	ガソリン
燃料量[ton]	16	23.4 (30[ton])
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	74	58
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s] <sup>2)</sup>	0.099	0.055
燃料輸送車両投影面積[m <sup>2</sup> ]	41.25 <sup>3)</sup>	41.25 <sup>3)</sup>

1) 評価ガイド付属書 B より

2) NUREG-1805 より

3) 車両長 16.5[m] : 車両制限令 第三条

車両幅 2.5[m] : 道路運送車両の保安基準 第二条

火災による熱影響（危険距離）は 2. (5) から (9) と同様に算出した。

第 2 表 危険距離の算出結果

	プロパン	ガソリン
危険距離[m] <sup>※</sup>	約 32m	約 28m

※：最大値（燃料移送ポンプの場合）を記載

以上の結果から、プロパンとガソリンの燃料物性値の相違による評価結果への影響はない。なお、離隔距離（約 811m）が危険距離以上であることから、発電用原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないと評価できる。

### その他の安全施設に対する影響評価

免震重要棟は発電所敷地周辺道路からの離隔距離が最も短く約 380m であるが、燃料輸送車両火災時の危険距離(約 13m)以上、爆発発生時の危険限界距離(約 88m)以上であることから、その他の安全施設に影響を及ぼすことはないと評価できる。



## 燃料輸送車両の飛来物による影響評価について

## 1. はじめに

柏崎刈羽原子力発電所では、燃料輸送車両の爆発時の飛来物の影響について、離隔距離が十分であることから影響はないとしている。一方、「石油コンビナート防災アセスメント指針」に基づく評価によると、離隔距離(811m)が、最大飛散距離(1,225m)以下であることから、参考として、頻度および影響度の観点からリスクについて評価する。

## 2. 燃料輸送車両の飛来物による影響がないことについて

## (1) 発電所周辺道路の交通状況

柏崎刈羽原子力発電所周辺道路としては国道 352 号線があるが、発電所付近は工業地域を走行する道路ではなく、より高規格で直線的な線形の道路である国道 116 号線に加え、国道 8 号線や高速自動車国道が並走しているため、新潟市（新潟東港地区・新潟西港地区）－（刈羽村・柏崎市）－上越市（直江津地区）などのコンビナート間の通過交通に積極的に使用される道路ではない。また、発電所周辺 10km 以内において液化石油ガスの許可申請を実施している 15 事業所に聞き取りを実施したところ、回答を得られた 12 事業所のうち、定常的に敷地付近の主要な道路である国道 352 号線の発電所付近を通過するタンクローリーを取扱い、受け入れするのは 1 事業所のみであり、繁忙期においても週 1 回程度の低頻度である。

## (2) 爆発時の発電用原子炉施設への影響

燃料輸送車両は、高圧ガス保安法等の規制のもと製造・維持・管理されており、信頼性が確保されているが、万が一燃料輸送車両の爆発により飛来物が発生したとしても、周辺道路からの離隔距離は 811m 以上であり、BLEVE 現象<sup>\*1</sup>により容器が破損した場合の最大飛散範囲 1,225m に及ばないものの一定の離隔距離が確保されており影響は緩和される。発電用原子炉施設に衝突するものは多くても数個程度、また重量も小さいものであると考えられ、建屋が一定の頑健性を持っていることを踏まえると、同時に複数の設備に影響を与えることは考え難い。したがって、広範な影響を及ぼす可能性のある地震、津波を初めとする自然現象・人為事象に比べ、影響が小さいと言える。

また、次項に述べるような確率論的な考察によっても、リスクが小さいと言える。

以上のように、柏崎刈羽原子力発電所周辺においては燃料輸送車両の交通が少ないことに加え、最大飛距離には及ばないものの一定の離隔があること、また事

象が生じた際の影響が小さく一部設備にとどまることから、燃料輸送車両の爆発に伴う飛来物による発電用原子炉施設への影響はないと判断できる。

※1 : BLEVE 現象 (沸騰液膨張蒸気爆発) : 液化ガスを貯蔵するタンク火災などで、タンクが破損した場合に急激に液化ガスが気化することに伴う爆発現象。

### 3. 燃料輸送車両の飛来物による影響の確率論的考察について

前項で述べたとおり、燃料輸送車両が爆発した際の影響は小さく無視できると考えられるが、本項では、過去の事故発生頻度を用いて燃料輸送車両の爆発飛来物が発電用原子炉施設へ損傷を与える可能性がある確率を算出しても極めて小さい値となることを確認する。

#### (1) 評価条件

- ・ 評価対象は原子炉建屋・コントロール建屋・廃棄物処理建屋・熱交換器エリア・軽油タンクとする。
- ・ 敷地付近の主要道路である国道 352 号線を通行する燃料輸送車両の火災を想定する。
- ・ 積載物としては、BLEVE 現象を引き起こす、液化石油ガスを想定する。
- ・ 燃料積載量は、液化石油ガス輸送車両の中で最大クラスの 16t を想定する。

#### (2) 評価方法

評価に使用する各パラメータについて第 1 表に示す。

##### a. 新潟県内での燃料輸送車両の爆発事故発生頻度

発電用原子炉施設に影響を及ぼすような爆発を想定する車両として、BLEVE 現象を引き起こす恐れがある、可燃性の高圧ガスを積載した車を考える。新潟県内では平成 16 年から平成 26 年までの 10 年間で 3 件の、可燃性の高圧ガスを積載したタンクローリーに関する事故が発生している。これらは、いずれも漏えいなどに留まり爆発事故には至っていないが、保守的な値として新潟県内において燃料輸送車両の爆発事故が発生する頻度を次のように求める。

$$3 / 10 = 0.3[\text{件/年}]$$

##### b. 周辺道路での燃料輸送車両の爆発事故発生頻度

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に基づく、容器の破損による破片の飛散範囲 L は以下のとおり約 1.3km である。

$$L = 465 \times (16,000)^{0.10} = 1,224.23 [\text{m}]$$

したがって、爆発事故が発生した際に、飛来物が発電用原子炉施設に影響を与える道路延長は第 1 図の通り、約 2.3km である。

周辺道路での燃料輸送車両の爆発事故発生頻度は、県内の燃料輸送車両の事

故が、すべて新潟県内の高速自動車国道（実延長 379.5km）あるいは一般国道（実延長 1781.9km）で発生したと仮定し算出する。高速自動車国道および一般国道の実延長は  $379.5 + 1781.9 = 2161.4$  km から 2000km, 周辺道路の長さは約 2.3km から 3km とそれぞれ保守的に設定した。

周辺道路での燃料輸送車両の爆発事故発生頻度は次のようになる。

$$0.3 \times 3 / 2000 = 4.5 \times 10^{-4} \text{ [件/年]}$$

c. 飛来物の発電用原子炉施設衝突確率

燃料輸送車両の爆発時に飛来物が発電用原子炉施設に到達する確率は、燃料輸送車両を中心とする半径が最大飛距離 1,225m の円内に飛来物が等しい確率で落下すると仮定し算出する。評価対象施設の合計面積は、 $11843.5\text{m}^2$  であるから飛来物の発電用原子炉施設衝突確率は  $11843.5 / (\pi \times 1225^2) = 2.51 \times 10^{-3}$  となる。

(3) 評価結果

以上を踏まえると、燃料輸送車両による爆発により原子炉設備に影響を与える確率は、

$$4.5 \times 10^{-4} \times 2.5 \times 10^{-3} = 1.1 \times 10^{-6} \text{ 程度と算出される。}$$

(4) 結論

燃料輸送車両が爆発しその飛来物が、発電用原子炉施設に落下する確率は  $1.1 \times 10^{-6}$  と極めて小さく、稀にしかおこらない。また建屋による防護にも期待できることから影響は無視できる。



第1表 各種入力条件

	パラメータ	備考
燃料輸送車両爆発頻度	0.3 [/年]	平成16年～平成26年の10年間に新潟県内での高圧ガス積載車両の爆発事故発生回数3回より設定 出典：平成26年度高圧ガス事故事例データベース（経済産業省・高圧ガス保安協会）
到達距離	1225 [m]	「石油コンビナートの防災アセスメント指針」掲載の式より設定
原子炉建屋へ影響を与えうる範囲の道路延長	3 [km]	飛来物が発電用原子炉施設に到達する可能性がある道路延長約2.3kmより保守的に設定（図1）
新潟県内 国道総延長	2000 [km]	一般国道：1781.9km 高速自動車国道：379.5km （道路統計年報2014） 合計2161.4kmより保守的に設定
標的面積	11843.5 [m <sup>2</sup> ]	原子炉建屋・コントロール建屋・廃棄物処理建屋・熱交換器エリア・軽油タンクの合計面積

漂流船舶の火災・爆発について

## 1. はじめに

本評価は、発電所敷地外で発生する漂流船舶の火災やガス爆発に対してより一層の安全性向上の観点から、その火災やガス爆発が発電所に隣接する地域で起こったとしても外部事象防護対象施設を内包する発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。

## 2. 漂流船舶の火災・爆発の影響評価について

本評価は漂流船舶の火災に対する防護の有効性を確認することが目的であるため、敷地周辺において現実的に想定される船舶に比べ、火災影響が厳しくなる保守的な船舶の規模として、入港可能な最大の船舶が敷地へ到達することを仮定した評価を実施する。

### (1) 想定条件

- ・漂流船舶は新潟県内で輸送実績が多く、柏崎刈羽原子力発電所前面の海域に航路がある液化石油ガス輸送船舶を想定した。
- ・漂流船舶は港湾内に入港可能な大きさで実際に存在する最大の船舶（積載量 1021 トン）を想定した。
- ・漂流船舶は燃料を満載した状態を想定した。
- ・港湾内での漂流船舶の全面火災を想定した。
- ・気象条件は無風状態とした。
- ・火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の 3 倍とした。

### (2) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する漂流船舶の火災影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第 2-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	火災の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	船舶の投影面積より求めた燃焼半径
危険距離[m]	火災による輻射熱により許容限界温度になる距離

上記の評価指標は、受熱面が輻射体の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。油の液面火災では、火炎面積の半径が 3m を超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うために、火災規模による輻射発散度の低減が無いものとする。輻射熱に対する設備の危険輻射強度を調査し、輻射強度がその設備の危険輻射強度

以下になるように発電用原子炉施設は危険距離（離隔距離）を確保するものとする。

### (3) 評価対象範囲

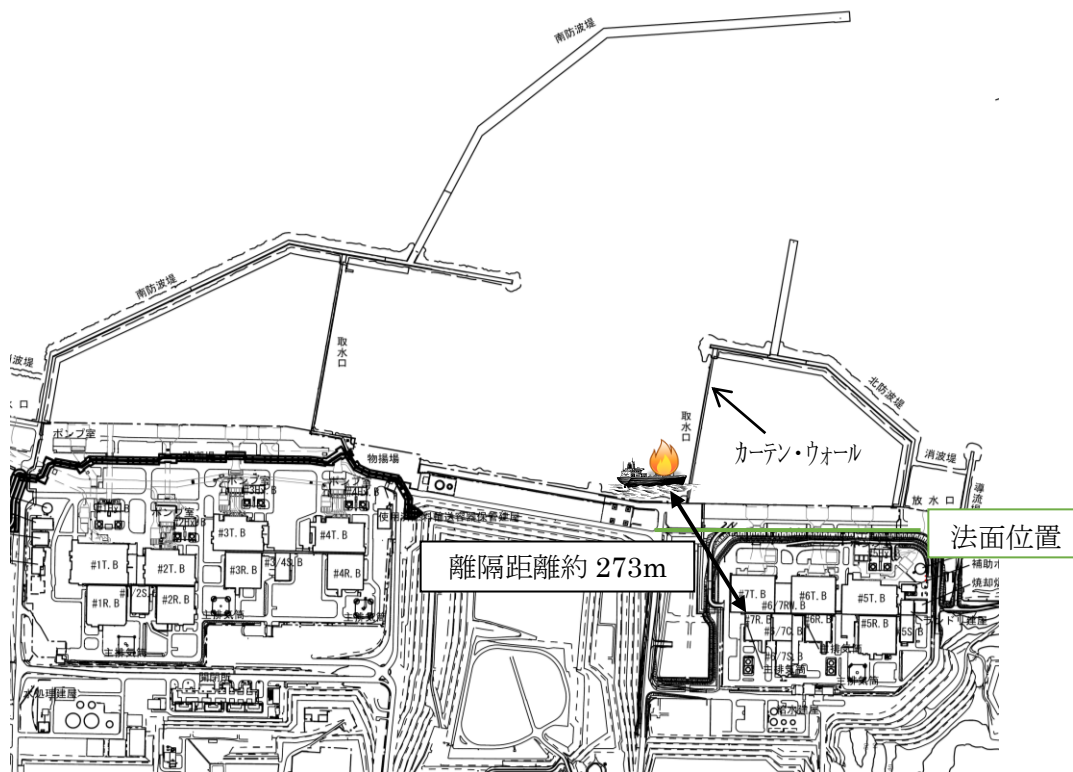
評価対象範囲は、発電所港湾内で出火する漂流船舶とする。なお、以前は船舶にて構内の重油タンクへの重油の補給を行っていたが、現在は重油タンクの運用を廃止しており、発電所構内に入港する危険物輸送船舶は存在しないことから、発電所前面の海域で航行中の船舶が漂流し、港湾内に進入し、出火した場合を想定する。

仮に、津波による船舶の漂流を想定したとしても、カーテン・ウォールの高さ (T.M.S.L+3.2m)、基準津波による最大水位の高さ (T.M.S.L+6.2m)、想定している船舶の喫水 (5.7m) の関係\*から、船舶がカーテン・ウォールを乗り越えて発電用原子炉施設に接近することはない (第 2-1 図)。

※：水面はカーテン・ウォールより 3.0m 高い位置となるが、船舶の水面から船底の最深部までの垂直深さが 5.7m であり、水面が更に上昇しなければ乗り越えることはない。なお、カーテン・ウォールが地震・津波により損傷した場合、敷地内の海側で低いエリア (T.M.S.L+3.0m) および設計基準津波の検討における大湊側遡上域の最大水位 (7.3m) より上陸可能な船舶の喫水は 4.3m 以下である。

取水口エリア近傍の法面高さが約 12m (T.M.S.L+12.0m) となっており、これ以上、発電用原子炉施設に接近することはない。よって、この位置における発電用原子炉施設との離隔距離 (約 178m) が積載量最大の船舶にて評価した危険距離 (最大約 146m) 以上であることに加え、喫水 4.3m 程度の船舶の積載量 (900ton 程度) が最大積載量 (1021ton) 未満であることから、想定している船舶の評価に包絡される。





第 2-1 図 漂流船舶の離隔距離

(4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 2-2 表 プロパンの評価条件

燃料の種類	プロパン
燃料量[ton] <sup>3)</sup>	1021
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	74
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s] <sup>2)</sup>	0.099
漂流船舶投影面積[m <sup>2</sup> ] <sup>3)</sup>	約 68×13 [m <sup>2</sup> ]

1) 評価ガイド付属書 B より

2) NUREG-1805 より

3) 内航船舶明細の LPG 船舶の中で容積が最大の船舶の値

(5) 燃焼半径の算出

漂流船舶の火災においては様々な燃焼範囲の形態が想定されるが、円筒火炎を生ずるものとする。ここでの燃焼面積は、漂流船舶の投影面積に等しいものとする。従って、燃焼半径 R[m] は漂流船舶の投影面積を円筒の底面と仮定し算出した。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

S : 漂流船舶の投影面積 (火炎円筒の底面積) = 881 [m<sup>2</sup>]

$$R = (881 / \pi)^{0.5} = 16.74 \text{ [m]}$$

(6) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho} \quad \text{より}, \quad t = \frac{V \times \rho}{\pi R^2 \times M}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>], m : 質量[kg]

ここで, m=1,021,000[kg], M=0.099[kg/m<sup>2</sup>・s]として, 燃焼継続時間を求めると,

$$t = 1,021,000 / (881 \times 0.099) = 11,706 \text{ [s]} = 3.25 \text{ [h]}$$

(7) 危険輻射強度の算出

a. 外壁面の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間, 一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして, 下記の次元非定常熱伝導方程式の解の式より, コンクリートの表面の温度上昇が 200℃となる危険輻射強度を求める。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典 : 田中 哮義, 改訂版建築火災安全工学入門, 日本建築センター

T<sub>s</sub> : 外表面温度[200℃], T<sub>0</sub> : 初期温度[50℃], E : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>], ε : コンクリート表面の放射率 (0.95) ※, h : コンクリート表面熱伝達率[34.9W/m<sup>2</sup>K]※, k : コンクリート熱伝導率[1.6W/mK] ※, ρ : コンクリート密度[2200kg/m<sup>3</sup>] ※, c : コンクリート比熱[879J/kgK] ※, t : 燃焼継続時間[s]

※ : 建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

$$E = 7701 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

b. 軽油タンクの危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間, 一定の輻射強度で軽油タンクが昇温されるものとして, 下記の式より軽油の温度が 225℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS_2}{C} \right) t}$$

$T_0$  : 初期温度[38℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 軽油タンク表面の放射率 (0.9)  
 ※<sup>1</sup>,  $h$  : 軽油タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※2</sup>,  $S_1$  : 軽油タンク受熱面積[m<sup>2</sup>],  
 $S_2$  : 軽油タンク放熱面積[m<sup>2</sup>],  $C$  : 軽油タンクおよび軽油の熱容量[8.72 × 10<sup>8</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T_{air}$  : 外気温度[℃]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 70930 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

c. 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）が昇温されるものとして、下記の式より燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度が 100℃となる危険輻射強度を求める。

$$E_{max} = \frac{2}{\varepsilon S} \left( \frac{hS(T - T_{air})}{1 - e^{\left( \frac{-hS}{C} \right) t}} \right)$$

$\varepsilon$  : 防護板（鋼板）外面の放射率 (0.9)<sup>※1</sup>,  $S$  : 防護板（鋼板）受熱面積[16.2m<sup>2</sup>],  
 $h$  : 防護板（鋼板）表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※2</sup>,  $C$  : 防護板（鋼板）の熱容量[2.41 × 10<sup>6</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T$  : 許容温度[100℃],  $T_{air}$  : 外気温度（初期温度）[55℃]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 1825 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

d. 排気筒の危険輻射強度

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より排気筒の温度が 325℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率 (0.9)<sup>※1</sup>,  
 $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※2</sup>,  $S$  : 排気筒受熱面積[m<sup>2</sup>]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E=10388 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

(8) 形態係数の算出

火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。危険輻射強度となる形態係数を算出する。

$$E_{\max}=R_f \times \phi$$

$E_{\max}$ ：危険輻射強度， $R_f$ ：輻射発散度， $\phi$ ：形態係数

第 2-3 表 形態係数の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
危険輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	7700	70930	1825	10388
輻射発散度 [W/m <sup>2</sup> ]	74000			
形態係数	0.1040675	0.9585140	0.0246699	0.1403903

(9) 危険距離の算出

次の式から危険距離を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right] \right\}$$

ただし，  $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$ ：形態係数， $L$ ：危険距離 [m]， $H$ ：火炎高さ [m]， $R$ ：燃焼半径 [m]

第 2-4 表 危険距離の算出結果

	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
形態係数	0.1040675	0.9585140	0.0246699	0.1403903
燃焼半径 [m]	16.7			
危険距離 [m]	約 66m	約 17m	約 148m	約 53m

(10) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から、漂流船舶において火災が発生した場合を想定したとしても、離隔距離 (約 273m) が危険距離 (最大約 148m) 以上であることから、外部事象防護対象施設を内包する発電用原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないと評価できる。なお、発電所港湾内に入港する船舶火災の影響評価については、発電所港湾内に

入港する危険物輸送船舶が無いことを踏まえると、入港船舶の燃料積載量は運航に必要な程度であり、その熱影響は漂流船舶における火災影響評価において想定した液化石油ガス輸送船舶のものより小さく、漂流船舶の火災影響評価に包絡される。

### 3. 漂流船舶の爆発の想定

#### (1) 想定条件

- ・漂流船舶は新潟県内で輸送実績が多く、柏崎刈羽原子力発電所前面の海域に航路がある液化石油ガス輸送船舶を想定した。
- ・漂流船舶は港湾内に入港可能な大きさで実際に存在する最大の船舶（積載量 1021 トン）を想定した。
- ・漂流船舶は燃料を満載した状態を想定した。
- ・港湾内での高圧ガス漏えい、引火による漂流船舶の爆発を想定した。
- ・気象条件は無風状態とした。

#### (2) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する漂流船舶のガス爆発による影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第 3-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
危険限界距離[m]	ガス爆発の爆風圧が 10kPa 以下になる距離

#### (3) 評価対象範囲

評価対象範囲は、発電所港湾内で出火する漂流船舶とする。なお、以前は船舶にて構内の重油タンクへの重油の補給を行っていたが、現在は重油タンクの運用を廃止しており、発電所構内に入港する危険物輸送船舶は存在しないことから、発電所前面の海域で航行中の船舶が漂流し、港湾内に進入し、出火した場合を想定する。

#### (4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3-2 表 高圧ガス爆発の評価条件

データ種類	内容
石油の K 値	コンビナート等保安規則第 5 条別表第二に掲げる数値 K=888000（プロパンの最大値）

貯蔵設備又は処理設備の W 値	<p>コンビナート等保安規則第 5 条貯蔵設備又は処理設備の区分に応じて次に掲げる数値</p> <p>貯蔵設備：液化ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力（単位 トン）の数値の平方根の数値（貯蔵能力が一トン未満のものにあつては、貯蔵能力（単位 トン）の数値）、圧縮ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力（単位 立方メートル）を当該ガスの常用の温度及び圧力におけるガスの質量（単位 トン）に換算して得られた数値の平方根の数値（換算して得られた数値が一未満のものにあつては、当該換算して得られた数値）</p> <p>処理設備：処理設備内にあるガスの質量（単位 トン）の数値</p> $W = 1021^{1/2} = 31.95$
離隔距離[m]	<p>発電所港湾岸壁から発電用原子炉施設までの距離</p> <p>約 273[m]</p>

(5) W値の算出

港湾内に入港しうる最大船舶の積載量を貯蔵能力とし、W値を算出した。

積載量（貯蔵能力）=1021[トン]

$$W = 1021^{1/2} = 31.95$$

(6) 危険限界距離の算出

次の式から危険限界距離を算出する。ここで算出した危険限界距離が漂流船舶と発電用原子炉施設の間に必要な離隔距離となる。

$$X = 0.04\lambda \cdot \sqrt[3]{K \times W}$$

X：危険限界距離[m]， λ：換算距離 14.4[m・kg<sup>-1/3</sup>]， K：石油類の定数， W：設備定数

K=888000， W=31.95 として、危険限界距離を求める。

$$aX = \text{約 } 176[\text{m}]$$

(7) 爆発による影響評価結果

以上の結果から、漂流船舶において爆発が発生した場合を想定したとしても、離隔距離（約 273m）が危険限界距離（約 176m）以上であることから、発電用原子炉施設に影響をおよぼすことはない。

4. 漂流船舶の飛来物の影響評価

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」（平成 25 年 3 月 消防庁特殊災害室）\*に基づき、飛来物の最大飛散距離の評価を行ったところ、最大飛散距離に対し発電所までの離隔距離が評価上必要となる距離以下であった。

※：石油コンビナート等特別防災区域を有する都道府県が防災計画を作成するにあたって、災害の想定をできるだけ客観的かつ現実的に行うための評価手法を示した指針

第 4-1 表 飛来物の評価条件

評価条件	
貯蔵ガス	液化石油ガス
貯蔵量	1021 トン
爆発形態	高压ガスの漏えい後，引火によりガス爆発が発生し，飛来物が発生

(1) 飛来物の最大飛散距離の算出方法

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に基づき，容器の破損による破片の飛散範囲を以下の式にて算出した。

$$L = 465M^{0.10}$$

L：破片の最大飛散範囲[m]，M：破裂時の貯蔵物質量[kg]

$$L = 465 \times (1,021,000)^{0.10} = 1,855.04$$

となり，飛来物の最大飛散距離 L は約 1,855m となる。

(2) 飛来物影響評価結果

飛来物による影響については，離隔距離（約 273m）が最大飛散距離（約 1,855m）以下であるが，発電所遠方で漂流した船舶が飛散距離である 1,855m 以内に流れ着いた後に爆発し，なおかつその飛来物が発電用原子炉施設に衝突する可能性は非常に低いことから，想定した漂流船舶の飛来物の発電所への影響はない。

また，柏崎刈羽原子力発電所付近には石油コンビナートが無く，発電所付近の航路を調査した結果，最も距離の近い航路でも 30km の離隔距離があることを確認した（第 4-1 図）。よって，漂流した船舶が発電所周辺まで流れてくる可能性は低く，それに加えて飛来物が発電用原子炉施設に衝突する可能性は非常に低い。

なお，(1) で用いた「石油コンビナートの防災アセスメント指針」の計算式は，大規模な爆発を伴う LPG 容器の BLEVE 現象を取り扱うものであるが，発電所港湾内に入港する LPG 輸送船舶等の危険物輸送船舶はなく，発電所港湾内に入港する船舶火災に伴う著しい飛来物の発生は想定されない。



第 4-1 図 発電所周辺の主要航路



## 漂流船舶の選定について

船舶には外航船（国外航路を航行する船舶）および内航船（国内航路を航行する船舶）がある。これらの船舶が漂流してきた場合を想定しても外航船の喫水（水面から船底の最深部までの垂直深さ）は11m程度であり，発電所港湾内まで進入することができない。よって，発電所港湾内まで進入可能な内航船が，漂流し港湾内に進入し火災・爆発した場合を想定した。

発電所港湾内に進入可能な内航船にも様々な種類の燃料を積載する船舶が存在するが，火災・爆発を想定することから液化ガス輸送船舶を対象とし，その中でも船舶数が多く<sup>1)</sup>，発電所前面の海域に航路が存在する<sup>2)</sup>液化石油ガス輸送船舶を対象とした。液化石油ガスは，家庭業務用，一般工業用，発電用等があるが，最も使用量の多い家庭業務用のプロパンガス<sup>3,4,5)</sup>とした。発電所港湾内に進入可能な内航船の積載燃料別隻数割合を第1図に示す。

船舶の規模は，100トン以上の内航船をすべて収録した内航船舶明細書に記載の液化石油ガス船舶の中で，最大の容積のものとし，評価に使用する入力値を以下に示す。

容積  $V$  : 2010.28[m<sup>3</sup>]<sup>6)</sup>

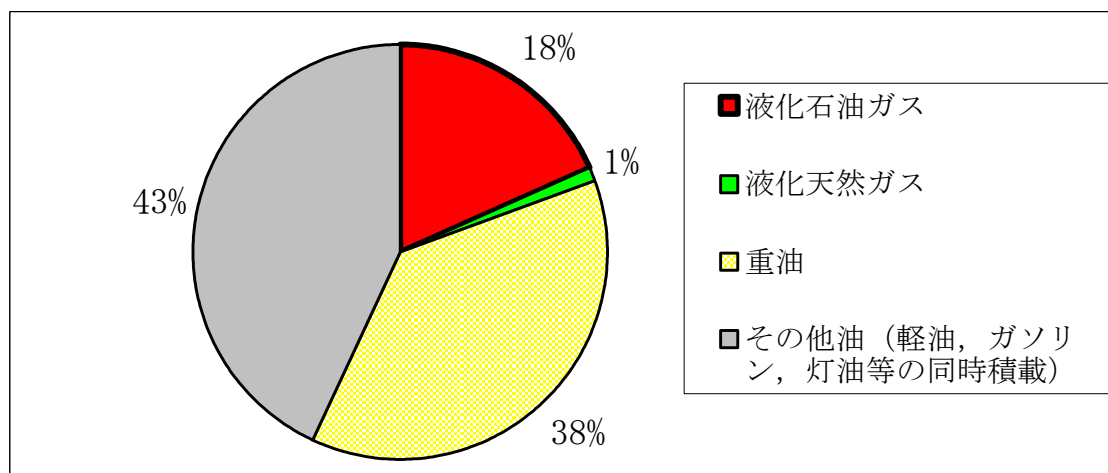
全長  $L$  : 67.77[m]<sup>6)</sup>

全幅  $H$  : 13[m]<sup>6)</sup>

密度  $\rho$  : 0.5076[トン/m<sup>3</sup>]<sup>7)</sup>

投影面積  $S=L \times H$  : 881[m<sup>2</sup>]

積載量  $M = \rho \times V$  : 1021[トン]



第1図 発電所に進入可能な内航船の積載燃料別隻数割合

- 1)平成 13 年度 危険物の海上輸送時の事故対応策の研究報告書（その 1）, H14. 3,  
社団法人 日本海難防止協会
- 2)平成 23 年度 新潟港統計年報, H24. 12, 新潟県新潟地域振興局新潟港湾事務局
- 3)日本 L P ガス協会 統計資料 LP ガス需給の推移
- 4)液化石油ガスの保安の確保及び取引の適正化に関する法律施行規則第十二条
- 5)経済産業省 LP ガスの規格  
[http://www.lpgpro.go.jp/guest/learning/basic/01\\_03.html](http://www.lpgpro.go.jp/guest/learning/basic/01_03.html)
- 6)内航船舶明細書の LPG 船舶の中で容積が最大の船舶の値
- 7)日本 LP ガス協会 物性一覧

## 漂流船舶（火災）の二次的影響について

発電所港湾内で漂流船舶が出火し重油が流出したとしても、港湾内の取水口にはカーテンウォールが設置されており、深層取水していることから発電用原子炉施設（海水系ポンプ）への影響はない。

また、発電所から主要航路までの距離は約 30km である。過去に発生したタンカーからの大規模油流出事故より推定すると、24 時間程度<sup>※1</sup>で油がサイトに到達する可能性があるが、海上保安庁より漂流船舶に関する連絡を受けた場合、オイルフェンスの設置に要する時間は 11 時間程度<sup>※2</sup>であることから、油の到達時間内にオイルフェンスを設置することができる。

よって、港湾内への油の流入を妨げることが可能であると評価する。

※1：平成 9 年 1 月 2 日、島根県隠岐島の北北東約 110km の海上において、ロシア国籍タンカー「ナホトカ号」の重油流出事故が発生。流出量としては当時過去 2 番目となる重油約 6240kl（推定）が流出。流出した重油は、2 日間で 60 数 km 程度広がった。

※2：作業員の参集に 3 時間程度、オイルフェンスは作業開始から 7～8 時間程度で設置が可能。設置手順としては、オイルフェンス等の資機材を保管エリアから港湾まで移動（その間に作業船が柏崎港より移動）、オイルフェンスを接続後、作業船によりオイルフェンスを展開する。なお、オイルフェンスを設置するための資機材はコンテナに収納し、防火帯内側の資材倉庫エリアにて保管している。

敷地内における危険物タンクの火災について

## 1. はじめに

本評価は、発電所敷地内の危険物タンクの火災に対してより一層の安全性向上の観点から、その火災が起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。

## 2. 構内危険物タンクの火災影響評価

### (1) 構内危険物タンクの火災の想定

- ・ 構内危険物タンクは発電用原子炉施設周辺に設置されており、発電用原子炉施設までの距離が近く貯蔵量の多い各号炉の軽油タンクとした。なお、各号炉の軽油タンクは2基隣接して設置しているが、耐震Sクラス設備であり地震随件事象としても2基同時火災の想定はしづらいこと、隣接軽油タンク火災時にもう一方の軽油タンクの温度は発火点まで上昇しないため2基同時出火することはないことから、発電用原子炉施設に近い軽油タンク1基の火災を想定した。
- ・ 構内危険物タンクは危険物を満載した状態を想定した。
- ・ 構内危険物タンクの損傷等による防油堤内での全面火災を想定した。
- ・ 泡消火設備の消火機能には期待しない。
- ・ 気象条件は無風状態とした。
- ・ 火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の3倍とした。

### (2) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する構内危険物タンクの火災影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第2-1表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	火災の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	防油堤規模より求めた燃焼半径
燃焼継続時間[s]	火災が終了するまでの時間
離隔距離[m]	危険物タンクから発電用原子炉施設までの直線距離
熱許容限界値[-]	建屋の外壁，天井スラブが想定火災の熱影響に対して許容限界以下になる値

上記の評価指標は、受熱面が輻射体の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。油の液面火災では、火炎面積の半径が3mを超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うため

に、火災規模による輻射発散度の低減が無いものとする。

輻射熱に対する設備の温度上昇を評価し、温度上昇がその設備の熱許容限界値以下になるように発電用原子炉施設は離隔距離を確保するものとする。

### (3) 評価対象範囲

評価ガイドに基づき、発電所敷地内に存在する石油類やヒドラジンなどの危険物タンク火災の影響評価を実施する。消防法または柏崎市火災予防条例に基づく届出対象施設（第2-2(a)(b)表）より、評価対象とする危険物タンク等を抽出した（第2-1図のフロー図）。発電所敷地内の発火源となる施設のうち、建屋内に設置している設備および地下貯蔵タンクは外部への火災が発生する可能性が低いことから除外し、危険物を貯蔵し屋外に設置しているタンク等を想定発火源とした。発電所敷地内における危険物施設等の位置を第2-2図に示す。

#### 【抜粋】外部火災影響評価ガイド

#### 4. 1 考慮すべき発電所敷地外の火災

##### (2) 近隣の産業施設の火災・爆発

近隣の産業施設で発生した火災・爆発により、原子炉施設が、その影響を受けないよう適切な防護措置が施されており、その二次的な影響も含めて、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計とする。なお、発電所敷地外の10km以内を発火点とし、森林等に延焼することによって発電所に迫る場合は(1)の森林火災として評価する。(ただし、発電所敷地内に存在する石油類やヒドラジンなどの危険物タンク火災については、(3)の航空機墜落と同様に原子炉施設への熱影響評価等を行う。)

発電所構内には、危険物施設の他にタンクローリー(1kL×2台、4kL×4台、16kL×1台)を配備している。1kLタンクローリーのうち1台には指定数量以下の軽油を貯蔵し、訓練後の電源車や消防車等への燃料補給に使用するが、それ以外のタンクローリーは通常時「空」の状態で開催している。通常時「空」の状態であるタンクローリーは発火の可能性はないことから評価対象から除外する。同様に、発電所構内には重油タンクがあるが、現在は当該タンクの重油を抜き危険物貯蔵所として廃止届出をしており、重油タンク内の重油は「空」であることから、評価対象から除外する。

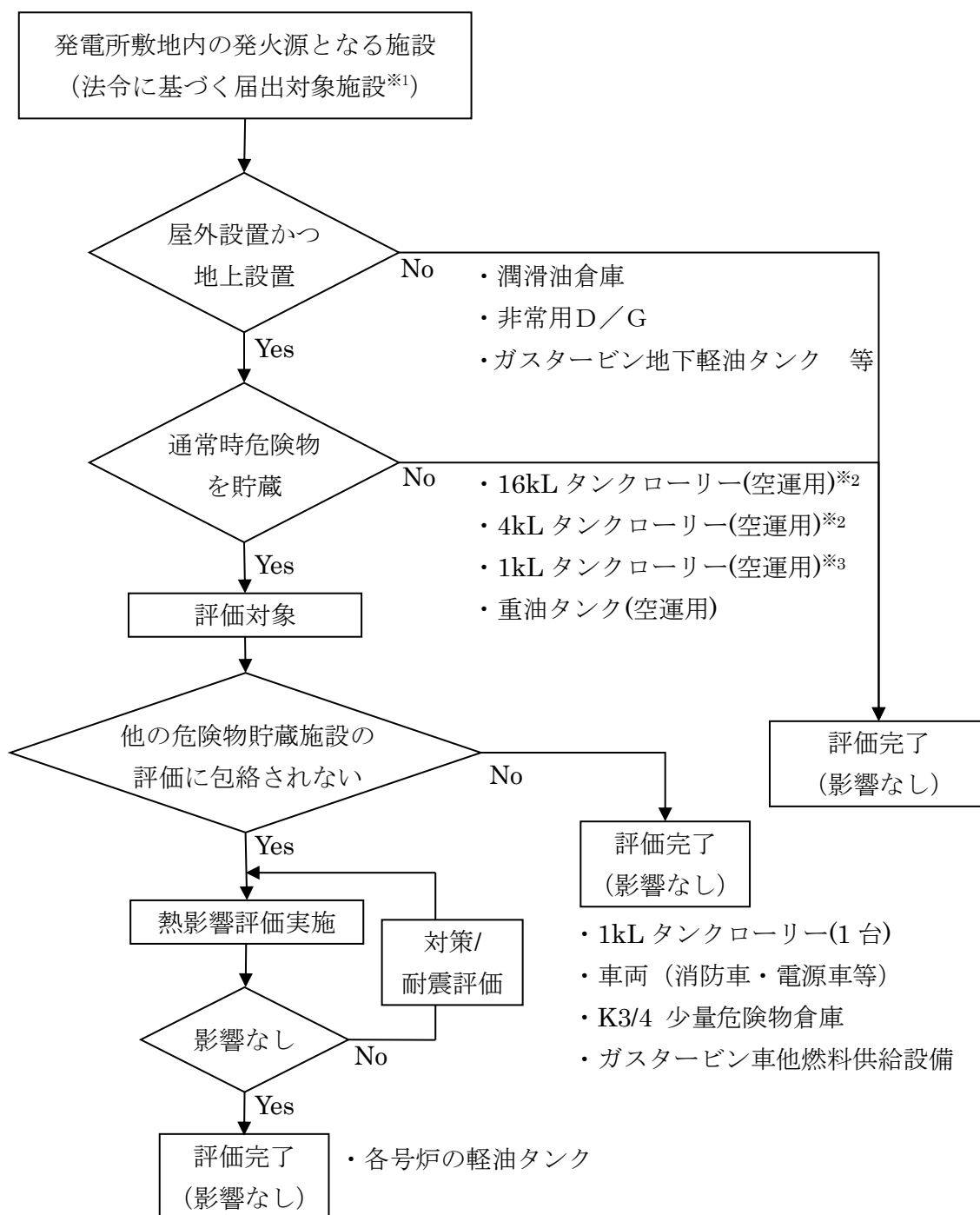
以上より、評価対象は、各号炉の軽油タンク、危険物を貯蔵する車両(タンクローリー)、指定数量以下の危険物を貯蔵する倉庫(K3/4少量危険物倉庫)およびガスタービン車他燃料供給設備(一般取扱所)となる。

ここで、指定数量以下の危険物を貯蔵する車両等(タンクローリー)は、貯蔵量が少なく周辺監視区域外に設置・保管されており、評価対象とした軽油タンク火災の評価に包絡されるため熱影響評価は実施しない。

同様に、指定数量以下の危険物を貯蔵する倉庫(K3/4少量危険物倉庫)は、評

価対象とした軽油タンクと発電用原子炉施設の距離に比べ離れた位置に配置しており、貯蔵量が少ないため熱影響評価は実施しない。

ガスタービン車他燃料供給設備（一般取扱所）は各号炉の軽油タンクより離れた位置に配置しており貯蔵量も少なく、軽油タンク火災評価に包絡されることから熱影響評価は実施しない。また、他号炉の軽油タンク（6号炉評価時の7号炉軽油タンク）は、自号炉の軽油タンクより距離が離れており自号炉の軽油タンク火災評価に包絡されることから熱影響評価は実施しない。



※1：消防法または柏崎市火災予防条例に基づく届出対象施設となる危険物タンク等

※2：危険物の規制に関する政令第7条第1項に基づく「危険物貯蔵所変更許可申請書」を柏崎市長に提出している。

※3：柏崎市火災予防条例第46条第1項に基づく「少量危険物貯蔵届出書」に加え、タンクローリーの運用方法を定めた文書を柏崎市消防長に提出している。

第2-1 図 敷地内危険物施設のうち評価対象抽出フロー



第2-2(a)表 危険物製造所等許可施設一覧

号炉	施設名	製造所の別	危険物			数量	詳細評価要否
			類	品名			
1号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	344kL	○(※1)
1号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	344kL	○(※1)
1号炉	補助ボイラ	一般取扱所	4	第3石油類	重油	105kL/日	×(屋内設置)
1号炉	D/G(A)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.5kL	×(屋内設置)
1号炉	D/G(B)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.5kL	×(屋内設置)
1号炉	D/G(HPCS)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	14kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.5kL	×(屋内設置)
1号炉	MGセット室	一般取扱所	4	第4石油類	潤滑油	12kL	×(屋内設置)
1号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類	潤滑油	106kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	リン酸エステル	3kL	×(屋内設置)
1号炉	OD貯蔵タンク	屋内タンク貯蔵所	4	第3石油類	廃油	10.763kL	×(屋内設置)
共用	潤滑油倉庫	屋内貯蔵所	4	第4石油類	潤滑油	100kL	×(屋内設置)
共用	焼却炉建屋廃油タンク	屋内タンク貯蔵所	4	第3石油類	潤滑油	7.2kL	×(屋内設置)
2号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類	潤滑油	106kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	リン酸エステル	3.8kL	×(屋内設置)
2号炉	D/G(A)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
2号炉	D/G(B)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
2号炉	MGセット室(A)(B)	一般取扱所	4	第4石油類	潤滑油	12kL	×(屋内設置)
2号炉	D/G(HPCS)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	14kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	3.9kL	×(屋内設置)
2号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	344kL	○(※1)
2号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	344kL	○(※1)
3号炉	D/G(A)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
3号炉	D/G(B)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
3号炉	D/G(HPCS)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	14kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	3.9kL	×(屋内設置)

第2-2(b)表 危険物製造所等許可施設一覧

号炉	施設名	製造所の別	危険物		数量	詳細評価要否
			類	品名		
3号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類 潤滑油	106kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 難燃性作動油	3.8kL	×(屋内設置)
3号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類 軽油	344kL	○(※1)
3号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類 軽油	344kL	○(※1)
4号炉	D/G(A)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
4号炉	D/G(B)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
4号炉	D/G(HPCS)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	14kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	3.9kL	×(屋内設置)
4号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類 潤滑油	106kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 難燃性作動油	4kL	×(屋内設置)
4号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類 軽油	344kL	○(※1)
4号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類 軽油	344kL	○(※1)
5号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類 潤滑油	106kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 リン酸エステル	3kL	×(屋内設置)
5号炉	D/G(A)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
5号炉	D/G(B)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	20kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	6.6kL	×(屋内設置)
5号炉	MGセット室(A)	一般取扱所	4	第4石油類 潤滑油	10.5kL	×(屋内設置)
5号炉	MGセット室(B)	一般取扱所	4	第4石油類 潤滑油	10.5kL	×(屋内設置)
5号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類 軽油	344kL	○(※1)
5号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類 軽油	344kL	○(※1)
5号炉	D/G(HPCS)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	14kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	3.9kL	×(屋内設置)
6号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類 潤滑油	98kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 難燃性作動油	4kL	×(屋内設置)
6号炉	D/G(A)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	18kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	3.9kL	×(屋内設置)
6号炉	D/G(B)	一般取扱所	4	第2石油類 軽油	18kL	×(屋内設置)
			4	第4石油類 潤滑油	3.9kL	×(屋内設置)

第2-2(c)表 危険物製造所等許可施設一覧

号炉	施設名	製造所の別	危険物			数量	詳細評価要否
			類	品名			
6号炉	D/G (C)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	18kL	× (屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	3.9kL	× (屋内設置)
6号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	565kL	○(※1)
6号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	565kL	○(※1)
7号炉	タービン設備	一般取扱所	4	第4石油類	潤滑油	98kL	× (屋内設置)
			4	第4石油類	難燃性作動油	3.8kL	× (屋内設置)
7号炉	D/G (A)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	18kL	× (屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	3.9kL	× (屋内設置)
7号炉	D/G (B)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	18kL	× (屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	3.9kL	× (屋内設置)
7号炉	D/G (C)	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	18kL	× (屋内設置)
			4	第4石油類	潤滑油	3.9kL	× (屋内設置)
7号炉	軽油タンク(A)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	565kL	○(※1)
7号炉	軽油タンク(B)	屋外タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	565kL	○(※1)
免震重要棟	ガスタービン発電設備	地下タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	30kL	× (地下式)
免震重要棟	ガスタービン発電設備	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	9.888kL	× (屋内設置)
			4	第4石油類	タービン油	0.08kL	× (屋内設置)
共用	第一ガスタービン発電機用燃料タンク	地下タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	100kL	× (地下式)
共用	第二ガスタービン発電機用燃料タンク	地下タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	100kL	× (地下式)
共用	ガスタービン車他燃料供給設備	地下タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	144kL	× (地下式)
共用	ガスタービン車他燃料供給設備	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	72kL	×(※2)
共用	ガスタービン車他燃料供給設備	一般取扱所	4	第2石油類	軽油	18kL	×(※2)
共用	No.1 重油タンク	屋外タンク貯蔵所	4	第3石油類	重油	3000kL	×(※3)
共用	No.2 重油タンク	屋外タンク貯蔵所	4	第3石油類	重油	320kL	×(※3)

※1：自号炉の軽油タンク火災による熱影響評価を実施する

※2：軽油タンク火災による熱影響評価に包絡される

※3：廃止届出済みであり、現在は重油を抜きタンク内に重油は存在しない

第2-3表 指定数量以下の危険物

号炉	施設名	製造所の別	危険物			数量	詳細評価要否
			類	品名			
共用	タンクローリー	—	4	第2石油類	軽油	1kL	×(※1)
共用	タンクローリー	—	4	第2石油類	軽油	1kL	×(常時空)
共用	タンクローリー	移動タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	4kL	×(常時空)
共用	タンクローリー	移動タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	4kL	×(常時空)
共用	タンクローリー	移動タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	4kL	×(常時空)
共用	タンクローリー	移動タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	4kL	×(常時空)
共用	タンクローリー	移動タンク貯蔵所	4	第2石油類	軽油	16kL	×(常時空)
共用	K3/4少量危険物倉庫	—	4	第1石油類	—	100L	×(※1)
			4	第2石油類	—	450L	×(※1)
			4	アルコール類	—	15L	×(※1)

※1：軽油タンク火災による熱影響評価に包絡される

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

6条-別添4(外火)-1-添付6-10

第2-2 図 危険物タンク及び危険物保存庫の位置（発電所全体）

(4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 2-3 表 軽油タンク火災影響評価に必要なデータ

データ種類	内容
輻射発散度[W/m <sup>2</sup> ]	燃焼する可燃物によって決まる定数 42×10 <sup>3</sup> [W/m <sup>2</sup> ] (軽油)
防油堤面積[m <sup>2</sup> ]	防油堤の面積 17×17=289[m <sup>2</sup> ]
離隔距離[m]	建屋に近い軽油タンク防油堤の中心から建屋までの距離 46.8[m] A a z s s 隣接軽油タンクまでの距離 12.4[m] 燃料移送ポンプの防護板(断熱)に近い軽油タンク防油堤の中心から防護板(断熱)までの距離 11.6[m] 排気筒に近い軽油タンク防油堤の中心から排気筒までの距離 77.1[m]

(5) 燃焼半径の算出

防油堤には貯槽その他不燃障害物が存在し、火災面積はその面積分だけ小さくなるが、防油堤全面火災のような大規模な火災の場合は、多少の障害物も無視できる。したがって、本評価では、防油堤面積と等しい円筒火炎を生ずるものと想定し、次の式から燃焼半径 R[m]を算出する。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

$$S : \text{防油堤面積 (火炎円筒の底面積)} = 289 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$R = (289 / \pi)^{0.5} = 9.59 \text{ [m]}$$

(6) 形態係数の算出

次の式から形態係数を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right] \right\}$$

$$\text{ただし, } m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$$

$\phi$  : 形態係数, L : 離隔距離, H : 火炎高さ, R : 燃焼半径

第 2-4 表 形態係数の算出結果

評価対象	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (断熱))	排気筒
燃焼半径 [m]	9.59			
離隔距離 [m]	46.8	12.4	11.6	77.1
形態係数 [-]	0.0727229	0.3863990	0.7760717	0.0295969

(7) 輻射強度の算出

火災の火炎から任意の位置にある点 (受熱点) の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E : 輻射強度, R<sub>f</sub> : 輻射発散度, φ : 形態係数

第 2-5 表 輻射強度の算出結果

評価対象	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (断熱))	排気筒
輻射発散度 [W/m <sup>2</sup> ]	42 × 10 <sup>3</sup>			
形態係数 [-]	0.0727229	0.3863990	0.7760717	0.0295969
輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	3.05 × 10 <sup>3</sup>	16.22 × 10 <sup>3</sup>	32.59 × 10 <sup>3</sup>	1.24 × 10 <sup>-3</sup>

(8) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho} \quad \text{より}, \quad t = \frac{V \times \rho}{\pi R^2 \times M}$$

t : 燃焼継続時間 [s], V : 燃料量 [m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径 [m], v : 燃焼速度 [m/s]

M : 質量低下速度 [kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

ここで、V=565 [m<sup>3</sup>], M=0.044 [kg/m<sup>2</sup>・s], ρ=918 [kg/m<sup>3</sup>] とし、燃焼継続時間を求めると、

$$v = 0.044 / 918 = 4.793 \times 10^{-5} \text{ [m/s]}$$

$$t = 565 / (289 \times 4.793 \times 10^{-5}) = 40788 \text{ [s]} = 11.3 \text{ [h]}$$

(出典) 質量低下速度, 密度 : NUREG-1805

(9) 評価結果

a. 建屋外壁の温度評価

(a) 許容限界値 (許容限界温度)

本評価で用いる許容限界値 (許容限界温度) については、一般的にコンクリートの強度に影響がないとされる 200 度とする。

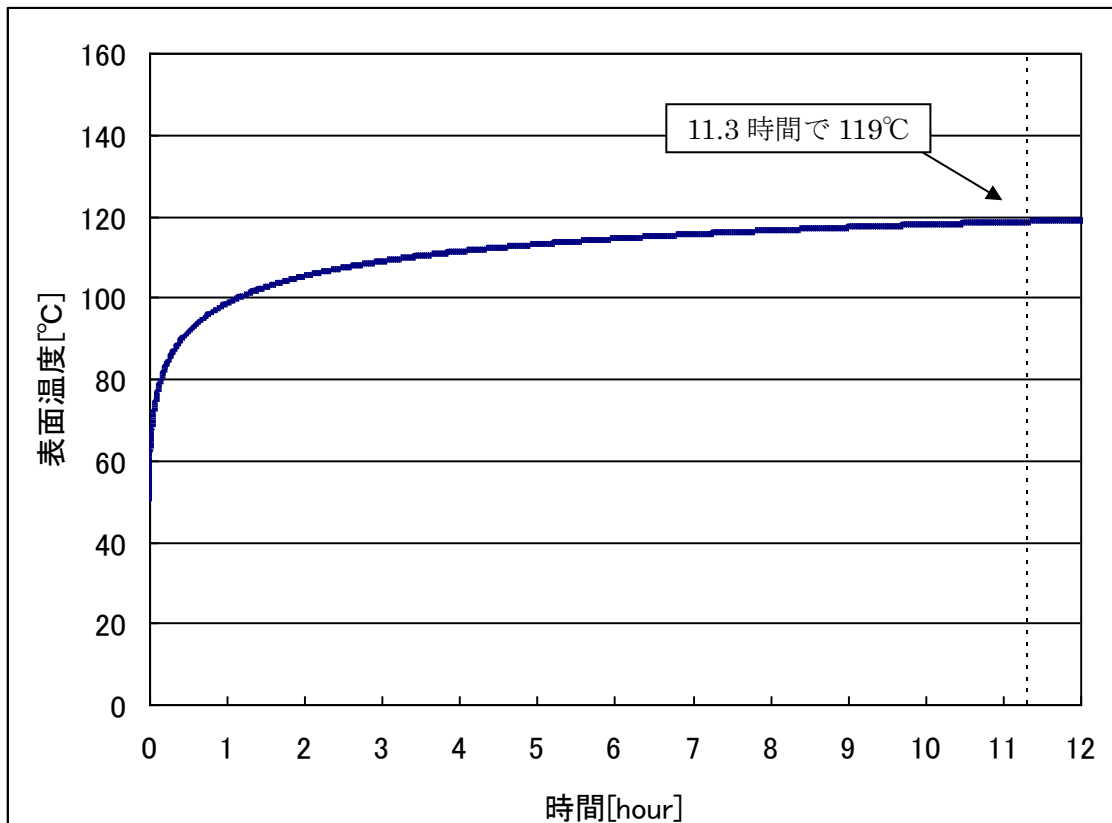
(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、発電用原子炉施設外壁の表面温度は約 119 度となり、許容温度を下回ることを確認した（第 2-3 図）。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター  
 $T_0$ ：初期温度[50℃]， $E$ ：輻射強度[W/m<sup>2</sup>]， $\varepsilon$ ：コンクリート表面の放射率(0.95)※， $h$ ：コンクリート表面熱伝達率[34.9W/m<sup>2</sup>K]※， $k$ ：コンクリート熱伝導率[1.6W/mK]※， $\rho$ ：コンクリート密度[2200kg/m<sup>3</sup>]※， $c$ ：コンクリート比熱[879J/kgK]※， $t$ ：燃焼継続時間[s]

※：建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書



第 2-3 図 外壁面の温度推移

b. 軽油タンクの温度評価



(a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、軽油の発火点 225 度とする。

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で軽油および軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より、軽油の温度上昇を求め、軽油の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、軽油の温度は約 179 度となり、許容温度を下回ることを確認した。

$$T = \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS_2}{C} \right) t}$$

$T_0$  : 初期温度 [38°C],  $E$  : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 軽油タンク表面の放射率 (0.9) ※<sup>1</sup>,  $h$  : 軽油タンク表面熱伝達率 [17W/m<sup>2</sup>K] ※<sup>2</sup>,  $S_1$  : 軽油タンク受熱面積 [m<sup>2</sup>],  $S_2$  : 軽油タンク放熱面積 [m<sup>2</sup>],  $C$  : 軽油タンクおよび軽油の熱容量 [8.72×10<sup>8</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間 [s],  $T_{air}$  : 外気温度 [°C]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

c. 燃料移送ポンプの温度評価

燃料移送ポンプは、軽油タンクの近傍に設置されており、当該タンクにて火災が発生した場合、その輻射による熱影響を受ける。このため、燃料移送ポンプを熱影響から防護するための防護板（断熱）をその周囲に設置する。第 2-4 図に防護板（断熱）設置範囲の例を示す。

以下、防護板（断熱）の設置を考慮した場合の熱影響評価を実施する。

(a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、端子ボックスパッキンの耐熱温度 100°C とする。

パッキンの耐熱温度は、JIS 規格に基づく耐熱性を決定するための試験温度であり、この温度以下であれば、発火することなく、パッキンとしての性能が維持できることから、燃料移送ポンプの機能に影響はない。

(b) 評価条件

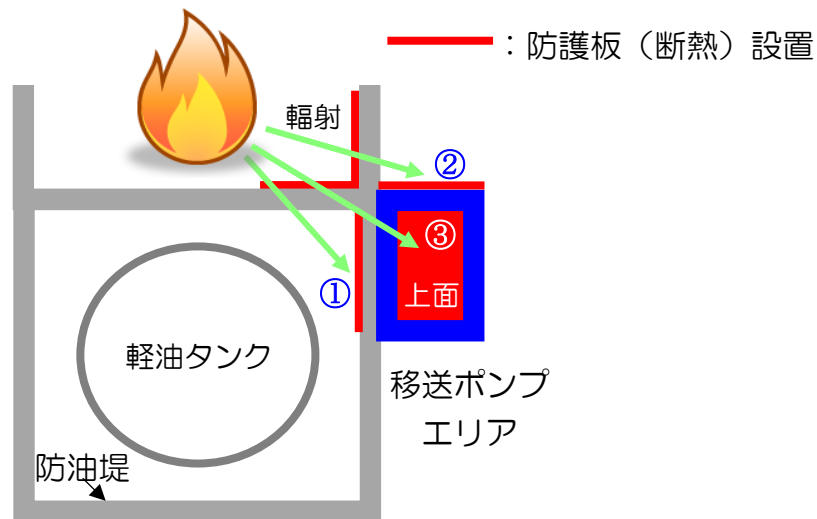
(4) 必要データから (8) 燃焼継続時間に、以下の条件を加えて評価する。

- ・ 第 2-4 図における①及び②の位置に設置する防護板（断熱）は、防油堤により全ての面に輻射は当たらないが、全面に輻射が当たる上面（③）の防護板（断熱）も含め、保守的に、火災から最短距離にて算出した最も厳しい条件の輻射が①～③の全ての面に当たるものとする。

なお、①～③の防護板（断熱）に対する熱影響が支配的であることから、これらについては評価上考慮するが、それ以外の面については、燃料移送

ポンプエリアに接する面が小さく、コンクリート製の防油堤もあることから評価上考慮しない。

- 輻射が当たる面は、防護板（断熱）のみとして評価した（防護板（断熱）と燃料移送ポンプ間に防油堤が設置されている箇所①については、防油堤による伝熱の低減は考慮しない）。
- 輻射を受けない面は、保守的に断熱とした。

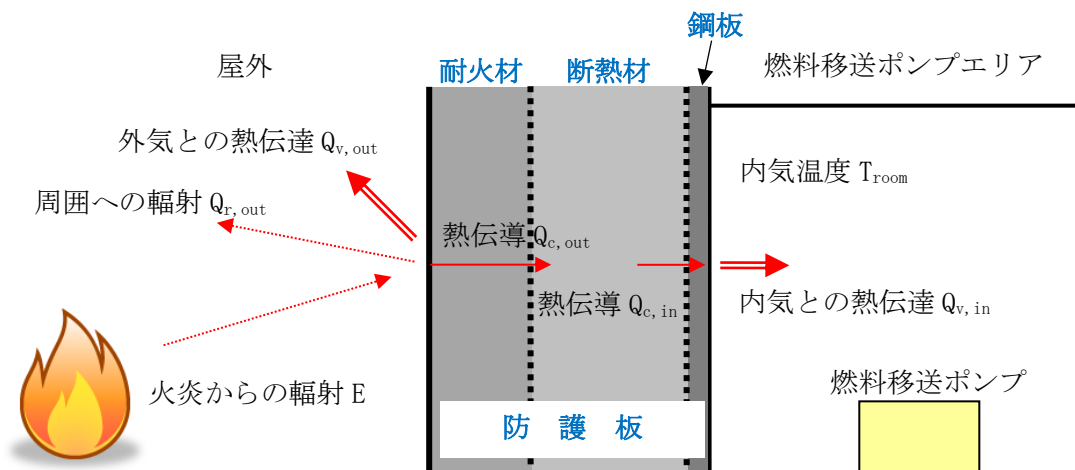


第 2-4 図 防護板（断熱）の設置概要と設置範囲の例

(c) 耐火性能の評価

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で燃料移送ポンプエリアに設置している防護板（断熱）が昇温されるものとして、下記により、燃料移送ポンプ周囲の最大温度（燃料移送ポンプの最大温度）を求め、許容限界温度以下であるか評価を実施した。

以下に概念図を示す。



第 2-5 図 伝熱の概念図

評価に必要なパラメータを以下に示す。

第 2-6 表 燃料移送ポンプエリア温度算出時の入力パラメータ

項目	パラメータ	備考		
外気温度[°C]	55 °C	日射の影響を考慮した相当外気温（切り上げ）		
ポンプエリア初期温度[°C]	38 °C	柏崎市の最高気温（37.6°C）を切り上げた温度（防護板（断熱）の裏面であり，日射の影響はない）		
防護板	耐火材	厚さ [mm]	100	メーカー仕様
		熱伝導率 [W/mK]		
		密度 [kg/m³]		
		比熱 [J/(kg·K)]		
		最高使用温度 [°C]		
		材質		
	断熱材	厚さ [mm]	150	メーカー仕様
		熱伝導率 [W/mK]		
		密度 [kg/m³]		
		比熱 [J/(kg·K)]		
		最高使用温度 [°C]		
		材質		
	鋼板	厚さ [mm]	20	軟鋼 300K の値*
		熱伝導率 [W/mK]	51.6	
密度 [kg/m³]		7860		
比熱 [J/(kg·K)]		473		

※：日本機械学会，“伝熱工学資料 改訂第 5 版,” 2009 年 5 月 20 日

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて，防護板（断熱）の内面ならびに燃料移送ポンプエリア温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T：温度，t：時刻，x：防護板（断熱）からの距離，α：熱拡散率

防護板（断熱）および防護板（断熱）内面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

$$Q_{v,in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

$h_{in}$  : 防護板（断熱）内面熱伝達率,  $A$  : 防護板（断熱）内面の表面積,  $T_{in}$  : 防護板（断熱）内面温度,

$T_{room}$  : 燃料移送ポンプエリア温度

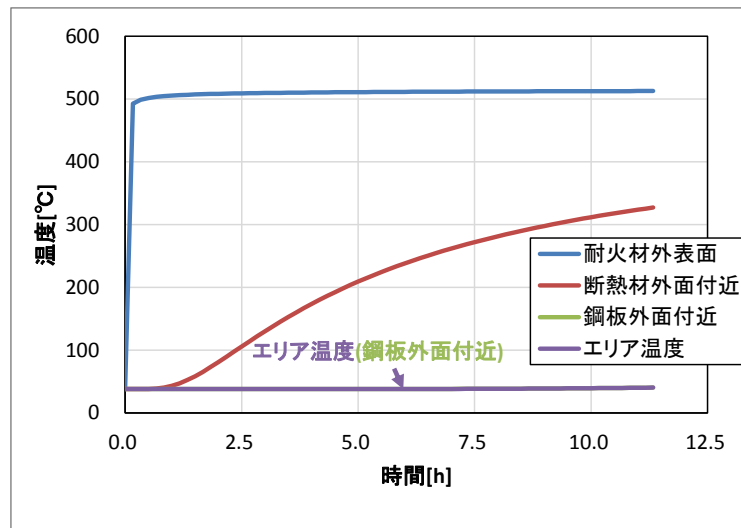
燃料移送ポンプエリア温度は、軽油タンク火災による防護板（断熱）内面温度上昇に伴う熱負荷がエリア内に蓄熱されることを考慮し、次式で求める。

$$\Delta T_{room} = \frac{Q_{v,in}}{\rho CV}$$

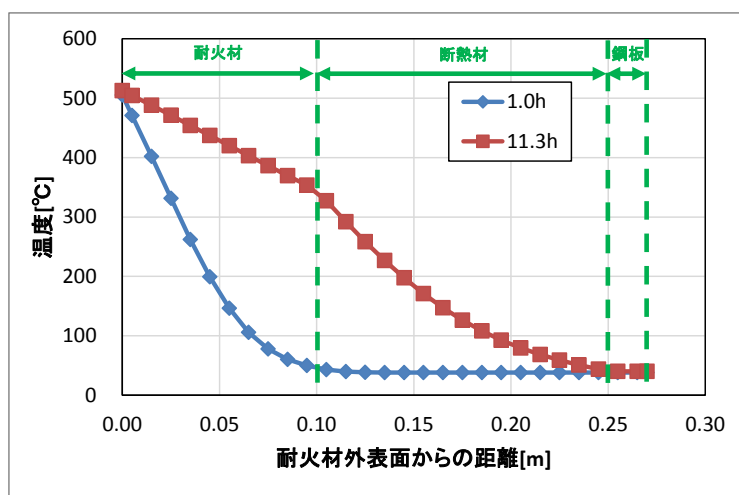
$\rho$  : 空気密度,  $C$  : 空気比熱,  $V$  : ポンプエリア体積

(d) 耐火性能の評価結果

軽油タンク火災における燃料移送ポンプの評価結果を以下に示す。



第 2-6 図 防護板（断熱）各部温度並びに燃料移送ポンプエリア温度



第 2-7 図 防護板（断熱）内部の温度分布

第 2-7 表 燃料移送ポンプ影響評価結果

項目	軽油タンク火災
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	32.59 × 10 <sup>3</sup>
燃焼継続時間[h]	11.3
防護板(断熱)外面温度[°C]	513
防護板(断熱)内面温度[°C]	40.3
ポンプエリア温度[°C]	40.3
許容温度[°C]	100 <sup>*1</sup>

※ 1 : 燃料移送ポンプ端子ボックスパッキンの耐熱温度

評価の結果、ポンプエリア（燃料移送ポンプ）の温度は約 41°C となり、許容温度を下回ることを確認した。

d. 排気筒の温度評価

(a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、排気筒鋼材の許容温度 325°C とする。

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より排気筒の最大温度を求め、許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、排気筒の温度は約 83 度となり、許容温度を下回ることを確認した。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50°C],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率 (0.9)  
 ※<sup>1</sup>,  $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※2</sup>

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

e. タービン建屋非常用電気品室の温度評価

6, 7号炉の軽油タンクは山側にあり, タービン建屋は海側にあることから, 直接輻射熱が届くことはない。5号炉の軽油タンクは海側にあり輻射熱を受けることから熱影響評価を実施する(第2-4図)。5号炉軽油タンク火災時の6号炉タービン建屋の熱影響評価を実施するにあたり使用するパラメータを以下に示す。また, (9)で熱影響評価を実施している6号炉軽油タンク火災時の6号炉原子炉建屋での熱影響評価に使用したパラメータを並べて示す。それぞれを比較すると, 6号炉軽油タンク火災の方が防油堤面積が大きく, 離隔距離が短く, 燃焼継続時間が長いことから, 5号炉軽油タンク火災時の6号炉タービン建屋熱影響評価は6号炉原子炉建屋での熱影響評価に包絡される。よって, 5号炉軽油タンク火災時には, 6号炉タービン建屋への熱影響はない。なお, 5号炉軽油タンクから7号炉のタービン建屋までの距離は, 6号炉までの距離より離れていることから同様に熱影響はない。

第2-8表 各建屋に対する軽油タンク火災の影響

	5号炉軽油タンク火災 タービン建屋への影響	6号炉軽油タンク火災 原子炉建屋への影響
防油堤面積[m <sup>2</sup> ]	185.64	289
離隔距離[m]	91.4	46.8
燃料貯蔵量[kl]	344	565
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s] <sup>1)</sup>	0.044	
密度[kg/m <sup>3</sup> ] <sup>1)</sup>	918	
燃焼速度[m/s] <sup>2)</sup>	4.793 × 10 <sup>-5</sup>	
燃焼継続時間[hour]	10.7	11.3

1) NUREG-1805 より

2) 評価ガイドより, 以下の式から算出

$$t = \frac{V}{S \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho}$$

$t$  : 燃焼継続時間[s],  $V$  : 燃料量[m<sup>3</sup>],  $S$  : 防油堤面積[m<sup>2</sup>],  $v$  : 燃焼速度[m/s]

$M$  : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s],  $\rho$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>]



第 2-4 図 非常用電気品室と危険物タンクまでの距離

(10) 火災による熱影響の有無の評価

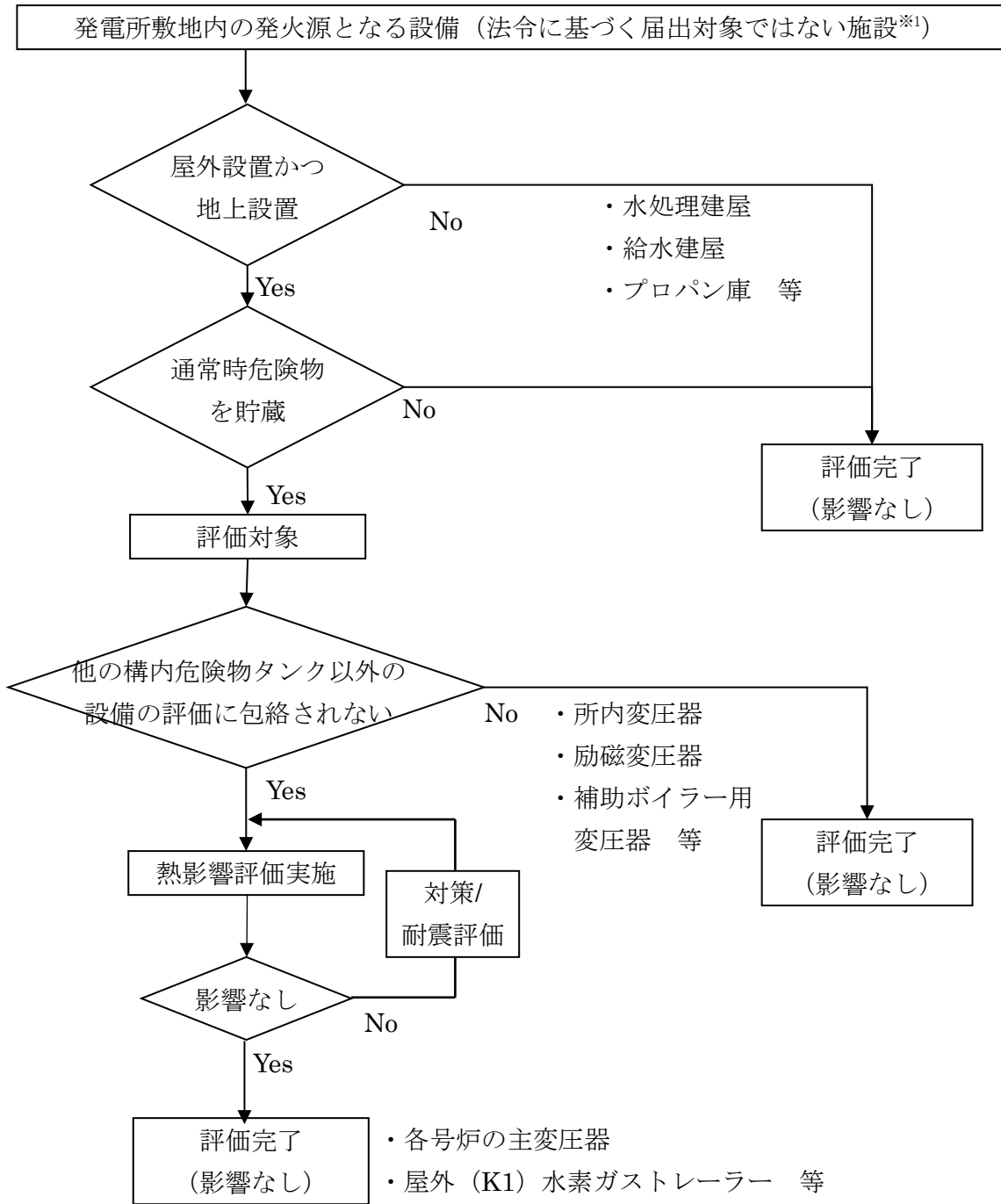
以上の結果から、軽油タンクにおいて火災が発生した場合を想定したとしても、許容限界温度を超えないことから、発電用原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないと評価する。

3. 構内危険物タンク以外の設備の火災影響評価

評価対象範囲

消防法または柏崎市火災予防条例に基づく届出対象施設ではない施設について、火災影響評価を実施する。評価対象とする設備を危険物タンクと同様に第 3-1 図のフローに基づき抽出した (第 3-1 表)。危険物を貯蔵し屋外に設置している設備を想定発火源 (主変圧器、水素ガストレーラー) とした。

なお、薬品を取り扱う設備は輻射熱を受けない屋内設置であること、外部への火災が発生する可能性が低いことから、評価対象から除外した (第 3-2 表)。



※ 1 : 消防法または柏崎市火災予防条例に基づく届出対象施設ではない変圧器等

第 3-1 図 構内危険物タンク以外の設備のうち評価対象抽出フロー



第3-1(a)表 その他の危険物

号炉	設備名	危険物の種類	数量	詳細評価要否
1号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	193.00kL	○ (※1)
2号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	198.00kL	○ (※1)
3号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	193.00kL	○ (※1)
4号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	190.00kL	○ (※1)
5号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	190.00kL	○ (※1)
6号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	200.00kL	○ (※1)
7号炉	主変圧器	1種2号 鉱油	214.00kL	○ (※1)
1号炉	所内変圧器 1A, 1B	1種2号 鉱油	18.40kL	× (※2)
2号炉	所内変圧器 2A, 2B	1種2号 鉱油	17.20kL	× (※2)
3号炉	所内変圧器 3A, 3B	1種2号 鉱油	17.20kL	× (※2)
4号炉	所内変圧器 4A, 4B	1種2号 鉱油	18.10kL	× (※2)
5号炉	所内変圧器 5A, 5B	1種2号 鉱油	18.10kL	× (※2)
6号炉	所内変圧器 6A, 6B	1種2号 鉱油	20.50kL	× (※2)
7号炉	所内変圧器 7A, 7B	1種2号 鉱油	19.20kL	× (※2)
共用	NO. 1 高起動変圧器	1種2号 鉱油	78.30kL	× (※2)
共用	NO. 2 高起動変圧器	1種2号 鉱油	70.00kL	× (※2)
共用	NO. 3 高起動変圧器	1種2号 鉱油	70.00kL	× (※2)
1号炉	低起動変圧器 1SA, 1SB	1種2号 鉱油	15.90kL	× (※2)
3号炉	低起動変圧器 3SA, 3SB	1種2号 鉱油	25.20kL	× (※2)
5号炉	低起動変圧器 5SA, 5SB	1種2号 鉱油	17.05kL	× (※2)
6号炉	低起動変圧器 6SA, 6SB	1種2号 鉱油	24.60kL	× (※2)
1号炉	励磁変圧器	1種2号 鉱油	13.20kL	× (※2)
2号炉	励磁変圧器	1種2号 鉱油	13.50kL	× (※2)
3号炉	励磁変圧器	1種2号 鉱油	13.50kL	× (※2)
4号炉	励磁変圧器	1種2号 鉱油	9.50kL	× (※2)
5号炉	励磁変圧器	1種2号 鉱油	9.50kL	× (※2)
共用	NO. 1 工事用変圧器	1種2号 鉱油	8.40kL	× (※2)
共用	NO. 2 工事用変圧器	1種2号 鉱油	8.40kL	× (※2)
共用	補助ボイラー用変圧器 3A	1種2号 鉱油	32.30kL	× (※2)
共用	補助ボイラー用変圧器 4A	1種2号 鉱油	9.10kL	× (※2)
共用	補助ボイラー用変圧器 4B	1種2号 鉱油	9.10kL	× (※2)
共用	補助ボイラー用変圧器 4C	1種2号 鉱油	9.10kL	× (※2)
共用	NO. 1～4 ボンベ室	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	2,520m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
1号炉	屋外ボンベ室 (K1)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	196m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
1号炉	屋外 (K1) 水素ガストレーラー	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	13,987m <sup>3</sup>	○

第3-1(b)表 その他の危険物

号炉	設備名	危険物の種類	数量	詳細評価要否
2号炉	屋外ボンベ室 (K 2)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	196m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
3号炉	屋外ボンベ室 (K 3)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	196m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
4号炉	屋外ボンベ室 (K 4)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	196m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
5号炉	屋外ボンベ室 (K 5)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	196m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
6号炉	屋外ボンベ室 (K 6)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	210m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
7号炉	屋外ボンベ室 (K 7)	水素ガス (ボンベ) 濃度: 99.99%	210m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
共用	予備変圧器	1種2号 鉱油	33.50kL	× (※2)
共用	補助ボイラー用変圧器 5 A	1種2号 鉱油	30.80kL	× (※2)
共用	補助ボイラー用変圧器 5 B	1種2号 鉱油	30.80kL	× (※2)
3号炉	PLR-INV (A) 入力変圧器	1種2号 鉱油	7.40kL	○ (※1)
3号炉	PLR-INV (B) 入力変圧器	1種2号 鉱油	7.40kL	○ (※1)
4号炉	PLR-INV (A) 入力変圧器	1種2号 鉱油	9.70kL	○ (※1)
4号炉	PLR-INV (B) 入力変圧器	1種2号 鉱油	9.70kL	○ (※1)
6号炉	RIP-ASD (A-1) 入力変圧器	1種2号 鉱油	3.61kL	○ (※1)
6号炉	RIP-ASD (A-2) 入力変圧器	1種2号 鉱油	13.70kL	○ (※1)
6号炉	RIP-ASD (B-1) 入力変圧器	1種2号 鉱油	3.61kL	○ (※1)
6号炉	RIP-ASD (B-2) 入力変圧器	1種2号 鉱油	13.70kL	○ (※1)
7号炉	RIP-ASD (A-1) 入力変圧器	1種2号 鉱油	3.70kL	○ (※1)
7号炉	RIP-ASD (A-2) 入力変圧器	1種2号 鉱油	9.50kL	○ (※1)
7号炉	RIP-ASD (B-1) 入力変圧器	1種2号 鉱油	3.70kL	○ (※1)
7号炉	RIP-ASD (B-2) 入力変圧器	1種2号 鉱油	9.50kL	○ (※1)
共用	水処理建屋	第2石油類 軽油	330L	× (屋内設置)
共用	給水建屋	第2石油類 軽油	200L	× (屋内設置)
1号炉	K 1 焼却設備プロパン庫	L Pガス	4000kg	× (屋内設置)
5号炉	K 5 雑固体廃棄物焼却設備 プロパン庫	L Pガス	4000kg	× (屋内設置)
6号炉	K 6 高所発電機	軽油	0.99kL	× (※3)
7号炉	K 7 高所発電機	軽油	0.99kL	× (※3)

※1 : 自号炉の変圧器火災による熱影響評価を実施する。

※2 : 自号炉の主変圧器火災による熱影響評価に包絡される。

※3 : 燃料タンクは「空」であることから、評価対象から除外する。

第3-2表 薬品類

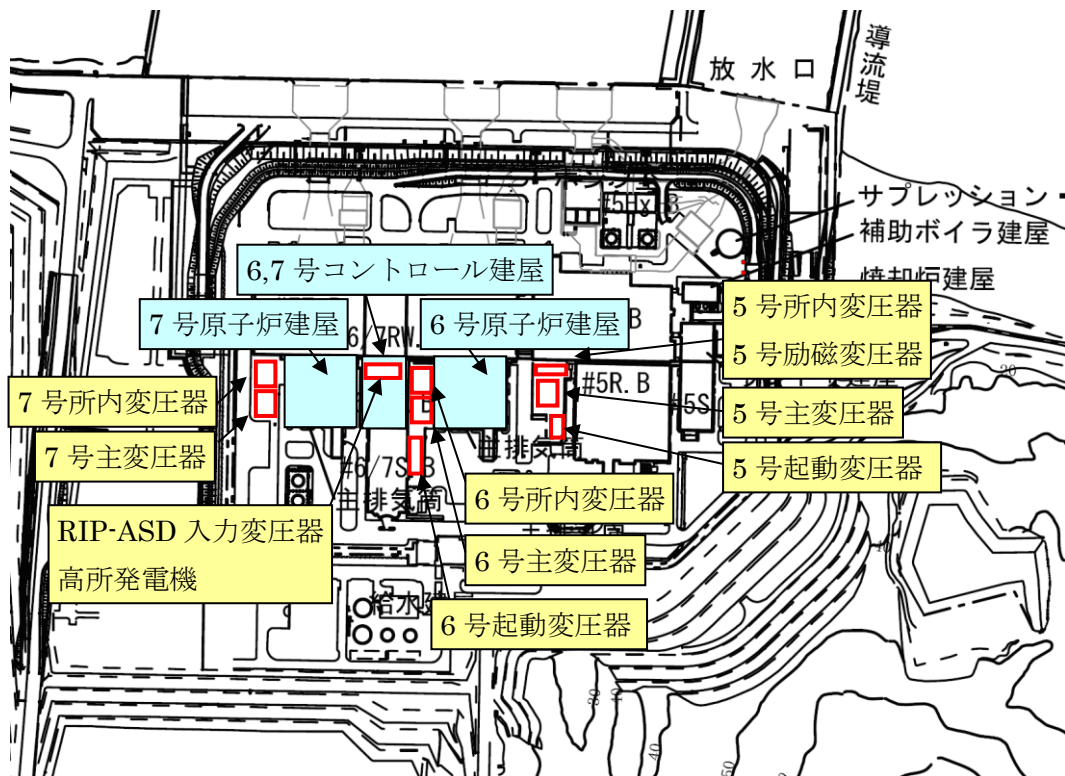
号炉	設備名	薬品の種類	数量	備考
1号炉	CWP建屋 (K1)	過酸化水素 濃度：35.0%	600L	× (屋内設置)
2号炉	CWP建屋 (K2)	過酸化水素 濃度：35.0%	600L	× (屋内設置)
共用	荒浜側 補助ボイラー	希硫酸 濃度：5%	250L	× (屋内設置)
共用	大湊側 補助ボイラー	希硫酸 濃度：35%	300L	× (屋内設置)
共用	大湊側 補助ボイラー	水加ヒドラジン 濃度：60%	20kg	× (屋内設置)
共用	大湊側 補助ボイラー	水加ヒドラジン 濃度：1%	700L	× (屋内設置)
共用	廃棄物一時保管庫	希硫酸	280L	× (屋内設置)
共用	廃棄物一時保管庫	PCB微量混入 絶縁油	1,600L	× (屋内設置)
共用	廃棄物一時保管庫	PCB微量混入 絶縁油	1,600L	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	硫酸 濃度：98%	4.2m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	塩酸 濃度：35%	5.9m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	苛性ソーダ 濃度：25%	18m <sup>3</sup>	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	重亜硫酸ソーダ 濃度：35%	240L	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	硫酸 濃度：98%	9L	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	硫酸 濃度：98%	190L	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	硫酸 濃度：98%	670L	× (屋内設置)
共用	水処理建屋	苛性ソーダ 濃度：25%	280L	× (屋内設置)

### 3.1 変圧器の火災影響評価について

発電所敷地内の変圧器の火災に対して、より一層の安全性向上の観点から、その火災が起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。

#### 3.1.1 評価対象変圧器

評価対象は、5～7号炉周辺の屋外（建屋屋上を含む）に設置してある変圧器を対象とする。各変圧器の設置場所を第3.1.1-1図、保有油量を第3.1.1-1表に示す。



第3.1.1-1図 変圧器の位置

第3.1.1-1表 変圧器保有油量

設備名	品名	保有油量
5号主変圧器	1種2号鉱油	190.00kL
6号主変圧器	1種2号鉱油	200.00kL
7号主変圧器	1種2号鉱油	214.00kL
低起動変圧器 5SA, 5SB	1種2号鉱油	17.05kL
低起動変圧器 6SA, 6SB	1種2号鉱油	24.60kL
所内変圧器 5A, 5B	1種2号鉱油	18.10kL
所内変圧器 6A, 6B	1種2号鉱油	20.50kL

所内変圧器 7 A, 7 B	1 種 2 号 鉱油	19. 20kL
5 号 励磁変圧器	1 種 2 号 鉱油	9. 50kL
6 号 RIP-ASD(A-1), (B-1) 入力変圧器	1 種 2 号 鉱油	3. 61kL
6 号 RIP-ASD(A-2), (B-2) 入力変圧器	1 種 2 号 鉱油	13. 70kL
7 号 RIP-ASD(A-1), (B-1) 入力変圧器	1 種 2 号 鉱油	3. 70kL
7 号 RIP-ASD(A-2), (B-2) 入力変圧器	1 種 2 号 鉱油	9. 50kL

### 3. 1. 2 発電用原子炉施設（外壁面）及び屋外施設の影響評価

#### (1) 変圧器の火災の想定

- ・ 発電用原子炉施設周辺に設置されており、発電用原子炉施設までの距離が近く、内包している絶縁油の多い主変圧器を対象とした。なお、主変圧器の周辺に所内変圧器等も設置しているが、防火壁を設置していることから、隣接変圧器への延焼は考慮しない。
- ・ 変圧器の損傷等による変圧器の全面火災を想定した。
- ・ 変圧器防災設備（防火水幕装置）の消火機能等には期待しない。
- ・ 気象条件は無風状態とした。
- ・ 火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の 3 倍とした。

#### (2) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する変圧器の火災影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第 3. 1. 2-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ] <sup>※</sup>	火災の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	変圧器規模より求めた燃焼半径
燃焼継続時間[s]	火災が終了するまでの時間
離隔距離[m]	変圧器から発電用原子炉施設までの直線距離
熱許容限界値[-]	建屋の外壁、軽油タンク、排気筒が想定火災の熱影響に対して許容限界以下になる値

上記の評価指標は、受熱面が輻射体の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

※：油の液面火災では、火炎面積の半径が 3m を超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うために、火災規模による輻射発散度の低減が無いものとする。

(3) 評価対象範囲

5～7号炉周辺の屋外には、主変圧器、所内変圧器、起動変圧器、励磁変圧器が存在するが、貯蔵量の多い主変圧器を評価対象とする。

(4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3.1.2-2 表 変圧器火災影響評価に必要なデータ

データ種類	内容
輻射発散度[W/m <sup>2</sup> ]	燃焼する可燃物によって決まる定数 23×10 <sup>3</sup> [W/m <sup>2</sup> ] (重油) ※1
主変圧器の投影面積[m <sup>2</sup> ]※2	6号炉：14.5×10.3 (150[m <sup>2</sup> ]) 7号炉：14.6×10.6 (155[m <sup>2</sup> ])
離隔距離[m]※3	建屋に近い主変圧器の中心から建屋までの距離 13[m]※4 軽油タンクに近い主変圧器の中心から軽油タンクまでの距離 67[m]※5 燃料移送ポンプに近い主変圧器の中心から燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板) までの距離 62[m]※5 排気筒に近い主変圧器の中心から排気筒までの距離 23[m]※5

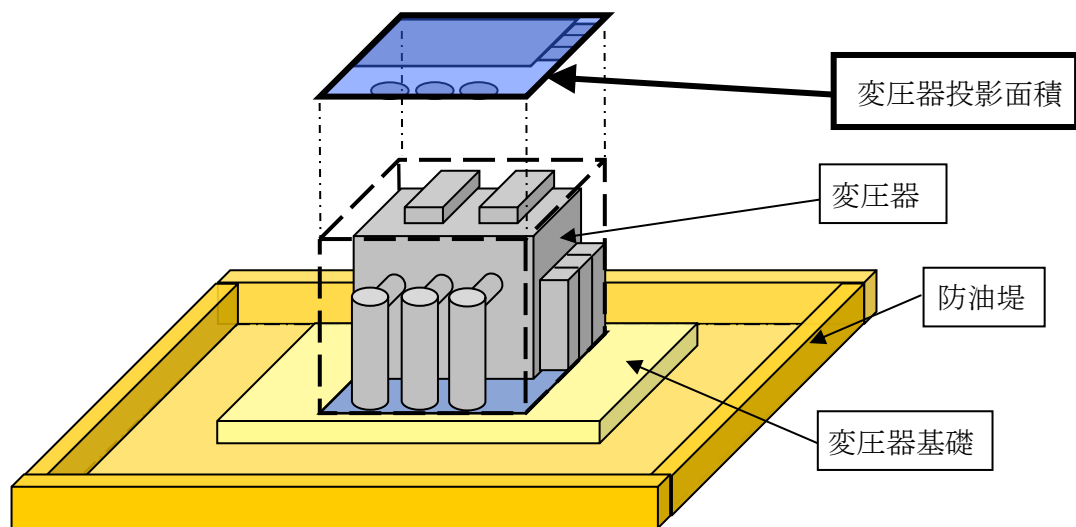
※1：変圧器用の絶縁油はその元素成分に関する規格がないため、絶縁油の輻射発散度は物性の近い重油の値を使用する。

※2：第 3.1.2-1 図に変圧器の投影面積を示す。

※3：6号と7号の主変圧器は油量がほぼ同等であることから、発電用原子炉施設との距離がより近い主変圧器にて熱影響の評価をする。

※4：6，7号コントロール建屋と6号主変圧器との距離

※5：7号軽油タンク，7号燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))，7号排気筒と7号主変圧器との距離



第 3.1.2-1 図 変圧器の投影面積

(5) 燃焼半径の算出

変圧器周りの防油堤には玉砂利が敷き詰められていること、および漏えいした油を回収する防災地下タンクを設置していることから防油堤の全面火災が生じることは考えにくい。よって、変圧器本体の全面火災により円筒火炎を生じることとし、燃焼面積は変圧器の投影面積に等しいものとする。従って、燃焼半径は変圧器の投影面積を円筒の底面と仮定し算出する。6号主変圧器について示す。( )内は7号炉。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

S : 投影面積 (火炎円筒の底面積) = 150 [m<sup>2</sup>] (155[m<sup>2</sup>])

$$R = (150 / \pi)^{0.5} = 6.91 \text{ [m]} \quad (7.03 \text{ [m]})$$

(6) 形態係数の算出

次の式から形態係数を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$  : 形態係数, L : 離隔距離, H : 火炎高さ, R : 燃焼半径

第 3.1.2-3 表 形態係数の算出結果

評価対象	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
燃焼半径[m]	6.91	7.03	7.03	7.03
離隔距離[m]	13	67	62	23
形態係数[-]	0.2619634	0.0213565	0.0248130	0.1341728

(7) 輻射強度の算出

火災の火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E：輻射強度，R<sub>f</sub>：輻射発散度，φ：形態係数

第 3.1.2-4 表 輻射強度の算出結果

評価対象	建屋	軽油タンク	燃料移送ポンプ (防護板 (鋼板))	排気筒
輻射発散度 [W/m <sup>2</sup> ]	23 × 10 <sup>3</sup>			
形態係数[-]	0.2619633	0.0213565	0.0248130	0.1341728
火炎面積の 直径 [m]	13.82	14.06	14.06	14.06
輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	6.02 × 10 <sup>3</sup>	0.49 × 10 <sup>3</sup>	0.57 × 10 <sup>3</sup>	3.08 × 10 <sup>3</sup>

(8) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。6号主変圧器について示す。( )内は7号炉。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho}$$

t：燃焼継続時間[s]，V：燃料量[m<sup>3</sup>]，R：燃焼半径[m]，v：燃焼速度[m/s]

M：質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s]，ρ：密度[kg/m<sup>3</sup>]

ここで，V=200[m<sup>3</sup>] (214[m<sup>3</sup>])，M=0.035[kg/m<sup>2</sup>・s]，ρ=960[kg/m<sup>3</sup>]として，燃焼継続時間を求めると，

$$v = 0.035 / 960 = 3.645 \times 10^{-5} \text{ [m/s]}$$

$$t = 200 / (150 \times 3.645 \times 10^{-5}) = 36553 \text{ [s]} = 10.1 \text{ [h]} \text{ (10.4 [h])}$$

(出典) 質量低下速度，密度：NUREG-1805



## (9) 評価結果

### a. 建屋外壁の温度評価

#### (a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、一般的にコンクリートの強度に影響がないとされる 200 度とする。

#### (b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、発電用原子炉施設外壁の表面温度は約 184 度となり、許容温度を下回ることを確認した。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター

$T_0$ ：初期温度[50℃]， $E$ ：輻射強度[W/m<sup>2</sup>]， $\varepsilon$ ：コンクリート表面の放射率(0.95)※， $h$ ：コンクリート表面熱伝達率[34.9W/m<sup>2</sup>K]※， $k$ ：コンクリート熱伝導率[1.6W/mK]※， $\rho$ ：コンクリート密度[2200kg/m<sup>3</sup>]※， $c$ ：コンクリート比熱[879J/kgK]※， $t$ ：燃焼継続時間[s]

※：建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

### b. 軽油タンクの温度評価

#### (a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、軽油の発火点 225 度とする。

#### (b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で軽油および軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より、軽油の温度上昇を求め、軽油の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、軽油の温度は約 42 度となり、許容温度を下回ることを確認した。

$$T = \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\varepsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-hS_2}{C} \right) t}$$

$T_0$ ：初期温度[38℃]， $E$ ：輻射強度[W/m<sup>2</sup>]， $\varepsilon$ ：軽油タンク表面の放射率(0.9)※<sup>1</sup>， $h$ ：軽油タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>， $S_1$ ：軽油タンク受熱面積[m<sup>2</sup>]， $S_2$ ：軽油タンク放熱面積[m<sup>2</sup>]， $C$ ：軽油タンクおよび軽油の熱容量[8.72×10<sup>8</sup>J/K]， $t$ ：燃焼継続時間[s]， $T_{air}$ ：外気温度[℃]

※<sup>1</sup>：伝熱工学資料，※<sup>2</sup>：空気調和・衛生工学便覧

c. 燃料移送ポンプの温度評価

(a) 許容限界値（許容限界温度）

燃料移送ポンプの許容限界値（許容限界温度）が端子ボックスパッキンの耐熱温度100℃であることを踏まえ、燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）の許容温度を当該ポンプの許容限界温度と同様の100℃とする。

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で燃料移送ポンプの防護板（鋼板）が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より防護板（鋼板）の最大温度を求め、防護板（鋼板）の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、燃料移送ポンプの温度は71度となり、許容温度を下回ることを確認した。

$$T = \frac{\varepsilon E \frac{S}{2} + h S T_{air}}{h S} - \left( \frac{\varepsilon E \frac{S}{2} + h S T_{air}}{h S} - T_0 \right) e^{\left( \frac{-h S}{c} \right) t}$$

$T_0$  : 初期温度[55℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 防護板（鋼板）外面の放射率(0.9)※<sup>1</sup>,  $h$  : 防護板（鋼板）表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>,  $S$  : 防護板（鋼板）放熱面積[32.4m<sup>2</sup>] ( $S/2$  : 受熱面積は外面のみ),  $C$  : 防護板（鋼板）の熱容量[2.41×10<sup>6</sup>J/K],  $t$  : 燃焼継続時間[s],  $T_{air}$  : 外気温度[55℃]

※1 : 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

d. 排気筒の温度評価

(a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、排気筒鋼材の許容温度325℃とする。

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より排気筒の最大温度を求め、許容温度以下であるか評価を実施した。その結果、排気筒の温度は約132度となり、許容温度を下回ることを確認した。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率(0.9)

※<sup>1</sup>,  $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>

※1 : 伝熱工学資料, ※2 : 空気調和・衛生工学便覧

#### (10) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から、変圧器において火災が発生した場合を想定したとしても、許容限界温度を超えないことから、発電用原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないとは評価する。

### 3.1.3 発電用原子炉施設（屋上）の影響評価

コントロール建屋の屋上に設置している RIP-ASD 入力変圧器に対しては、(1)～(3)のような設計上の配慮がなされている。

#### (1) 火災の発生防止

変圧器は設計基準地震動に対して絶縁油が漏えいしない設計としていることから、地震の際に漏えい・火災発生の恐れはない（別紙6-1参照）。中越沖地震以前の主変圧器等の設置状況とは異なり、変圧器・ブッシング等がコントロール建屋屋上に設置されており、同一の躯体上にあることから相対変位を生じることはなく、地盤沈下に伴うブッシング部の破損による漏えいや火災発生はない。また中越沖地震後の点検においても異常は確認されていない。定期的な点検や、絶縁油分析を行い信頼性が確保している。なお、更なる安全性向上の観点から、万が一絶縁油が漏えいした場合であっても、他号機側の RIP-ASD 入力変圧器へ絶縁油が流出することを防止するため防油堰を設ける。（第3.1.3-1図）

#### (2) 火災の感知、消火

変圧器のエリアは中央制御室より ITV による状況の確認が可能である。また、油火災に対応した大容量消火器を設置している。なお、更なる安全向上の観点から、感知器の設置を行い、早期の検知、消火が可能な設計とする。

「危険物の規制に関する規則」（昭和34年総理府令第55号）では、「危険物は、指定数量の十倍を一所要単位とすること」と定めており、変圧器絶縁油（第4類第3石油類非水溶性）の指定数量が2,000ℓであることをふまえると所要単位は3.1単位となる。変圧器近傍には油火災用 B-20（20単位）の能力を持った消火器を各号機1台備えつけており所要能力を満たしている。

なお、同様の考え方から、JEAG 5002「変電所等における防火対策指針」では、「消火器具の所要能力単位は、全主要変圧器内に貯蔵された絶縁油量を20,000ℓで除した値以上」と定めており、当該エリアでは同じく3.1単位が必要な能力値となる。

#### (3) 火災の影響軽減

コントロール建屋の屋上面や、周辺建屋はその外壁の厚さにより、変圧器火災の影響を受けない設計としている。（3.1.3.2 変圧器の火災による発電用原子炉施設（屋上）への影響 参照）

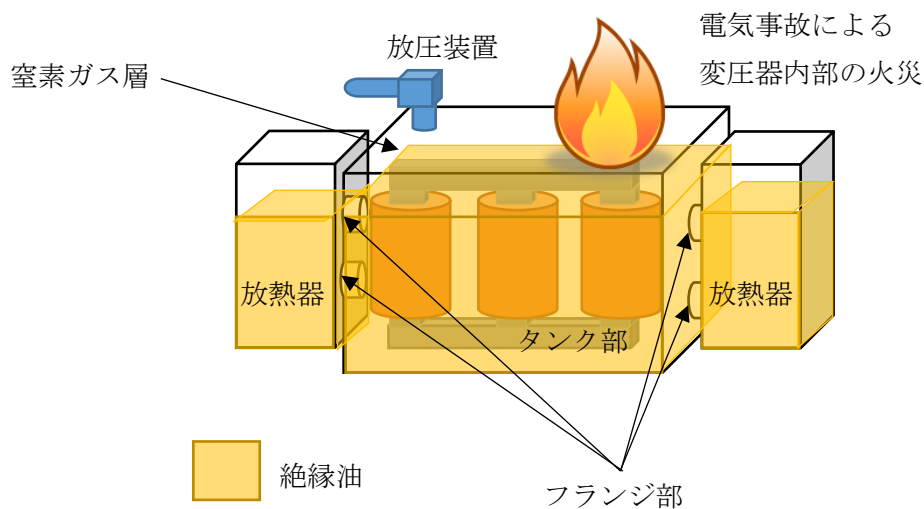
以上のように、RIP-ASD 入力変圧器に対しては、火災防護上の対策がなされていることから、安全施設への影響はないと考えられるが、以下では万が一火災が生じた場合の影響評価を実施する。

単なる漏えいでは周囲に火源がないことから、火災には至らない。したがって、火災としては、地絡、短絡など電気事故に伴うものが考えられるが、事故時には保護継電器が作動し事故電流を遮断し、仮に過熱により内圧が上昇した場合でも変圧器上部に設置した放圧装置により放圧する構造であるため、タンクは損傷には至らず、変圧器上部での火災となる。放圧する場合でも変圧器内は窒素ガスが封入されており変圧器上部には窒素ガスの層があることと、受け容器へ導かれることから油が吹き出すことはない。燃焼する位置は、酸素供給の観点から放圧装置などが設置されている上部が考えられ、この場合、タンクの貫通部である放熱器フランジについては、液位が高い間には絶縁油の液相部に浸っており火炎にさらされないことから、著しい漏えいは生じない。(第 3.1.3-2 図)

以上を踏まえ、変圧器は設計基準地震動に対して漏えいしない設計としており、複数台の同時火災は想定されないため、変圧器 1 台の投影面積での火災を想定し評価する。

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

第 3.1.3-1 図 変圧器・防油堰配置



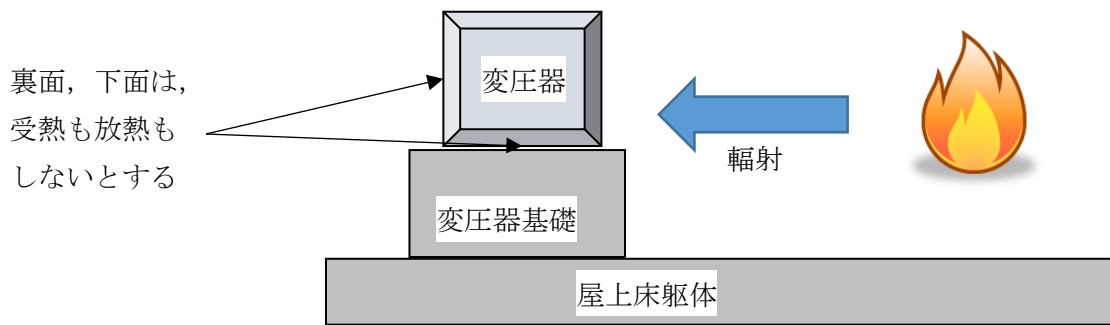
第 3.1.3-2 図 変圧器火災の概要図

### 3.1.3.1 変圧器の火災における延焼の危険性

RIP-ASD 入力変圧器において、火災が起こったとしても周囲の変圧器に影響を及ぼさないことを評価するものである。

#### (1) 変圧器の火災の想定条件

- ・ 周囲への熱影響を考慮し、保有油量が最大である 6 号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器の全面火災を想定した。
- ・ 配置上、油量が最大である 6 号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器と向かい合い、油量が少なく最も接近している 7 号 RIP-ASD(A-1) 入力変圧器が輻射熱を受ける状態を想定した。受熱面は下面と裏面を除く全ての面とし、表面以外の面は発熱源に最も近い表面と同等の輻射熱を受けるものとした。また、輻射熱を受けない面は保守的に断熱とし、大気への放熱は輻射を受ける面（下面と裏面を除く全ての面）からのみなされるものとした。（第 3.1.3.1-1 図）
- ・ 発熱側・受熱側とも絶縁油を満載した状態を想定した。
- ・ 変圧器の近傍に配備している大型消火器による消火には期待しない。
- ・ 気象条件は無風状態とした。
- ・ 火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の 3 倍とした。



第 3.1.3.1-1 図 変圧器輻射影響範囲の概要図

(2) 評価対象範囲

評価対象範囲は、コントロール建屋の屋上に設置している全ての変圧器および発電機とする。発熱側は油量が最も多く燃焼時間が長い 6 号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器、受熱側は油量が少なく最も接近している 7 号 RIP-ASD(A-1) 入力変圧器とすることにより、他の変圧器等は本評価に包絡される。

(3) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3.1.3.1-1 表 変圧器火災影響評価に必要なデータ

データの種類	内容
輻射発散度 [W/m <sup>2</sup> ]	燃焼する可燃物によって決まる定数 23×10 <sup>3</sup> [W/m <sup>2</sup> ] ※ <sup>1</sup> (重油) ※ <sup>2</sup>
6 号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器の投影面積 [m <sup>2</sup> ]	5.15×4.64=23.9[m <sup>2</sup> ]
離隔距離 [m]	変圧器間の最短距離 4.1[m]

※1：評価ガイド付属書 B より

※2：変圧器用の絶縁油はその元素成分に関する規格がないため、輻射発散度は物性の近い重油の値を使用した。

(4) 燃焼半径の算出

6 号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器本体の全面火災により円筒火炎を生じることとし、燃焼面積は変圧器の投影面積に等しいものとする。従って、燃焼半径は変圧器の投影面積を円筒の底面と仮定し算出する。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

$$S : \text{投影面積 (火炎円筒の底面積)} = 23.9 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$R = (23.9 / \pi)^{0.5} = 2.75 \text{ [m]}$$

(5) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>], m : 質量[kg]

ここで、V=13.7[m<sup>3</sup>], M=0.035[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ=960[kg/m<sup>3</sup>]として、燃焼継続時間を求めると、

$$v = 0.035/960 = 3.645 \times 10^{-5} [\text{m/s}]$$

$$t = 13.7 / (23.9 \times 3.645 \times 10^{-5}) = 15708 [\text{s}] = 4.36 [\text{h}]$$

(6) 危険輻射強度の算出

6号RIP-ASD(B-2)入力変圧器の火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で7号RIP-ASD(A-1)入力変圧器が昇温されるものとする。輻射による入熱量と対流熱伝達による放熱量の差が変圧器の温度上昇に寄与することを表した下記の式から、重油の温度Tが200℃<sup>※1</sup>となる危険輻射強度を求める。

$$C \frac{dT}{dt} = \varepsilon E S_1 - h(T - T_{air}) S_2$$

T<sub>0</sub> : 変圧器初期温度[55℃], T<sub>air</sub> : 外気温度 38[℃], E : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>], ε : 7号RIP-ASD(A-1)入力変圧器表面の放射率(0.9)<sup>※2</sup>, h : 7号RIP-ASD(A-1)入力変圧器表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]<sup>※3</sup>, S<sub>1</sub>(=S<sub>2</sub>) : 7号RIP-ASD(A-1)入力変圧器受熱面積[m<sup>2</sup>], C : 7号RIP-ASD(A-1)入力変圧器および重油の熱容量[6.62×10<sup>6</sup>J/K]<sup>※1</sup>, t : 燃焼継続時間[s]

※1 : 変圧器用の絶縁油はその元素成分に関する規格がないため、物性値は重油の値を使用。絶縁油の品質記録に記載されている発火温度の最低値とした。

※2 : 伝熱工学資料(変圧器の金属筐体は塗装仕上げされていることから、表面の塗装に類似の塗装として「塗料(エナメル・白)」の値を用いる。非金属の放射率は金属より大きいため、非金属である塗料の値で評価することは保守的である。)

※3 : 空気調和・衛生工学便覧(外表面の熱伝達率は、受熱面の形状や周囲の環境条件を受け変化するが、一般的な値として垂直外壁面(変圧器の側面部に相当)、屋根面(変圧器の上面部に相当)の夏季、冬季の値が示されている。評価上放熱が少ない方が保守的であることから、これらのうち最も小さい値である15kcal/m<sup>2</sup>h℃をSI単位に換算した17W/m<sup>2</sup>Kを用いる。)

結果として、危険輻射強度は以下になる。

$$E=8128[\text{W}/\text{m}^2]$$

(7) 形態係数の算出

火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。危険輻射強度となる形態係数を算出する。

$$E_{\text{max}}=R_f \times \phi$$

$E_{\text{max}}$ ：危険輻射強度， $R_f$ ：輻射発散度， $\phi$ ：形態係数

$R_f$ ：輻射発散度 $=23 \times 10^3[\text{W}/\text{m}^2]$ とすると、

第 3.1.3.1-2 表 形態係数の算出結果

7号 RIP-ASD(A-1)入力変圧器	
危険輻射強度 $[\text{W}/\text{m}^2]$	8127
輻射発散度 $[\text{W}/\text{m}^2]$	23000
形態係数	0.3533711

(8) 危険距離の算出

次の式から危険距離を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

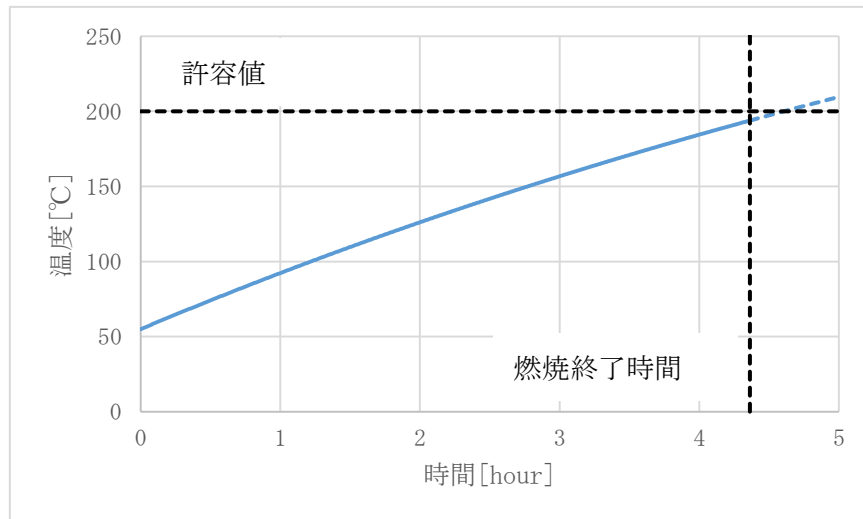
$\phi$ ：形態係数， $L$ ：危険距離 $[\text{m}]$ ， $H$ ：火炎高さ $[\text{m}]$ ， $R$ ：燃焼半径 $[\text{m}]$

第 3.1.3.1-3 表 危険距離の算出結果

7号 RIP-ASD(A-1)入力変圧器	
形態係数	0.3533711
燃焼半径 $[\text{m}]$	2.75
危険距離 $[\text{m}]$	約 3.90m

また、燃焼終了時点までの変圧器温度の推移を下図に示す。





第 3.1.3.1-2 図 変圧器絶縁油温度の推移

(9) 火災による熱影響の有無の評価

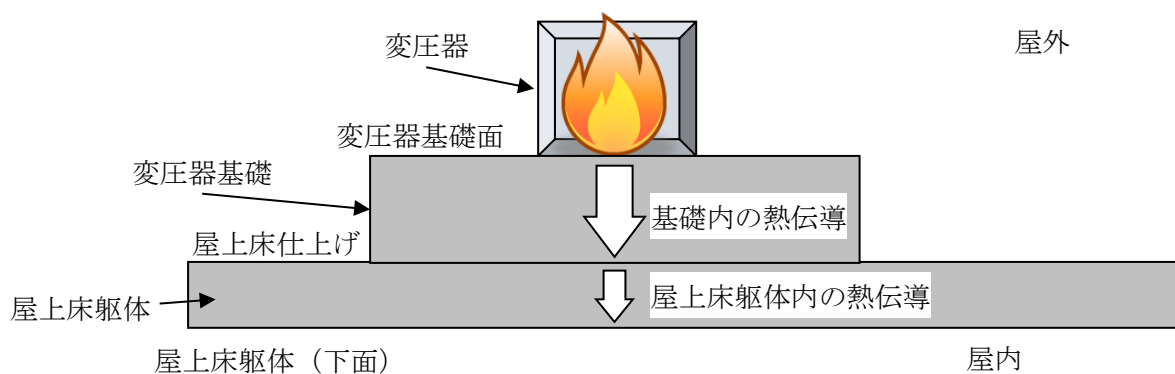
以上の結果から、6号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器において火災が発生した場合を想定したとしても、離隔距離(4.1m)が危険距離(約 3.9m)以上であることから、向かい合う他の変圧器等に影響を及ぼすことはないと評価できる。

3.1.3.2 変圧器の火災による発電用原子炉施設（屋上）への影響

(1) 変圧器の基礎への熱影響

火災が発生した時間から絶縁油が燃え尽きるまでの間、一定の火災の熱で変圧器の基礎が昇温されるものとして、基礎への熱影響について評価した。

以下に概念図を示す。



第 3.1.3.2-1 図 変圧器基礎への熱影響

評価に必要なパラメータを示す。

第 3. 1. 3. 2-1 表 変圧器火災影響評価に必要なパラメータ

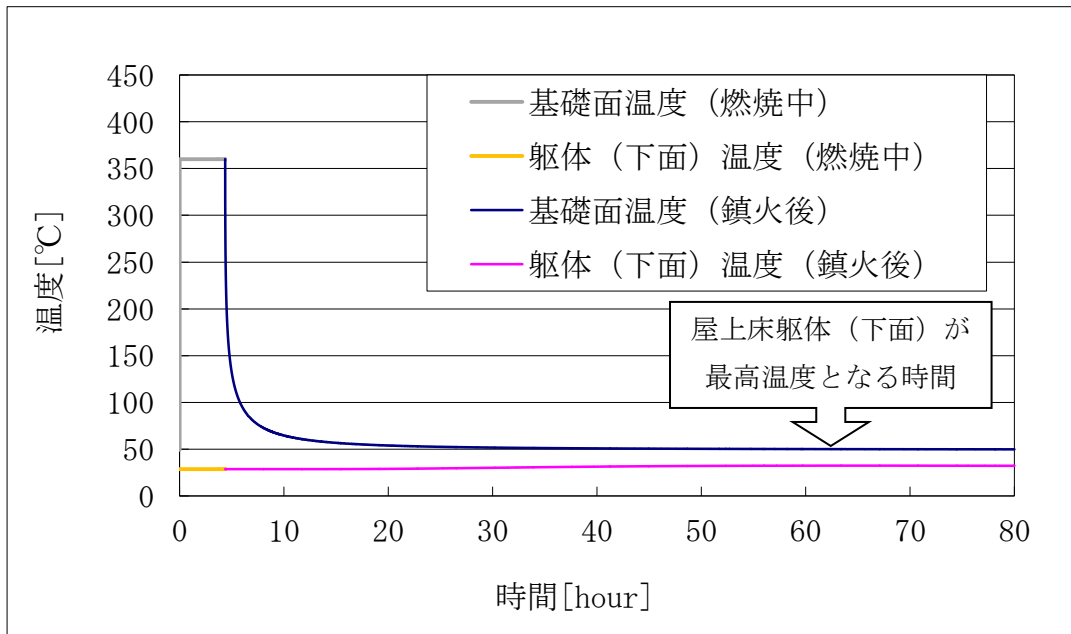
項目	パラメータ	備考
外気温度[°C]	50 °C	日射の影響を考慮し設定
基礎面熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	34. 883	コンクリートの基礎面熱伝達率
屋上床躯体（下面） 熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	3. 4883	コンクリートの屋上床躯体（下 面）熱伝達率
基礎・躯体の熱伝導率 [W/mK]	1. 6279	コンクリートの熱伝導率
基礎・躯体の熱拡散率[m <sup>2</sup> /s]	8. 42×10 <sup>-7</sup>	コンクリートの熱拡散率
基礎+躯体厚さ[m]	1. 19	基礎（0. 69m）, 躯体（0. 50m）

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、基礎面から屋上床躯体（下  
面）までの温度を求める。

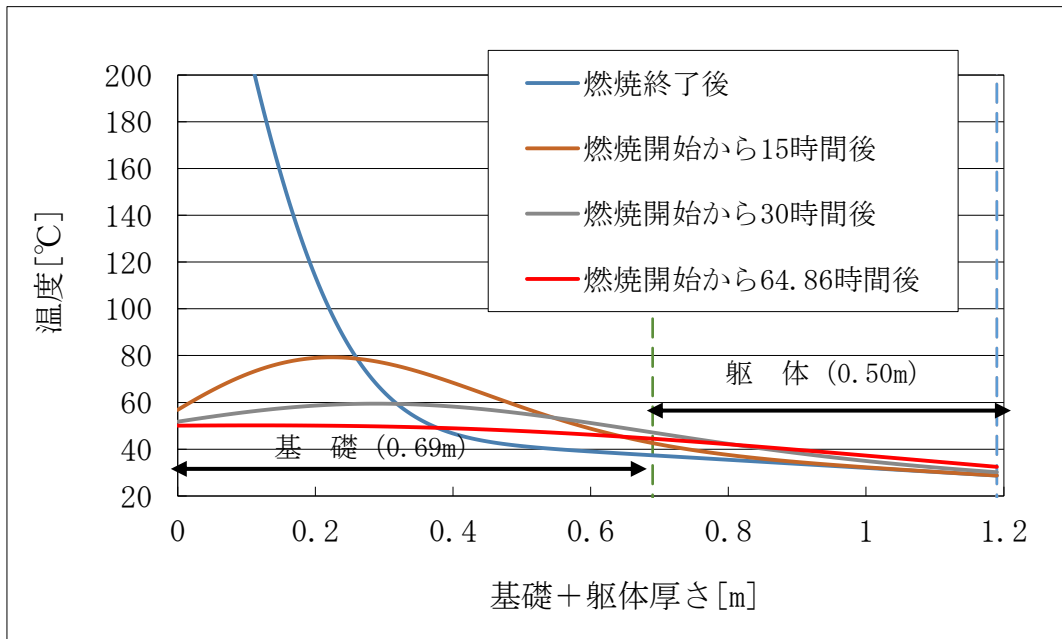
$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 基礎面からの距離, α : 熱拡散率

以下に評価結果を示す。



第 3. 1. 3. 2-2 図 基礎面・屋上床躯体（下面）の温度



第 3. 1. 3. 2-3 図 基礎・躯体内部の温度変化

第 3. 1. 3. 2-2 表 変圧器基礎面の温度評価結果

6 号炉 (変圧器基礎面)	
項目	6 号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器
火炎温度[°C]	360 <sup>※1</sup>
燃焼継続時間[hour]	4.36
基礎面温度[°C]	360 <sup>※2</sup> (50.1) <sup>※3</sup>
屋上床躯体 (下面) 温度[°C]	28.7 <sup>※2</sup> (32.5) <sup>※3</sup>
基礎・躯体境界温度[°C]	37.4 <sup>※2</sup> (44.5) <sup>※3</sup>
許容温度[°C]	200 <sup>※4</sup>

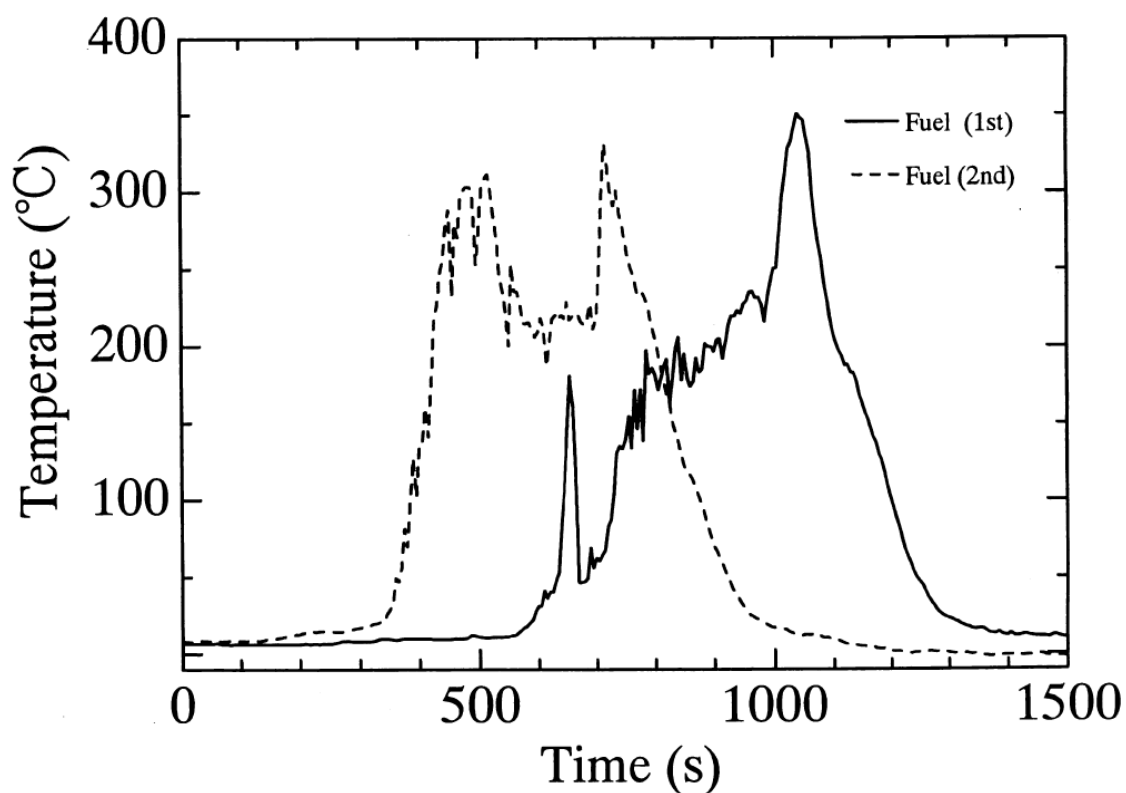
※ 1 : 絶縁油の沸点 (出典 : 機械工学便覧)

※ 2 : 燃焼終了直後の温度

※ 3 : 屋上床躯体 (下面) が最高温度に到達した時の温度 (燃焼開始から約 64.8 時間後)

※ 4 : コンクリートの許容限界温度

絶縁油の液面火災において、絶縁油 (炎の直下の部分) の温度は沸点近傍で安定すると考えられることから、本評価では加熱温度として絶縁油の沸点を用いる。大規模石油タンクの燃焼に関する研究報告書 (平成 11 年, 自治省消防庁消防研究所) には、直径 10m のタンクの原油を燃焼させる実験を行った際の原油の温度が掲載されている (第 3. 1. 3. 2-4 図)。これによると、最高温度は 350°C 程度である。

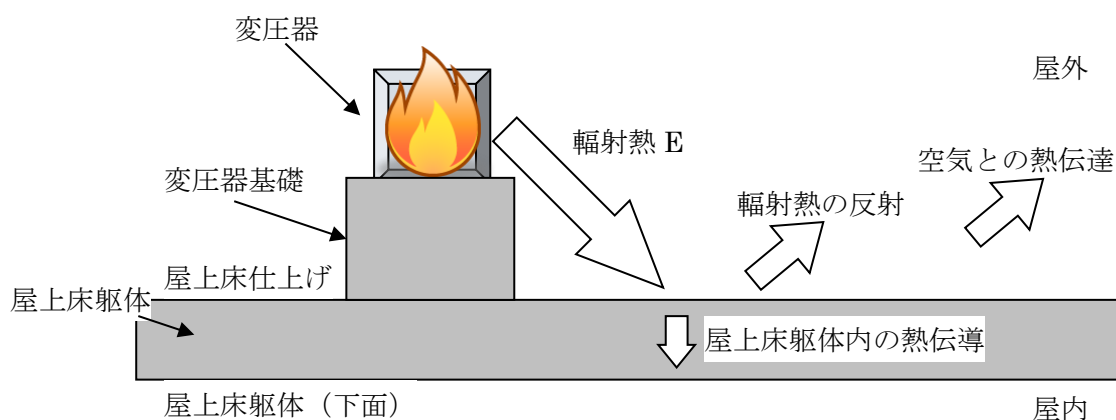


第 3.1.3.2-4 図 原油の温度変化（直径 10m のタンク）

評価の結果，基礎の表面（変圧器の設置面）より約 0.12m までコンクリートの許容限界温度を超えているが，屋上床躯体（下面）については許容限界温度を超えないことを確認した。

(2) コントロール建屋の屋上への熱影響

火災が発生した時間から絶縁油が燃え尽きるまでの間，一定の輻射強度でコントロール建屋の屋上面が昇温されるものとして，屋上への熱影響について評価した。



第 3. 1. 3. 2-5 図 建屋屋上への熱影響

評価に必要なパラメータを示す。

第 3. 1. 3. 2-3 表 変圧器火災影響評価に必要なパラメータ

項目	パラメータ	備考
外気温度[°C]	50 °C	日射の影響を考慮し設定
屋上面熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	34. 883	コンクリートの屋上面熱伝達率
屋上床躯体（下面）熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	3. 4883	コンクリートの屋上床躯体（下面）熱伝達率
躯体の熱伝導率[W/mK]	1. 6279	コンクリートの熱伝導率
躯体の熱拡散率[m <sup>2</sup> /s]	8. 42×10 <sup>-7</sup>	コンクリートの熱拡散率
躯体厚さ[m]	0. 50	

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、屋上床仕上げから屋上床躯体（下面）までの温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

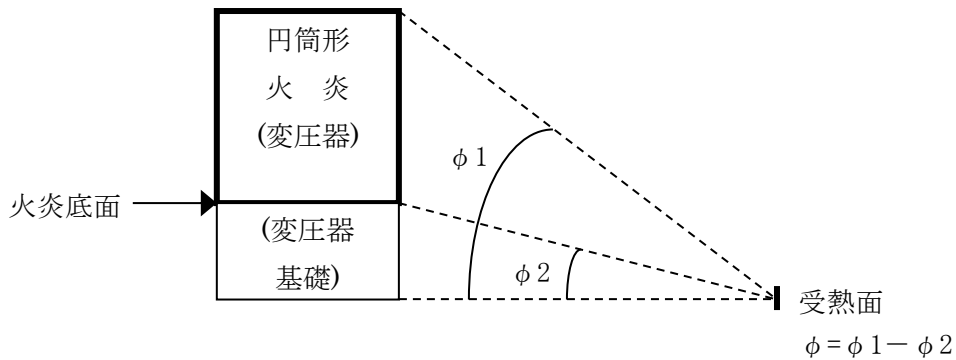
T : 温度, t : 時刻, x : 基礎面からの距離, α : 熱拡散率

なお、第 3. 1. 3. 2-6 図のように、受熱面が火炎底面と異なる高さにあることから、「石油コンビナートの防災アセスメント指針」より、下記の考え方にに基づき形態係数を算出し輻射強度を求める。

$$\phi = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(n-1)}}{\sqrt{(n+1)}} \right] \right\}$$

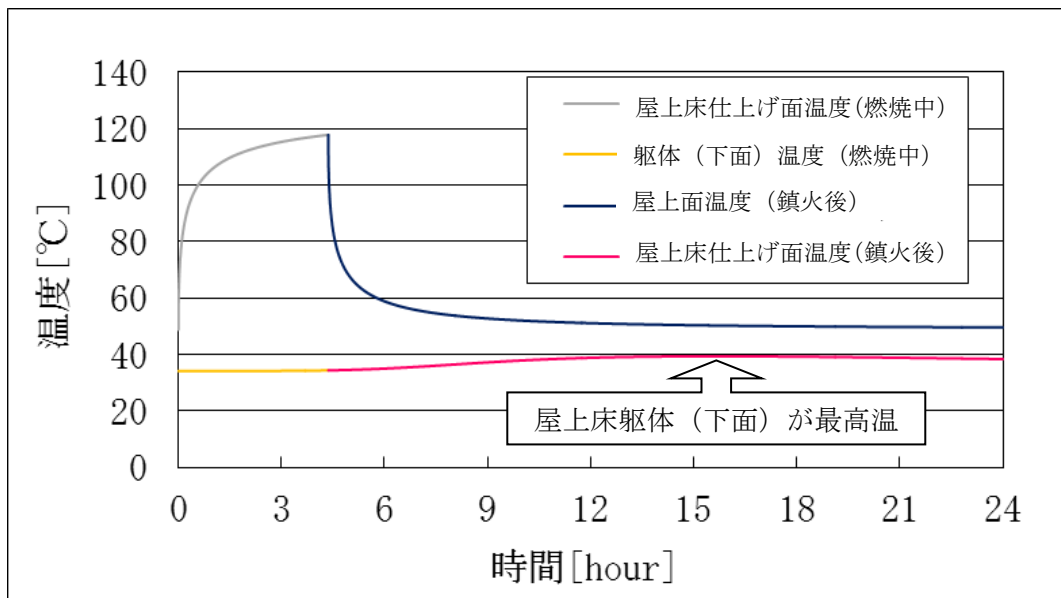
ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$  : 形態係数, L : 危険距離[m], H : 火炎高さ[m], R : 燃焼半径[m]

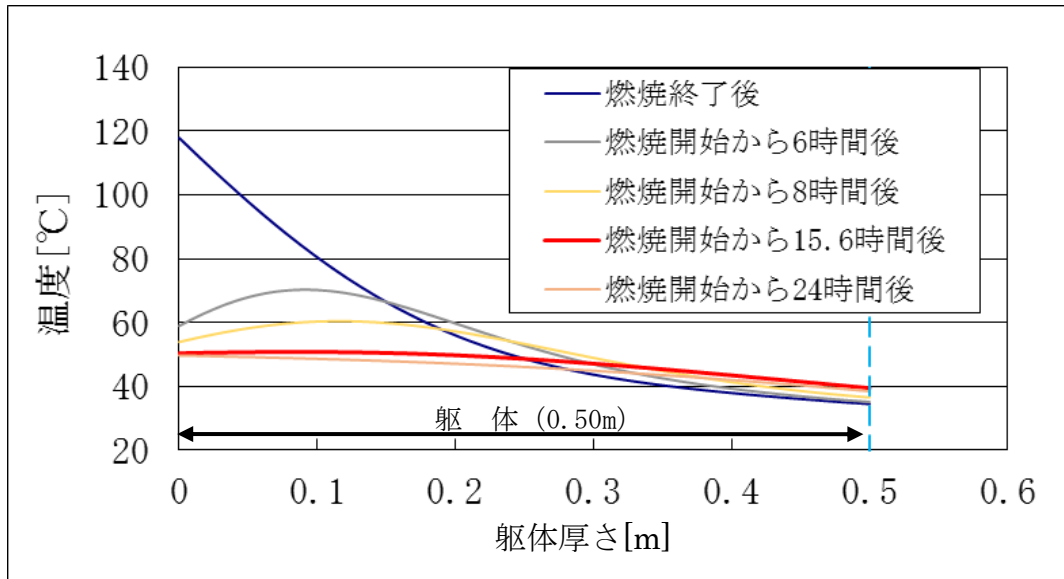


第 3.1.3.2-6 図 受熱面の高さによる形態係数

以下に評価結果を示す。



第 3.1.3.2-7 図 基礎面・屋上床躯体（下面）の温度



第 3. 1. 3. 2-8 図 躯体内部の温度変化

第 3. 1. 3. 2-4 表 屋上床仕上げ面の温度評価結果

6号炉 (屋上床仕上げ面)	
項目	6号 RIP-ASD(B-2)入力変圧器
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	3913
燃焼継続時間[hour]	4.36
屋上床仕上げ面温度[°C]	117.9 <sup>*1</sup> (50.4) <sup>*2</sup>
屋上床躯体(下面)温度[°C]	34.5 <sup>*1</sup> (39.5) <sup>*2</sup>
許容温度[°C]	200 <sup>*3</sup>

※1 : 燃焼終了直後の温度

※2 : 屋上床躯体(下面)が最高温度に到達した時の温度(燃焼開始から約15.6時間後)

※3 : コンクリートの許容限界温度

評価の結果、屋上床躯体(下面)の温度は燃焼開始から約15.6時間後に最高温度に到達しているが、コンクリートの許容限界温度を超えないことを確認した。

ただし、屋上床躯体(下面)の温度上昇が確認されたことから、変圧器の下部に位置する中央制御室換気空調機室について、内気の温度評価を実施する。なお、変圧器基礎面からの入熱による内気の温度上昇については、その面積が小さく内気への影響は限定的であることから、屋上床仕上げからの入熱による内気の温度評価に包絡される。

### (3) 屋上設置機器への影響

コントロール建屋屋上階に設置する無線連絡設備及び衛星電話設備のアンテナ

については、RIP-ASD 入力変圧器に対して 3. の通り火災に対する各種対策が取られていることから熱影響を受ける恐れはない。また、万が一変圧器火災が発生し熱影響を受けた場合であっても、送受話器、電力保安通信用電話設備の有線系回線が使用可能であることから、必要な通信連絡の機能は維持される。

### 3.1.3.3 変圧器の下部に位置している中央制御室換気空調機室への影響

屋上床仕上げ面からの入熱による影響

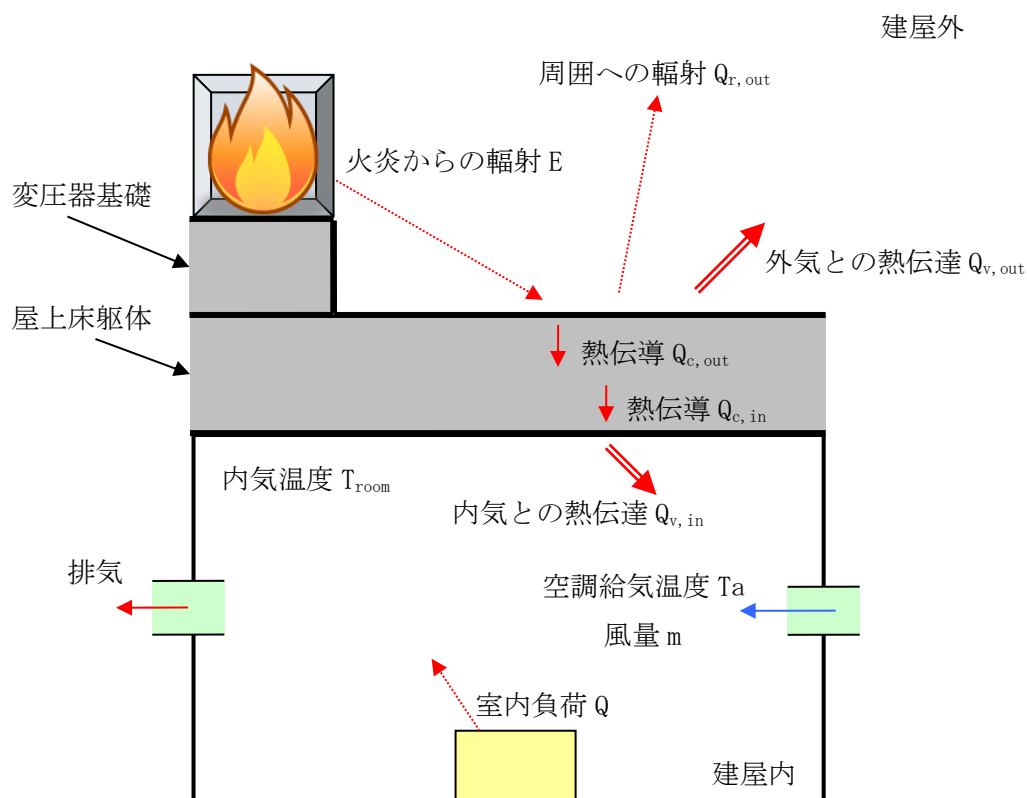
変圧器の下部に位置している中央制御室換気空調機室内の機器等への影響について評価した。

第 3.1.3.3-1 図に概念図を示す。

外壁および内壁面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

$$Q_{v,in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

$h_{in}$  : 内壁面熱伝達率,  $A$  : 内壁の表面積,  $T_{in}$  : 内壁面温度,  $T_{room}$  : 内気温度



第 3.1.3.3-1 図 伝熱の概念図

以下に評価結果を示す。



第 3.1.3.3-1 表 建屋内気温度の評価結果

6号炉中央制御室換気空調機室評価（建屋内気温度）	
項目	6号 RIP-ASD(B-2) 入力変圧器（屋上面）
内気温度[°C]	36.4 <sup>※1</sup>
許容温度[°C]	40 <sup>※2</sup>

※1：燃焼終了後も含めた最高温度

※2：中央制御室換気空調機室の最高使用温度

評価の結果、燃焼終了後の温度上昇を踏まえたとしても、内気温度は最高で 36.4°C となり、室内設備の最高使用温度 40°C を下回ることを確認した。

#### 3.1.4 まとめ

以上の結果から、コントロール建屋の屋上に設置している変圧器の火災を想定した場合、変圧器の基礎面は許容限界温度を超えるものの、屋上床躯体については許容限界温度を下回ることから、建屋の強度に対する熱影響はないと評価する。

また、変圧器の下部に位置している中央制御室換気空調機室の内気温度は最高でも 36.4°C であり、室内にある設備の最高使用温度を下回ることから、熱影響はないと評価する。



第 3.2-1 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
危険限界距離[m]	ガス爆発の爆風圧が 10kPa 以下になる距離

(3) 評価対象範囲

評価対象範囲は発電所構内で出火する水素トレーラーとする。

(4) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 3.2-2 表 水素爆発の評価条件

データ種類	内容
水素の K 値	コンビナート等保安規則第 5 条別表第二に掲げる数値 K=2860000
貯蔵設備又は処理設備の W 値	コンビナート等保安規則第 5 条貯蔵設備又は処理設備の区分に応じて次に掲げる数値 貯蔵設備：液化ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力(単位 トン)の数値の平方根の数値(貯蔵能力が一トン未満のものにあつては、貯蔵能力(単位 トン)の数値)、圧縮ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力(単位 立方メートル)を当該ガスの常用の温度及び圧力におけるガスの質量(単位 トン)に換算して得られた数値の平方根の数値(換算して得られた数値が一未満のものにあつては、当該換算して得られた数値) 処理設備：処理設備内にあるガスの質量(単位 トン)の数値 W=1.25 <sup>1/2</sup> =1.12
離隔距離[m]	水素ガストレーラーから発電用原子炉施設までの距離 約 1645[m]

(5) W値の算出

水素トレーラーの最大積載量を貯蔵能力とし、W値を算出した。

積載量(貯蔵能力) = 13987[m<sup>3</sup>] = 1.25[トン]

W = 1.25<sup>1/2</sup> = 1.12

(6) 危険限界距離の算出

次の式から危険限界距離を算出する。ここで算出した危険限界距離が水素トレーラーと発電用原子炉施設の間に必要な離隔距離となる。

$$X = 0.04\lambda \cdot \sqrt[3]{K \times W}$$

X : 危険限界距離[m],  $\lambda$  : 換算距離  $14.4[m \cdot kg^{-1/3}]$ , K : 水素の定数, W : 設備定数

K=2860000, W=1.12 として, 危険限界距離を求める。

X=約 85[m]

#### (7) 爆発による影響評価結果

以上の結果から, 水素トレーラーにおいて爆発が発生した場合を想定したとしても, 離隔距離(約 1645m)が危険限界距離(約 85m)以上であることから, 外部事象防護対象施設を内包する発電用原子炉施設に爆風圧による影響はないと判断する。

なお, 水素トレーラーから最も近い位置にある緊急時対策所についても, 離隔距離が約 404m あることから爆風圧による影響はないと判断する。

### 4. 構内危険物タンク等における延焼の危険性について

#### 4.1 軽油タンクの火災

軽油タンク近傍で危険物を保管している設備はなく, 現場作業に伴い「屋外の危険物保管」や「火気の使用」をする場合は, 社内文書に基づき危険物や火気を管理した状態で取り扱っている。また, 防火の観点から定期的なパトロール等にて現場の状況を確認している。

以上により, 軽油タンクの火災を想定したとしても周囲の可燃物への引火の可能性は低いと評価できる。

#### 4.2 車両(可搬型重大事故等対処設備)等の火災

##### 4.2.1 車両(可搬型重大事故等対処設備)等の延焼

可搬型重大事故等対処設備保管場所及び荒浜側常設代替電源設備設置場所(以下, 保管所等)において, 車両(可搬型重大事故等対処設備)または第二ガスタービン発電機の火災が起こったとしても周囲の車両に影響を及ぼさないことを評価するものである。

なお, 保管所等の一部は防火帯に近接しているが, 当該箇所における森林火災時の放射熱強度は火線強度が最大となったケース2において最大でも  $1.3\text{kw/m}^2$ \*\*程度であり, 車両が延焼するような輻射強度ではないことを確認している。

※: 石油コンビナート等防災アセスメント指針では, 人が長時間さらされても苦痛を感じない放射熱強度を  $1.6\text{kw/m}^2$  としている。

#### (1) 車両(可搬型重大事故等対処設備)等の火災の想定条件

- ・ 周囲への熱影響を考慮し, 燃料積載量の大きいガスタービン発電機車(GTG用燃料タンク)の火災を想定した。
- ・ 配置上, ガスタービン発電機車のGTG用燃料タンクと向かい合う他のガ

スタービン発電機車の走行用燃料タンクが輻射熱を受ける状態を想定した。ガスタービン発電機車の走行用燃料タンクの受熱面は裏面を除く全ての面とし、表面以外の面は発熱源に最も近い表面と同等の輻射熱を受けるものとした。

- ・発熱側となるガスタービン発電機車は燃料を満載し、受熱側となるガスタービン発電機車は燃料量を 1/2 とした（受熱側の熱容量を小さくすることにより、燃料の温度が上昇しやすい状態とした）。
- ・車両に積載している燃料は軽油とした。
- ・タンクローリーと異なり大容量の燃料タンクではないことから、ガスタービン発電機車の GTG 用燃料タンクの全面火災を想定した。
- ・ガスタービン発電機車は、2 基（同容量）の GTG 用燃料タンクが近接した状態で配置されていることから、タンクの同時火災を想定した。
- ・気象条件は無風状態とした。
- ・火災は円筒火災をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の 3 倍とした。

## (2) 評価対象範囲

評価対象範囲は、輻射熱の影響を考慮し燃料タンクが露出している車両（ガスタービン発電機車、電源車）とする。発熱側は燃料積載量の最も大きいガスタービン発電機車（GTG 用燃料タンク）、受熱側は熱容量の最も小さいガスタービン発電機車（走行用燃料タンク）とすることにより、他の車両は本評価に包絡される。なお、消防車等は、燃料タンクが露出しておらず、輻射熱の影響を受けないことから評価対象外とした。

## (3) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 4.2.1-1 表 ガスタービン発電機車火災影響評価に必要なデータ

データの種類	内容
輻射発散度 $[W/m^2]$ <sup>1)</sup>	燃焼する可燃物によって決まる定数 $42 \times 10^3 [W/m^2]$ （軽油）
燃料タンクの投影面積 $[m^2]$	ガスタービン発電機車 (GTG 用燃料タンク 2 基分) $0.84 \times 0.6 \times 2 = 1.0 [m^2]$
離隔距離 $[m]$	ガスタービン発電機車間の最短距離 5 $[m]$

1) 評価ガイド付属書 B より

## (4) 燃焼半径の算出

ガスタービン発電機車の火災においては様々な燃焼範囲の形態が想定されるが、円筒火炎を生ずるものとする。ここでの燃焼面積は、GTG 用燃料タンク（2 基）の

投影面積に等しいものとする。従って、燃焼半径 R[m] は GTG 用燃料タンクの投影面積を円筒の底面と仮定し算出した。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

S : 発電用燃料タンクの投影面積 (火炎円筒の底面積) = 1.0 [m<sup>2</sup>]

$$R = (1.0 / \pi)^{0.5} = 0.56 \text{ [m]}$$

#### (5) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>], m : 質量[kg]

ここで、V=0.4[m<sup>3</sup>], M=0.044[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ=918[kg/m<sup>3</sup>]として、燃焼継続時間を求めると、

$$v = 0.044 / 918 = 4.793 \times 10^{-5} \text{ [m/s]}$$

$$t = 0.4 / (1.0 \times 4.793 \times 10^{-5}) = 8279 \text{ [s]} = 2.29 \text{ [h]}$$

#### (6) 危険輻射強度の算出

ガスタービン発電機車 (GTG 用燃料タンク) の火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度でガスタービン発電機車 (走行用燃料タンク) が昇温されるものとして、下記の式より燃料である軽油の温度 T が 225℃となる危険輻射強度を求める。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E S t}{C + h S t}$$

T<sub>0</sub> : 初期温度[38℃], E : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>], ε : 走行用燃料タンク表面の放射率(0.96) ※<sup>1</sup>, h : 走行用燃料タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K] ※<sup>2</sup>, S : 走行用燃料タンク受熱面積[m<sup>2</sup>], C : 走行用燃料タンクおよび軽油の熱容量[8.92 × 10<sup>4</sup>J/K], t : 燃焼継続時間[s]

※ 1 : 伝熱工学資料, ※ 2 : 空気調和・衛生工学便覧

$$E = 4948 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

#### (7) 形態係数の算出

火炎から任意の位置にある点 (受熱点) の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。危険輻射強度となる形態係数を算出する。

$$E_{\max} = R_f \times \phi$$

E<sub>max</sub> : 危険輻射強度, R<sub>f</sub> : 輻射発散度, φ : 形態係数

R<sub>f</sub> : 輻射発散度 = 42 × 10<sup>3</sup> [W/m<sup>2</sup>] とすると、

第 4.2.1-2 表 形態係数の算出結果

	ガスタービン発電機車（走行用燃料タンク）
危険輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	4948
輻射発散度[W/m <sup>2</sup> ]	42000
形態係数	0.1178306

(8) 危険距離の算出

次の式から危険距離を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(n-1)}}{\sqrt{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$  : 形態係数, L : 危険距離[m], H : 火炎高さ[m], R : 燃焼半径[m]

第 4.2.1-3 表 危険距離の算出結果

	ガスタービン発電機車（走行用燃料タンク）
形態係数	0.1178306
燃焼半径[m]	0.56
危険距離[m]	1.73m

(9) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から、ガスタービン発電機車の GTG 用燃料タンクにおいて火災が発生した場合を想定したとしても、離隔距離(5m)が危険距離(1.73m)以上であることから、向かい合う他のガスタービン発電機車に影響をおよぼすことはないと評価できる。

また、他の車両についても離隔距離が 2m 以上あることから、周囲の車両（可搬型重大事故等対処施設）に影響をおよぼすことはないと評価できる。

4.2.2 第一ガスタービン発電機の火災

(1) 火災延焼の影響

第一ガスタービン発電機の発電機車の GTG 用燃料タンクにおいて火災が発生した場合を想定したとしても、「4.2」と同様に危険距離(1.73m)以上の離隔距離(5m)を確保することから、隣接するガスタービン発電機への影響は無い。

(2) アクセスルートへの影響

第一ガスタービン発電機はアクセスルートに近接しているが、隣接道路への離隔距離は5m以上確保する。第一ガスタービン発電機の発電機車のGTG用燃料タンクの火災を想定した場合、離隔距離5mでの輻射強度は1.1kW/m<sup>2</sup>\*程度であり、車両等の通行に影響を及ぼすことはない。評価条件および結果について、次表に示す。

第4.2.2-1表 アクセスルートへの火災影響評価結果

	第一ガスタービン発電機近傍アクセスルート
燃焼半径[m]	0.56
離隔距離[m]	5
形態係数	0.0247444
輻射発散度[W/m <sup>2</sup> ]	42000
輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	1.04

※：石油コンビナート等防災アセスメント指針では、人が長時間さらされても苦痛を感じない放射熱強度を1.6 kW/m<sup>2</sup>としている。

(3) 7号炉主変圧器火災の影響

第一ガスタービン発電機から離隔距離約72mの場所に7号炉主変圧器を設置していることから、「3.1 変圧器の火災影響評価について」における7号炉主変圧器の評価と同様に、第一ガスタービン発電機近傍の輻射強度評価を実施したところ、0.5kW/m<sup>2</sup>\*程度であり、操作への影響は無い。評価条件および結果について、次表に示す。

第4.2.2-2表 7号炉主変圧器への火災影響評価結果

	第一ガスタービン発電機
燃焼半径[m]	7.03
離隔距離[m]	72
形態係数	0.0185608
輻射発散度[W/m <sup>2</sup> ]	23000
輻射強度[kW/m <sup>2</sup> ]	0.43

※：石油コンビナート等防災アセスメント指針では、人が長時間さらされても苦痛を感じない放射熱強度を1.6 kW/m<sup>2</sup>としている。



## 5. 発電用原子炉施設の外壁に設置されている機器の火災影響評価

発電用原子炉施設の外壁に設置されている機器（防護扉等）については、外部火災の熱影響を受けやすいことから、これらの機器について、火災影響評価を実施する。

### 5.1 評価対象範囲

評価対象は、発電用原子炉施設の外壁に設置されている機器のうち、外部火災の熱影響を受ける以下の機器とする。

- ・ 防護扉
- ・ ルーバ（換気空調系の給排気口）
- ・ 配管貫通部
- ・ ブローアウトパネル

なお、複数設置されているこれらの機器のうち、最も熱影響を受ける位置にあるもの（発熱源に近く、機器本体だけでなく建屋内部へ熱影響が及ぶ可能性のあるもの）を評価することによって、その他の機器は本評価に包絡される。

発熱源は、火災時の輻射強度が大きい軽油タンク、変圧器、航空機とするが、建屋内への熱影響が確認された場合は内気温度についても評価する。

### 5.2 防護扉の火災影響評価について

#### 5.2.1 防護扉の温度評価

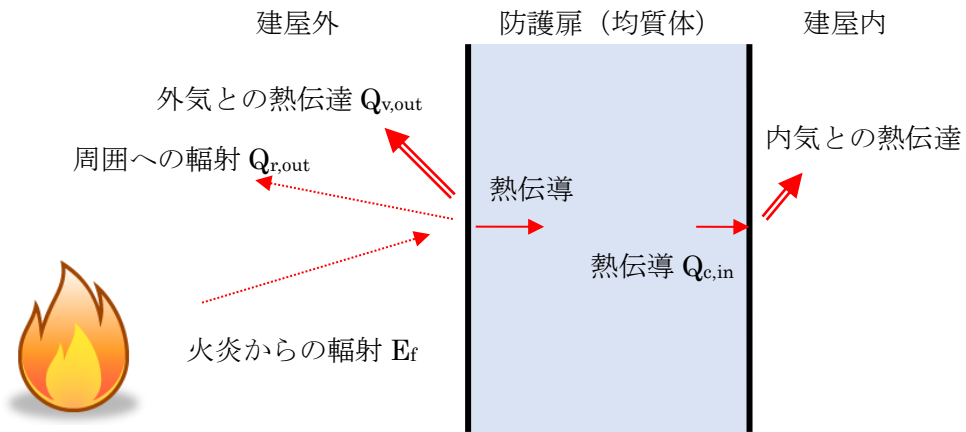
##### (1) 評価対象

防護扉のうち、軽油タンクに最も近く、輻射強度が最も大きくなる6号炉非常用ディーゼル発電機（C）室の防護扉を評価対象とする。

##### (2) 想定条件

- ・ 軽油タンクの火災については、添付資料－6「2. 構内危険物タンクの火災影響評価」と同様の想定とした。
- ・ 防護扉は、保守的に、扉外面の最も熱影響を受けやすい金属を防護扉の構造材（均質体）とした。
- ・ 火災が発生した時間から、燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度を受けるものとした。

以下に、概念図を示す。



第 5.2.1-1 図 伝熱の概念図

(3) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 5.2.1-1 表 軽油タンク火災影響評価に必要なデータ

項目	パラメータ	備考
扉材質		-
外気温度[°C]	50	太陽輻射を考慮
内気温度[°C]	33.3	夏期換算値
外面熱伝達率[W/(m <sup>2</sup> ・K)]	第 4.1-2 図参照	自然対流熱伝達率 (Bayley の式)
内面熱伝達率[W/(m <sup>2</sup> ・K)]	第 4.1-2 図参照	自然対流熱伝達率 (Bayley の式)
扉の熱伝導率[W/(m・K)]		
扉の厚さ[m]		-
外面放射率(吸収率)[-]	0.9	伝熱工学資料
内面放射率[-]	0	輻射放熱はゼロとする
扉の熱拡散率[m <sup>2</sup> /s]		
シュテファン・ボルツマン定数[W/(m <sup>2</sup> ・K)]	5.67×10 <sup>-8</sup>	伝熱工学資料

Bayley の式

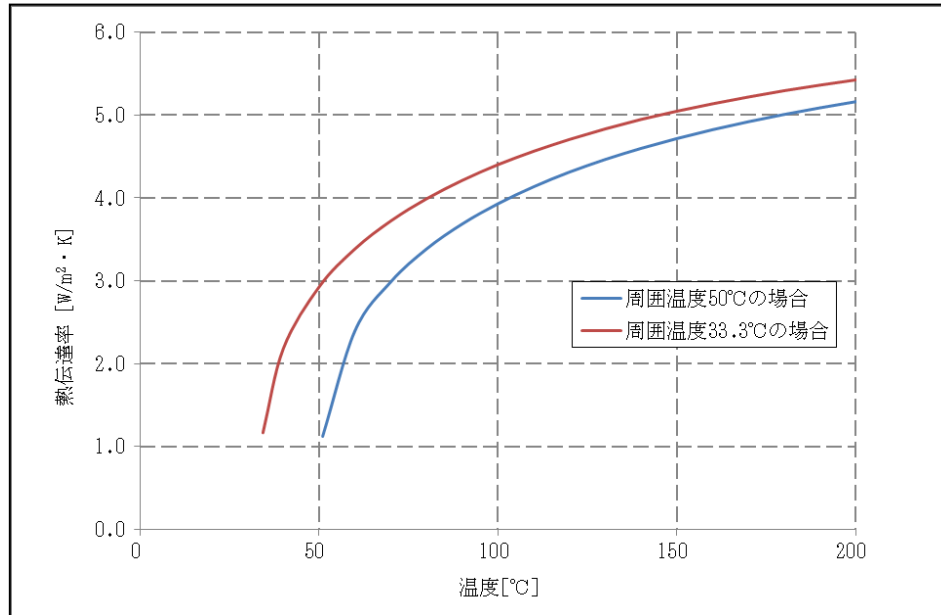
$$Nu \equiv h \cdot x / \lambda = 0.10 Ra^{1/3}$$

$$(2 \times 10^9 \leq Ra \equiv g \cdot \beta(T - T_{out}) \cdot x^3 / \nu^2 \cdot Pr \leq 10^{12})$$

より、自然対流熱伝達率 h は次式から求められる。

$$h = 0.10 \lambda (g \cdot \beta(T - T_{out}) \cdot Pr / \nu^2)^{1/3}$$

$\lambda$ : 空気の境膜平均温度 (扉面温度  $T$  と周囲流体温度  $T_{out}$  の平均値) での熱伝導率  $[W/(m \cdot K)]$ ,  $g$ : 重力加速度  $[m/s^2]$ ,  $\beta$ : 空気の境膜平均温度での熱膨張率  $[1/K]$ ,  $Pr$ : 空気の境膜平均温度でのプラントル数  $[-]$ ,  $\nu$ : 空気の境膜平均温度での動粘性率  $[m^2/s]$



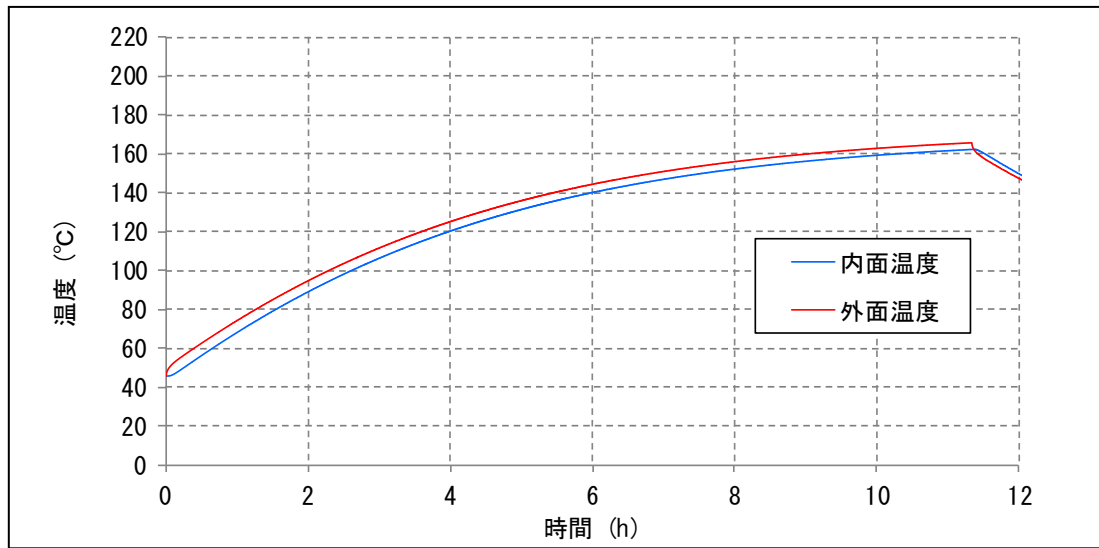
第 5.2.1-2 図 自然対流熱伝達 (bayley の式)

(4) 防護扉の内外面温度と膨張量の算出

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、防護扉外面および内面温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

$T$ : 温度,  $t$ : 時刻,  $x$ : 防護扉における外面からの距離,  $\alpha$ : 熱拡散率



第 5.2.1-3 図 防護扉の外面および内面温度

(5) 熱影響の有無の評価

評価の結果，軽油タンク火災による防護扉の最高温度は，扉外面 165.5℃，扉内面 161.9℃となった。

なお，建屋内の防火扉は，耐火試験を実施しており，IS0834 規格に従い，最終的に 1000℃を超える加熱に対して，3 時間の耐火性能<sup>\*</sup>があることを確認している。これに対し，防護扉は建屋内の防火扉よりも頑健性が有り，同等以上の耐火性能を有していることから熱影響はないと評価する。

※：非加熱面での 10 秒を超えて継続する火炎の噴出，発炎及び隙間を生じないこと。

5.2.2 6号炉非常用ディーゼル発電機 (C) 室の内気温度評価<待機時>

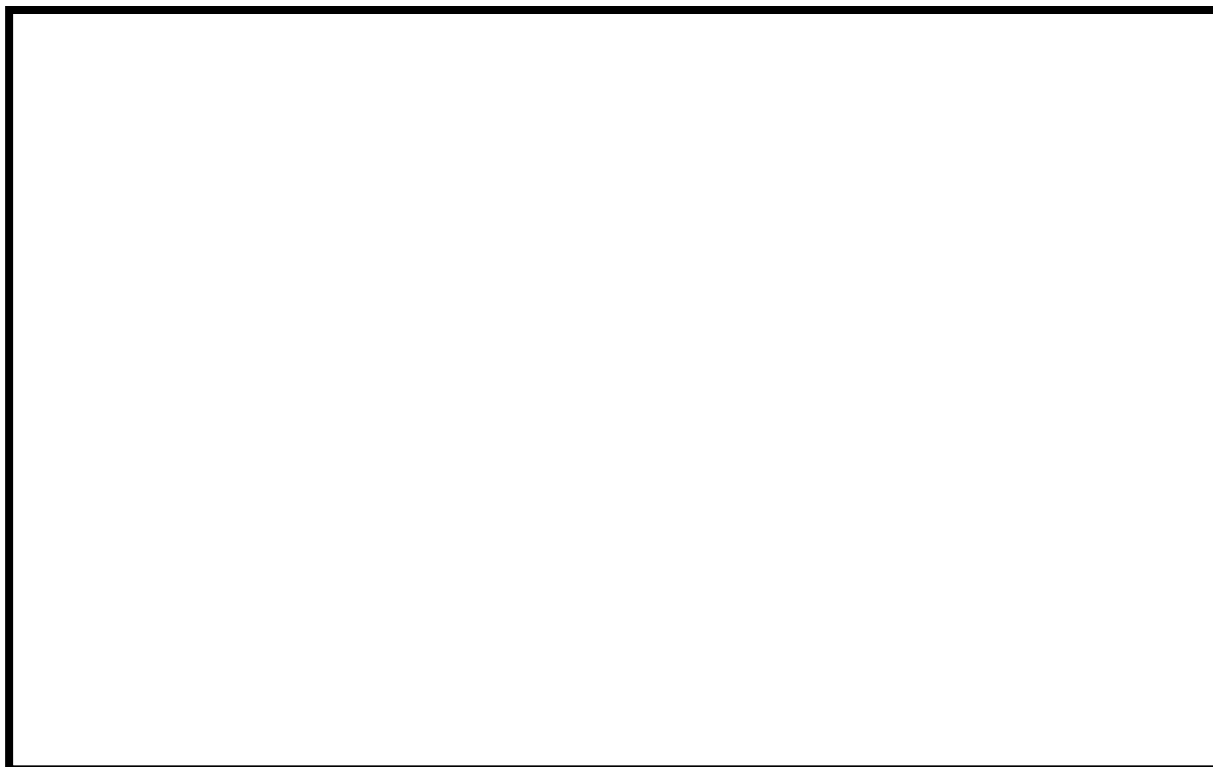
防護扉の内面温度上昇を確認したため，6号炉非常用ディーゼル発電機 (C) 室(以下，評価対象室という。)の内気温度を算出し，室内に設置している機器等への影響について評価する。なお，非常用ディーゼル発電機は待機状態とする。

(1) 評価条件

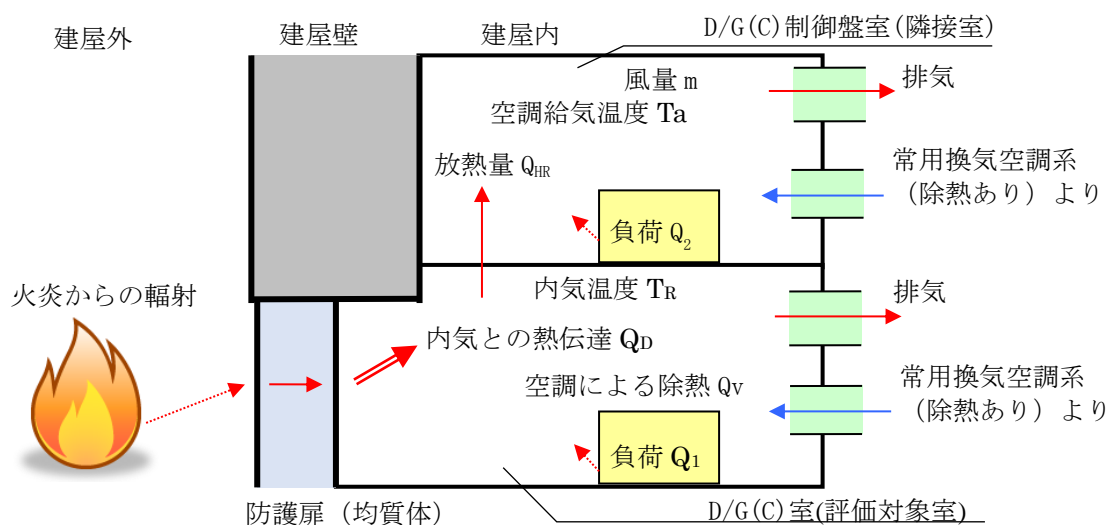
- ・ 火災が発生した時間から，燃料が燃え尽きるまでの間，扉内面温度 161.9℃一定としたときの放熱量を評価対象室への入熱とした。
- ・ より現実的な評価として，評価対象室に隣接する壁，床，天井への放熱を考慮した。
- ・ 隣接室については，隣接する壁，床，天井への放熱を考慮しないものとした。
- ・ 隣接室の内気温度評価は，評価対象室の放熱面積と隣接室の室内負荷が

最も大きい、評価対象室上階の非常用ディーゼル発電機(C)制御盤室を対象とすることで、他の隣接室内機器等への評価は包絡される。

以下に、6号炉非常用ディーゼル発電機(C)室と軽油タンクの位置関係、及び伝熱の概念図を示す。



第 5.2.2-1 図 6号炉非常用ディーゼル発電機(C)室と軽油タンクの位置関係



第 5.2.2-2 図 伝熱の概念図 (非常用ディーゼル発電機：待機時)

(2) 建屋内の温度評価

内気温度は、火災による防護扉内面温度上昇に伴う熱負荷と室内の熱負荷および周囲壁と空調による除熱を考慮し、次式で求める。

$$T'_R = T_R + \frac{Q_1 + Q_D - Q_v - Q_{HR}}{C_a} \cdot t$$

$T_R$ : 初期内気温度,  $Q_1$ : 室内負荷,  $Q_D$ : 防護扉内面温度上昇に伴う熱負荷 (内気との熱伝達),  $Q_v$ : 空調による除熱量,  $Q_{HR}$ : 隣接室への放熱量,  $C_a$ : 室内空気の熱容量,  $t$ : 時刻

隣接室の内気温度については、隣接室への放熱量と室内の熱負荷および空調による除熱を考慮し、次式より求める。

$$T_n = \frac{Q_2 + Q_{HR}}{m\rho C} + T_a$$

$Q_2$ : 室内負荷,  $m$ : 風量,  $\rho$ : 空気密度,  $C$ : 空気比熱,  $T_a$ : 空調給気温度

以下に評価結果を示す。

第 5.2.2-1 表 建屋内の温度評価結果 (待機時)

	6号炉非常用ディーゼル 発電機(C)室 (評価対象室)	6号炉非常用ディーゼル 発電機(C)制御盤室 (隣接室)
内気温度[°C]	36.3	32.3 <sup>※1</sup>
許容温度[°C]	45 <sup>※2</sup>	40 <sup>※3</sup>

※1: 評価対象室より室内負荷が小さく、初期内気温度は 28.5[°C]

※2: 室内の電気設備 (非常用ディーゼル発電機) の最高使用温度

※3: 室内の電気設備 (制御盤) の最高使用温度

評価の結果、6号炉非常用ディーゼル発電機(C)室は 36.3°C、隣接室(非常用ディーゼル発電機制御盤室)の室温は 32.3°Cとなり、それぞれ、許容温度を下回ることを確認した。

(3) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から、軽油タンク火災による防護扉の加熱を想定したとしても、建屋内の6号炉非常用ディーゼル発電機(C)室、及びその隣接室の内気温度が、共に許容温度を超えないことから、発電用原子炉施設の建屋内への熱影響はない。

なお、防護扉の他に外壁からの入熱もあるが、短期的には防護扉からの入熱が支配的であるため、この間の内気温度から室内への熱影響を評価できる (壁厚が厚い場合、外壁からの入熱は一時的に壁内に蓄えられ、一定時間経過後から長時間に亘って建屋内に放熱されるが、単位時間当たりの放熱量は小さく空調設備で

の除熱が可能)。

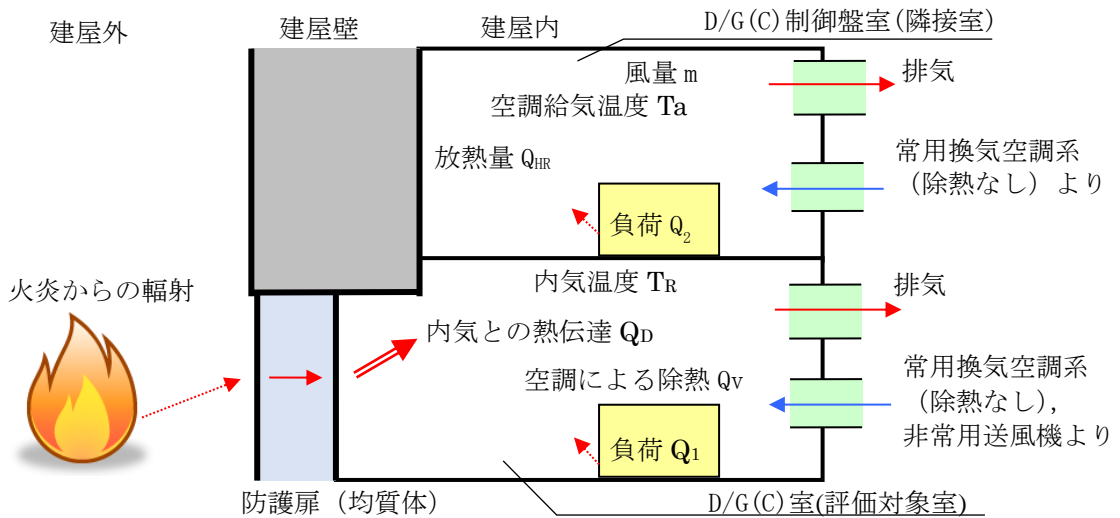
### 5.2.3 6号炉非常用ディーゼル発電機(C)室の内気温度評価<運転時>

6号炉非常用ディーゼル発電機(C)へ燃料を供給している軽油タンクの火災を想定しているため、ここでは、建屋内に設置されているディタンクからの燃料供給により、非常用ディーゼル発電機を運転している状態とし、その時の内気温度を算出、室内に設置している機器等への影響について評価する。

#### (1) 評価条件

- ・火災が発生した時間から、燃料が燃え尽きるまでの間、扉内面温度161.9℃一定としたときの放熱量を評価対象室への入熱とした。
- ・評価対象室から隣接室への熱影響を評価するため、評価対象室から壁、床、天井への放熱を考慮した。
- ・隣接室については、隣接する壁、床、天井への放熱を考慮しないものとした。
- ・隣接室の内気温度評価は、評価対象室の放熱面積と隣接室の室内負荷が最も大きい、評価対象室上階の非常用ディーゼル発電機(C)制御盤室を対象とすることで、他の隣接室内機器等への評価は包絡される。
- ・非常用ディーゼル発電機は、110%出力一定で運転しているものとした。
- ・隣接室内の負荷(電気品等)は非常用ディーゼル発電機の運転時のものとした。
- ・非常時を想定し、非常用送風機は運転状態とするが、常用換気空調系による給気の除熱には期待しないものとした(常用換気空調系の電源は非常用電源にも接続されており、送風機は非常時も運転可能)。

なお、伝熱の概念ならびに建屋内の温度評価手法は、2.6号炉非常用ディーゼル発電機(C)室の内気温度評価<待機時>と同様である。以下に、伝熱の概念図を示す。



第 5.2.3-1 図 伝熱の概念図（非常用ディーゼル発電機：運転時）

以下に評価結果を示す。

第 5.2.3-1 表 建屋内の温度評価結果（運転時）

	6 号炉非常用ディーゼル 発電機 (C) 室 (評価対象室)	6 号炉非常用ディーゼル 発電機 (C) 制御盤室 (隣接室)
内気温度 [°C]	44.6	39.7 <sup>※1</sup>
許容温度 [°C]	45 <sup>※2</sup>	40 <sup>※3</sup>

※1：常用換気空調系による給気の除熱がなく、非常用ディーゼル発電機の運転に伴い室内負荷も増加していることから、初期内気温度は 38.1 [°C] となる。

※2：室内の電気設備（非常用ディーゼル発電機）の最高使用温度

※3：室内の電気設備（制御盤）の最高使用温度

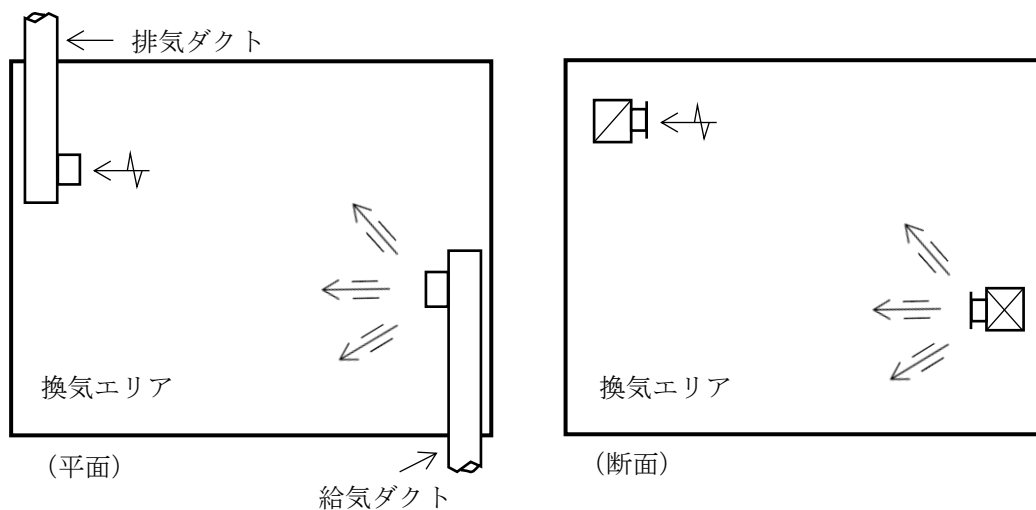
## (2) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から、軽油タンク火災による防護扉の加熱を想定したとしても、建屋内の 6 号炉非常用ディーゼル発電機 (C) 室、及びその隣接室の内気温度が、共に許容温度を超えないことから、発電用原子炉施設の建屋内への熱影響はない。

なお、内気温度については、(1) 評価条件に加え、各部の温度に設計値を用いる等、保守的な評価を行っていることから、実際の温度上昇は更に低く抑えられると評価する。

また、建屋内の給排気ダクトは、換気・冷却に有効な位置に設置し、シュートパスやホットスポットを生じないレイアウトとしていることから、室内の温度分布が不均一となることはない。以下に、給排気ダクトの配置例を示す。





第 5.2.3-2 図 給排気ダクトの配置例

### 5.3 ルーバの火災影響評価について

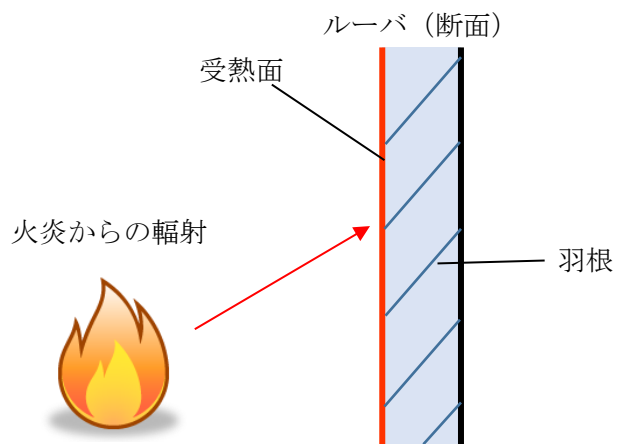
#### (1) 評価対象

ルーバのうち，6号炉主変圧器に最も近く，輻射強度が最も大きくなる6号炉非常用ディーゼル発電機(B)の排気ルーバを対象とする。

#### (2) 想定条件

- ・変圧器の火災については，添付資料－6「3.1 変圧器の火災影響評価について」と同様の想定とした。
- ・火災が発生してから燃え尽きるまでの間，一定の輻射強度でルーバが昇温されるものとした。

以下に，ルーバへの受熱面を示す。



第 5.3-1 図 ルーバの受熱面

(3) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 5.3-1 表 変圧器火災影響評価に必要なデータ

離隔距離[m]	16
燃焼半径[m]	6.91
形態係数[-]	0.2051198
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	4.717×10 <sup>3</sup>
燃焼継続時間[h]	10.15

(4) ルーバ温度と膨張量

変圧器の火災影響評価 (1) から (7) と同様の算出方法により輻射強度を求めた結果、ルーバが受ける輻射強度は 4.717kW/m<sup>2</sup> となり、この輻射強度にて一定でルーバが昇温されるものとして、下記の式より対象ルーバの温度および膨張量を算出した。

なお、ルーバの材質は、アルミニウム合金 (JIS:A6063) である。

$$h_{se} = h_r + h_{cv}$$

出典: JIS 9501 2006 保温保冷工事施工標準

$h_{se}$ : ルーバの熱伝達率,  $h_r$ : ルーバ表面の輻射熱伝達率,  $h_{cv}$ : ルーバ表面の対流熱伝達率

$$q = h_{se}(T - T_0) \text{ より}$$

$$T = \frac{q}{h_{se}} + T_0$$

出典: 伝熱工学資料

T: ルーバ温度,  $T_0$ : 周囲温度, q: 入熱量(輻射強度)

$$l = L + \alpha(T - T_0)$$

出典: 伝熱工学資料

l: ルーバ膨張量, L: ルーバ長さ(長辺方向),  $\alpha$ : 熱膨張率

ここで,  $h_{se}=15.6$  [W/m<sup>2</sup>K],  $h_r=9.48$  [W/m<sup>2</sup>K],  $T_0=50$  [°C],  $L=1500$  [mm],  $\alpha=2.8 \times 10^{-6}$  [1/K] とする。

以下に評価結果を示す。

第 5.3-2 表 ルーバの熱影響評価結果

ルーバ温度[°C]	168
ルーバ膨張量[mm]	5.4

(5) 火災による熱影響の有無の評価

ルーバ温度は 168°C となり，ルーバ長辺方向の熱膨張量はルーバ長さ 1500mm に対して，5.4mm となったことから，ルーバの形状が大きく変形することはない。

また，ルーバの変形の有無にかかわらず，安全上支障のない期間に点検を行い，ルーバの使用に問題があると判断される場合には，交換等の措置が可能である。

なお，ルーバ内側には熱影響を受ける機器等がなく，変圧器火災時は，熱気流を考慮し，給気温度を監視しつつ，状況に応じて空調の停止措置等を講じることから，建屋内への熱影響はない。

5.4 配管貫通部の火災影響評価について

発電用原子炉施設の脆弱箇所の一つである配管貫通部について，火災影響評価を実施する。

(1) 評価対象

配管貫通部のうち，6号炉主変圧器に最も近く，輻射強度が最も大きくなる 6号炉 R/B 南側外壁の外部注水接続配管を対象とする。

(2) 想定条件

主変圧器の火災については，添付資料-6「3.1 変圧器の火災影響評価について」と同様の想定とした。

(3) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。

第 5.4-1 表 変圧器火災影響評価に必要なデータ

離隔距離[m]	36.1
燃焼半径[m]	6.91
形態係数[-]	0.0548346
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	1.48×10 <sup>3</sup>
燃焼継続時間[h]	10.15

#### (4) 火災による熱影響の有無の評価

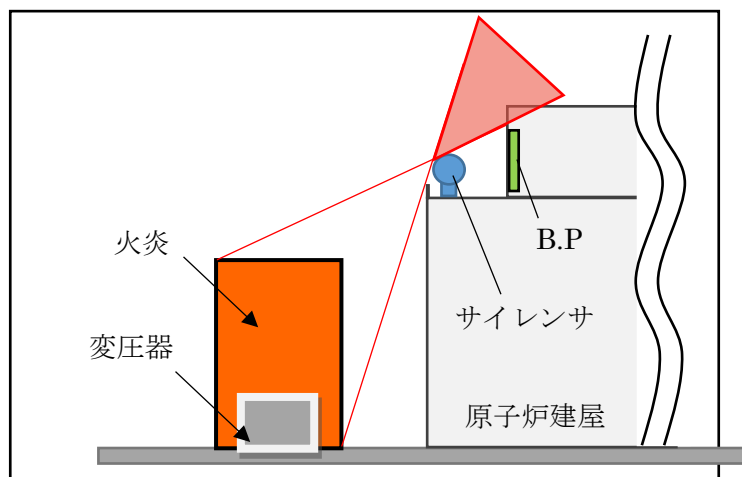
変圧器の火災影響評価 (1) から (7) と同様の算出方法により輻射強度を求めた結果、配管貫通部(屋外配管)に対して受ける輻射強度は  $1.48\text{kW/m}^2$  となり、人が長時間受け続けても影響がない、 $1.6\text{kW/m}^2$  を下回ることから、配管貫通部(屋内配管と内気含む)への熱影響はない。

#### 5.5 ブローアウトパネルの火災影響評価について

6, 7号炉のブローアウトパネル(以下、B.P という。)は、それぞれ原子炉建屋北側に3箇所、南側に1箇所設置されているが、北側B.Pについては、発熱源との配置より輻射熱が届くことはなく、南側B.Pについても、B.P前に設置している、非常用ディーゼル発電機のサイレンサ(排気口)により、輻射熱が届くことはない(第5.5-1図)。

なお、サイレンサは最高使用温度が500度以上であり、主変圧器からサイレンサまでの距離とほぼ等しい位置にある排気筒の温度評価( $132^\circ\text{C}$ )と同程度と考えられることから、熱影響はない。

また、航空機落下による火災を想定したとしても、サイレンサによって輻射が遮られる。仮に、輻射を受けたとしても  $0.5 \times 10^3\text{W/m}^2$  程度であり、輻射強度は人が長時間受け続けても痛みを感じることがないとされる  $1.6\text{kW/m}^2$  以下となり、サイレンサへの熱影響はない。



第5.5-1図 6号炉B.Pと主変圧器火炎との位置関係

## 6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器の耐震性評価結果

### 1. 評価範囲

6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器は油入変圧器であり、本体部のタンクと放熱器内に絶縁油が内包されており、地震によりタンク若しくは放熱器が損傷した場合、絶縁油が漏えいする可能性がある。

タンク若しくは放熱器が損傷するケースとしては以下の2ケースが考えられる。

(ケース1)

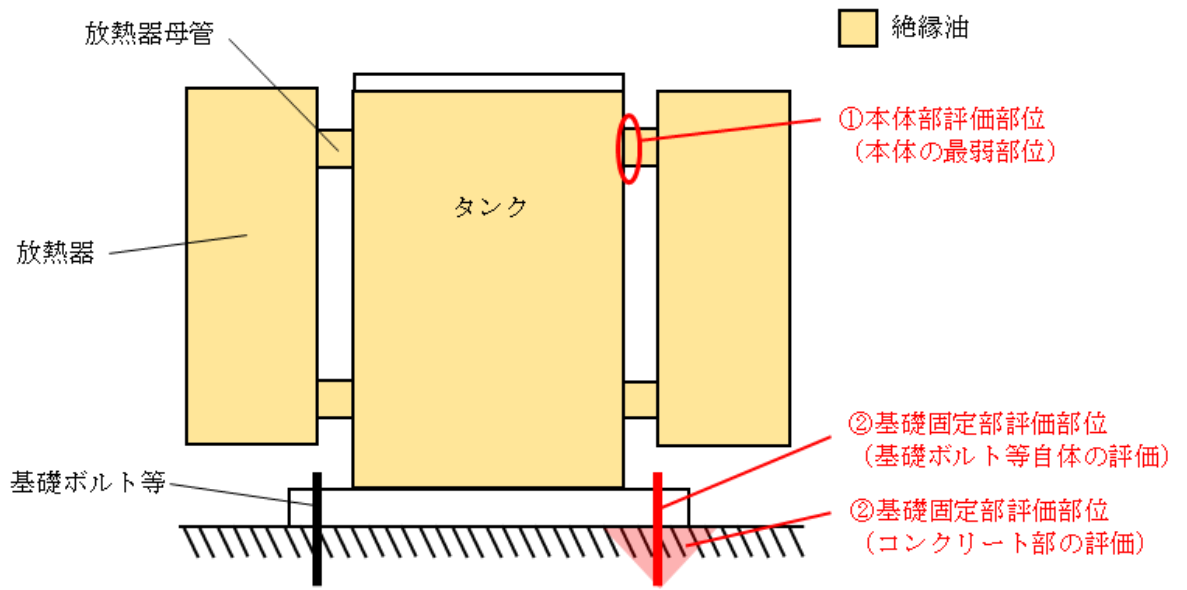
タンク若しくは放熱器自体が地震により損傷する。

(ケース2)

変圧器本体と基礎を固定している基礎ボルト等の基礎固定部が地震により破断し、変圧器が滑動、転倒することでタンク若しくは放熱器が損傷する。

ケース1については、過去の油入変圧器の地震や輸送の損傷実績の中で、タンクや放熱器自体の損傷実績はないものの、タンクと放熱器をつなぐ配管（以下放熱器母管という）根元部について輸送時にクラックが入った実績があることから、本体部の最弱部位として放熱器母管根元部を選定し、基準地震動  $S_s$  を入力とした耐震性評価を実施した。（評価部位は第1図の①の部位）

ケース2については、「変電所等における電気設備の耐震設計指針（JEAG5003-2010）」（以下 JEAG5003 という）において、「変圧器本体を基礎に固定する基礎ボルトが破断し本体が滑動しないよう、基礎ボルトの強度を十分に確保しうる施工上の注意が必要である」と示されており、地震力の大きさによっては基礎ボルト等の基礎固定部が破断する可能性があることから、基礎固定部について基準地震動  $S_s$  を入力とした耐震性評価を実施した。（評価部位は第1図の②の部位）



第1図 変圧器評価の概念図

## 2. 評価内容

### (1) 変圧器本体部の耐震性評価方法（ケース 1）

6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器の放熱器母管の根元部については、基準地震動  $S_s$  を入力として、放熱器母管の根元に発生する曲げ応力が許容応力以下であることを確認する。

### (2) 変圧器基礎固定部の耐震性評価方法（ケース 2）

6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器の基礎固定部について、基準地震動  $S_s$  を入力とした以下の耐震性評価を実施する。

#### a. 基礎固定部が損傷しないことの確認（※1）（※2）

基礎固定部に発生する引張応力とせん断応力が許容応力以下であることを確認する。

#### b. 基礎固定部が基礎から引き抜けないことの確認（※1）

基礎固定部に発生する引張とせん断の組合せ荷重が以下に示すコンクリート部の引張荷重及びせん断荷重の組合せに対する許容値以下となることを確認する。

$$\left(\frac{p}{pa}\right)^2 + \left(\frac{q}{qa}\right)^2 \leq 1 \quad \dots \dots \dots (1)$$

p : 基礎ボルト 1 本当たりの引張荷重

pa : 基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容引張荷重

q : 基礎ボルト 1 本当たりのせん断荷重

qa : 基礎ボルト 1 本当たりのコンクリート部の許容せん断荷重

※1 : 「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601 - 2008）」に準拠

※2 : 「変電所等における電気設備の耐震設計指針（JEAG5003-2010）」に準拠

### 3. 評価結果

#### (1) 変圧器本体部の耐震性評価結果（ケース1）

6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器本体部の耐震性評価の結果は表1の通りであり、全ての変圧器について発生応力が許容応力以下であることを確認した。

第1表 6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器本体部の耐震性評価結果

号炉	設備名	評価部位	評価項目	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度 (※)
6号炉	RIP-ASD入力変圧器 (A-1), (B-1)	放熱器母管根元部	曲げ	134	279	2.08
	RIP-ASD入力変圧器 (A-2), (B-2)	放熱器母管根元部	曲げ	148	279	1.88
7号炉	RIP-ASD入力変圧器 (A-1), (B-1)	放熱器母管根元部	曲げ	119	279	2.34
	RIP-ASD入力変圧器 (A-2), (B-2)	放熱器母管根元部	曲げ	40	279	6.97

※：裕度は評価部位の発生応力とその部位の許容応力の比率であり、1以上を裕度有りとする。

#### (2) 変圧器基礎固定部の耐震性評価結果（ケース2）

6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器基礎固定部の耐震性評価の結果は表2、表3の通りであり、全ての変圧器について発生応力が許容応力以下であることを確認した。

第2表 6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器基礎固定部の耐震性評価結果

号炉	設備名	評価部位	評価項目	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度 (※)
6号炉	RIP-ASD入力変圧器 (A-1), (B-1)	基礎固定部 (基礎ボルト)	引張	127	202	1.59
			せん断	57	160	2.80
	RIP-ASD入力変圧器 (A-2), (B-2)	基礎固定部 (基礎ボルト)	引張	126	191	1.51
			せん断	64	160	2.50
7号炉	RIP-ASD入力変圧器 (A-1), (B-1)	基礎固定部 (溶接)	引張とせん断の組合せ	154	160	1.03
	RIP-ASD入力変圧器 (A-2), (B-2)	基礎固定部 (溶接)	引張とせん断の組合せ	83	160	1.92

※：裕度は評価部位の発生応力とその部位の許容応力の比率であり、1以上を裕度有りとする。



第3表 6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器基礎コンクリート部の耐震性評価結果

号炉	設備名	評価部位	評価項目	発生応力 (※2)	許容応力 (※2)	裕度 (※1)
6号炉	RIP-ASD入力変圧器 (A-1), (B-1)	基礎コンクリート部	引張とせん断の 組合せ	0.116	1	8.62
	RIP-ASD入力変圧器 (A-2), (B-2)	基礎コンクリート部	引張とせん断の 組合せ	0.243	1	4.13
7号炉	RIP-ASD入力変圧器 (A-1), (B-1)	基礎コンクリート部	引張とせん断の 組合せ	0.263	1	3.80
	RIP-ASD入力変圧器 (A-2), (B-2)	基礎コンクリート部	引張とせん断の 組合せ	0.133	1	7.51

※1：裕度は評価部位の発生応力とその部位の許容応力の比率であり、1以上を裕度有りとする。

※2：(1) 式の左辺を発生値，右辺を許容値とする。

#### 4. 結論

6号及び7号 RIP-ASD 入力変圧器においては、各評価部位について発生応力が許容応力以下であることが確認されたことから、基準地震動  $S_s$  での地震時においても変圧器は損傷すること無く、変圧器内の絶縁油は漏えいしないことが確認された。

以上

## 変圧器の防火対策について

### 1. 変圧器の防火対策

- ・ 変圧器には、内部圧力の上昇、または電気回路の異常を検知すると、瞬時に電源を自動的に切る保護機能が備わっている。
- ・ 金属筐体に覆われており火災が発生する可能性は低い。
- ・ 万一油が漏えいした場合においても、地下の防災地下タンクに溜まる構造となっている（第 1 図）。

### 2. 中越沖地震による 3 号炉所内変圧器火災の事象

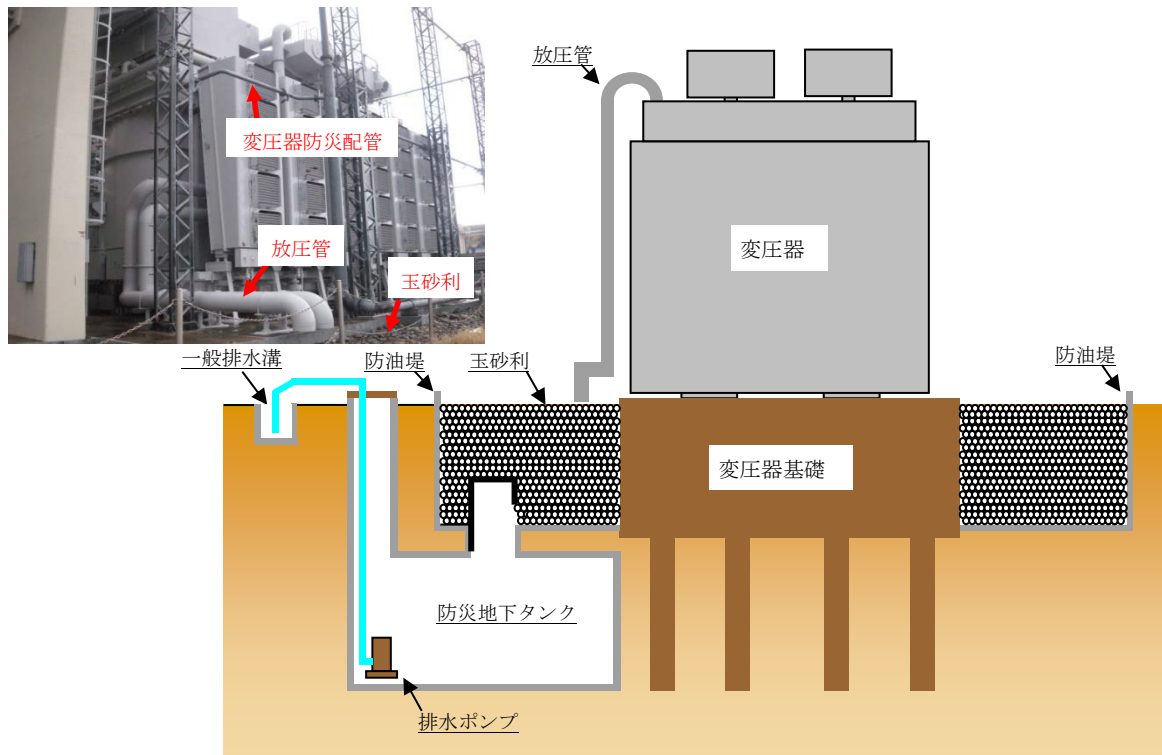
- ・ 二次側接続母線部ダクトの基礎が沈下し、変圧器との相対変位が発生。
- ・ ブッシング部破損による漏油と、地絡・短絡によるアークの発生により火災発生。
- ・ 屋外消火設備の損傷により消火活動に支障をきたしたが、当該変圧器横に設置されている防火壁により、隣接する所内変圧器 3 A や他設備に延焼することはなかった。

### 3. 中越沖地震による 3 号炉所内変圧器火災の対策

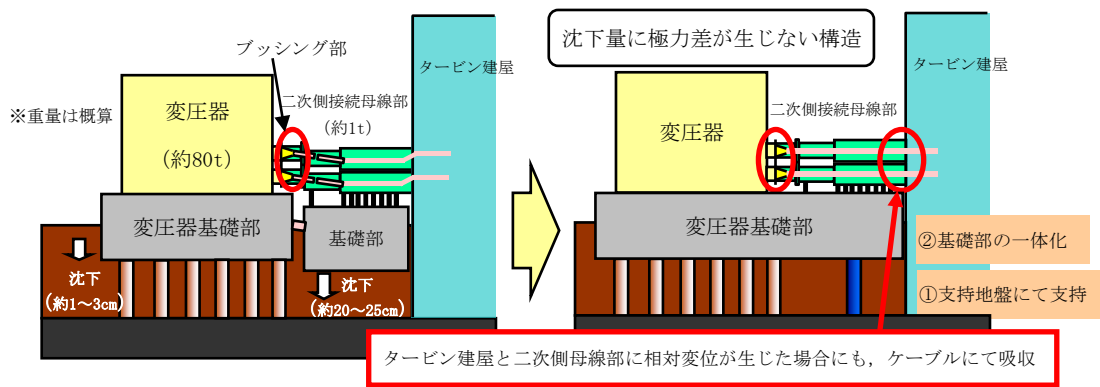
- (1) 下記の基礎構造変更により、変圧器と二次側接続母線部ダクトの基礎で沈下量の差が発生することを防止（第 2 図，第 3 図）
  - a. 二次側接続母線部ダクトの基礎をタービン建屋と同じ支持地盤にて支持
  - b. 変圧器と二次側接続母線部ダクトの基礎部を一体化、または、二次側接続母線部ダクトの基礎構造を杭基礎構造へ変更

なお、6 号炉は、建設時より一体化された基礎を人工岩盤にて直接支持する構造となっている。

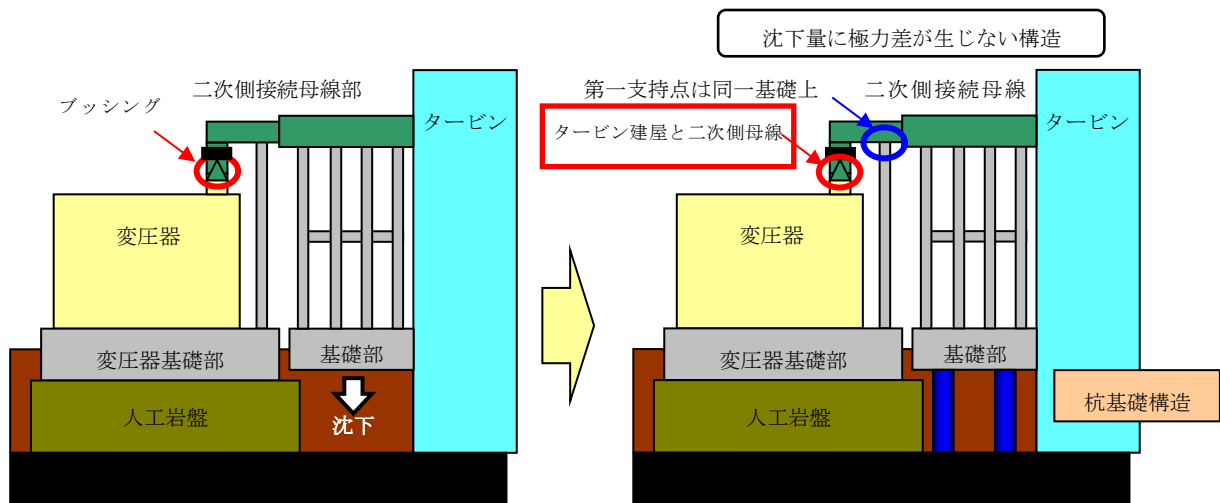
- (2) 屋外埋設消火配管の地上化（第 4 図）



第1図 変圧器地下構造（防油堤および防災地下タンク）



第2図 変圧器火災の対策（3号炉所内変圧器）



第3図 変圧器火災の対策（7号炉所内変圧器）



埋設消火配管の損傷



消火配管の地上化

第4図 消火配管の地上化

原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災について

1. はじめに

本評価は、発電所敷地への航空機の墜落で発生する火災に対してより一層の安全性向上の観点から、その火災が起こったとしても発電用原子炉施設に影響を及ぼさないことを評価するものである。

2. 航空機墜落の火災影響評価

航空機落下確率評価では、評価手法及び対象航空機の大きさの違いを考慮して落下確率を求めている。対象航空機の燃料積載量に火災の影響は大きく依存することから、別紙7-1に示すとおり、大型航空機と小型航空機に分類し、また、民間航空機と自衛隊航空機又は米軍航空機（以下、軍用航空機とする）に分類し以下のカテゴリ毎に火災影響評価を実施する。

第2-1表 航空機の分類

落下事故カテゴリ		分類
(1) 計器飛行方式民間航空機	1) 飛行場での離着陸時	—注1
	2) 航空路を巡航中	(1) 大型民間航空機
(2) 有視界飛行方式民間航空機		
(3) 自衛隊機又は米軍機	1) 訓練空域外を飛行中	(3) 大型軍用航空機
	2) 基地—訓練空域間往復時	(4) 小型軍用航空機
		—注2

注1：発電所は、新潟空港からの最大離着陸地点以遠に位置するため対象外（別紙7-3）

注2：発電所は基地—訓練空域間の往復の想定範囲内に入らないため対象外

(1) 航空機墜落の火災の想定

- ・航空機は、当該発電所における航空機墜落評価の対象航空機のうち燃料積載量が最大の機種とした。
- ・航空機は燃料を満載した状態を想定した。
- ・航空機の墜落は発電所敷地内であって落下確率が $10^{-7}$  [回/炉・年] 以上になる範囲のうち発電用原子炉施設への影響が最も厳しくなる地点で起こることを想定した。
- ・航空機の墜落によって燃料に着火し火災が起こることを想定した。
- ・気象条件は無風状態とした。
- ・火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の3倍とした。

第 2-2 表 燃料積載量が最大の機種

分類	航空機	選定理由
大型民間航空機 (固定翼, 回転翼)	B747-400	民間の大型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定
小型民間航空機 (固定翼, 回転翼)	Do228-200	民間の小型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定
大型軍用航空機 (固定翼, 回転翼)	KC-767 (空中給油機)	主要自衛隊航空機(添付資料 7-2)の大型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定
小型軍用航空機 (固定翼, 回転翼)	AH-1S (対戦車機)	主要自衛隊航空機(添付資料 7-2)の小型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定

(2) 評価手法の概要

本評価は、発電所に対する航空機墜落の火災影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

第 2-3 表 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	火災の炎から任意の位置にある点(受熱点)の輻射強度
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	航空機燃料タンクの投影面積より求めた燃焼半径
燃焼継続時間[s]	火災が終了するまでの時間
離隔距離[m]	発電用原子炉施設を中心にして落下確率が10 <sup>-7</sup> [回/炉・年]以上になる地点とその地点から発電用原子炉施設までの直線距離
熱許容限界値[-]	建屋の外壁, 天井スラブが想定火災の熱影響に対して許容限界以下になる値

上記の評価指標は、受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。油の液面火災では、火炎面積の半径が3mを超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うために、火災規模による輻射発散度の低減が無いものとする。

輻射熱に対する建物の危険輻射強度を調査し、輻射強度がその建物の危険輻射強度以下になるように発電用原子炉施設は危険距離(離隔距離)を確保するものとする。

(3) 評価対象範囲

評価対象範囲は、発電所敷地内であって落下確率が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]以上にな

る範囲のうち発電用原子炉施設への影響が最も厳しくなる区域とすることから、柏崎刈羽原子力発電所における航空機落下確率評価の対象航空機のうち、大型民間航空機、小型民間航空機、大型軍用航空機、小型軍用航空機を対象とし、それぞれの機種別の落下確率の合計が $10^{-7}$  [回/炉・年]となる標的面積を算出し、その結果から発電用原子炉施設からの離隔距離を以下のとおり算出した。

(4) 標的面積の算出

a. 大型民間航空機および小型民間航空機の標的面積の算出

(a) 計器飛行方式民間航空機の航空路を巡航中の落下事故

$$P_c = f_c \cdot N_c \cdot A / W$$

$P_c$  : 対象施設への巡航中の航空機落下確率[回/年]

$N_c$  : 評価対象とする航空路等の年間飛行回数[飛行回/年]

$A$  : 発電用原子炉施設の標的面積[km<sup>2</sup>]

$W$  : 航空路幅[km]

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

$G_c$  : 巡航中事故件数[回]

$H_c$  : 延べ飛行距離[飛行回・km]

第2-4表 標的面積の算出結果

パラメータ	柏崎刈羽原子力発電所6, 7号炉			
対象航空路 <sup>注1</sup>	航空路 (V31)	転移経路 (NAEBA TRANSITION)	RNAV5 (Y31)	RNAV5 (Y305)
$N_c$ <sup>注2</sup>	14600	4015	3650	182.5
$A$ <sup>注3</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01
$W$ <sup>注4</sup>	14	14	18.52	18.52
$F_c$ <sup>注5</sup>	$0.5/9,439,243,077 = 5.29 \times 10^{-11}$			
$P_c$	$5.52 \times 10^{-10}$	$1.51 \times 10^{-10}$	$1.04 \times 10^{-10}$	$5.21 \times 10^{-12}$
$P_c$ (合計)	$8.13 \times 10^{-10}$			

注1 : 柏崎刈羽原子力発電所周辺の航空図 (AIPエンルートチャート) による。(別紙7-4)

注2 : 国土交通省航空局への問合せ結果 (ピークデイの値) を365倍した値。ただし、平成24年のピークデイにおける飛行回数が0回の場合は、保守的に0.5回とみなし、年間182.5回とした。(別紙7-5)

注3 : 原子炉建屋、コントロール建屋等の水平面積の合計値は0.01km<sup>2</sup>以下であるので標的面積は0.01km<sup>2</sup>とする。(別紙7-6)



注4：「航空路の指定に関する告示」及び「航空路等設定基準」による。

注5：巡航中事故件数は、平成3年～平成22年の間で0件のため、保守的に0.5件とした。延べ飛行距離は、平成4年～平成23年の「航空輸送統計年報、第1表 総括表、1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内の値を合計した値。  
(別紙7-7)

(b) 有視界飛行方式民間航空機の落下事故

$$P_v = (f_v/S_v) \cdot A \cdot \alpha$$

$P_v$ ：対象施設への航空機落下確率[回/年]

$f_v$ ：単位年当たりの落下事故率[回/年]

$S_v$ ：全国土面積[km<sup>2</sup>]

$A$ ：発電用原子炉施設の標的面積[km<sup>2</sup>]

$\alpha$ ：対象航空機の種類による係数

第2-5表 落下確率の算出結果

パラメータ	大型固定翼機	大型回転翼機	小型固定翼機	小型回転翼機
$f_v$ 注	0.5/20=0.025	2/20=0.10	35/20=1.75	30/20=1.50
$S_v$ 注	372,000			
$\alpha$ 注	1.0	1.0	0.1	0.1
$A$	0.01	0.01	0.01	0.01
$P_v$	$6.72 \times 10^{-10}$	$2.68 \times 10^{-9}$	$4.70 \times 10^{-9}$	$4.03 \times 10^{-9}$
$P_v$ (合計)	$1.20 \times 10^{-8}$			

注：「平成23年度 航空機墜落事故に関するデータの整備」（平成24年9月 独立行政法人 原子力安全基盤機構）による。

以上より、

大型民間航空機の落下確率 ( $P_c$  (計器飛行方式) +  $P_v$  (大型固定翼機) +  $P_v$  (大型回転翼機)) が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積 $A_1$ [km<sup>2</sup>]を計算すると以下の通りとなる。

$$A_1 = 10^{-7} \div (8.14 \times 10^{-10} + 6.72 \times 10^{-10} + 2.69 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.239 [\text{km}^2]$$

小型民間航空機の落下確率 ( $P_v$  (小型固定翼機) +  $P_v$  (小型回転翼機)) が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積 $A_2$ [km<sup>2</sup>]を計算すると以下の通りとなる。

$$A_2 = 10^{-7} \div (4.70 \times 10^{-9} + 4.03 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.114 [\text{km}^2]$$

b. 大型軍用航空機および小型軍用航空機の標的面積の算出

柏崎刈羽原子力発電所の上空には訓練空域がないため、軍用航空機の落下確

率Psoを求める式は、以下の通りとなる。

$$P_{so} = (f_{so} / S_o) \cdot A$$

Pso : 訓練空域外での対象施設への航空機落下確率[回/年]

fso : 単位年当たりの訓練空域外落下事故率[回/年]

So : 全国土面積から全国の陸上の訓練空域の面積を除いた面積[km<sup>2</sup>]

A : 発電用原子炉施設の標的面積[km<sup>2</sup>]

第2-6表 落下確率の算出結果

パラメータ	大型自衛隊機	大型米軍機	小型自衛隊機	小型米軍機
fso <sup>注</sup>	2/20=0.1	4/20=0.2	6/20=0.3	1/20=0.05
So <sup>注</sup>	295,000	372,000	295,000	372,000
A	0.01	0.01	0.01	0.01
Pso	$3.38 \times 10^{-9}$	$5.37 \times 10^{-9}$	$1.01 \times 10^{-8}$	$1.34 \times 10^{-9}$
Pso (合計)	$2.02 \times 10^{-8}$			

注：「平成23年度 航空機墜落事故に関するデータの整備」（平成24年9月 独立行政法人 原子力安全基盤機構）による。

以上より、

大型軍用航空機の落下確率(Pso(大型自衛隊機)+Pso(大型米軍機))が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積A3[km<sup>2</sup>]を計算すると以下の通りとなる。

$$A3 = 10^{-7} \div (3.39 \times 10^{-9} + 5.38 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.114 [\text{km}^2]$$

小型軍用航空機の落下確率(Pso(小型自衛隊機)+Pso(小型米軍機))が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積A4[km<sup>2</sup>]を計算すると以下の通りとなる。

$$A4 = 10^{-7} \div (1.02 \times 10^{-8} + 1.34 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.086 [\text{km}^2]$$

(5) 発電用原子炉施設からの離隔距離の算出

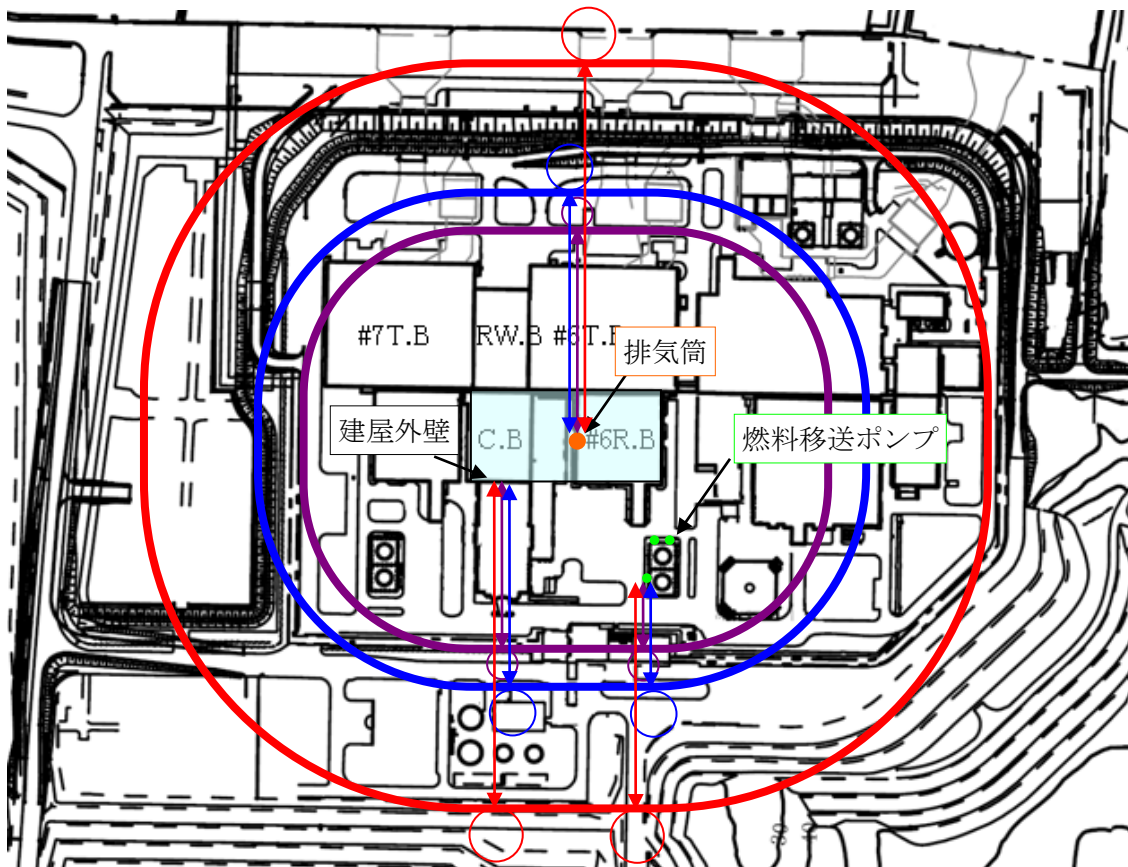
(4)で求めた面積が、評価対象となる発電用原子炉施設(原子炉建屋およびコントロール建屋)外壁面から等距離の離隔をとった場合の標的面積と等しくなる距離を離隔距離L[m]とし、離隔距離Lを算出した結果を以下に示す。また、各航空機の離隔距離を第2-1図、第2-2図に示す。

第2-7表 発電用原子炉施設からの離隔距離の算出結果

項目	大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
対象航空機	B747-400	Do228-200	KC-767	AH-1S

6号炉	外壁面	218	134	133	109
7号炉	までの離隔距離[m]	225	140	140	116
6号炉	燃料移送ポンプ (防護板(鋼板))	158	74	73	49
7号炉	までの離隔距離[m]	166	82	81	57
6号炉	排気筒	239	155	155	131
7号炉	までの離隔距離[m]	225	140	140	116

※：軽油タンクの熱影響評価は、航空機墜落による軽油タンク火災の重畳火災も考慮し、航空機墜落位置より内側にある軽油タンクの発火の有無について評価を実施する。評価結果は(12)に示す。



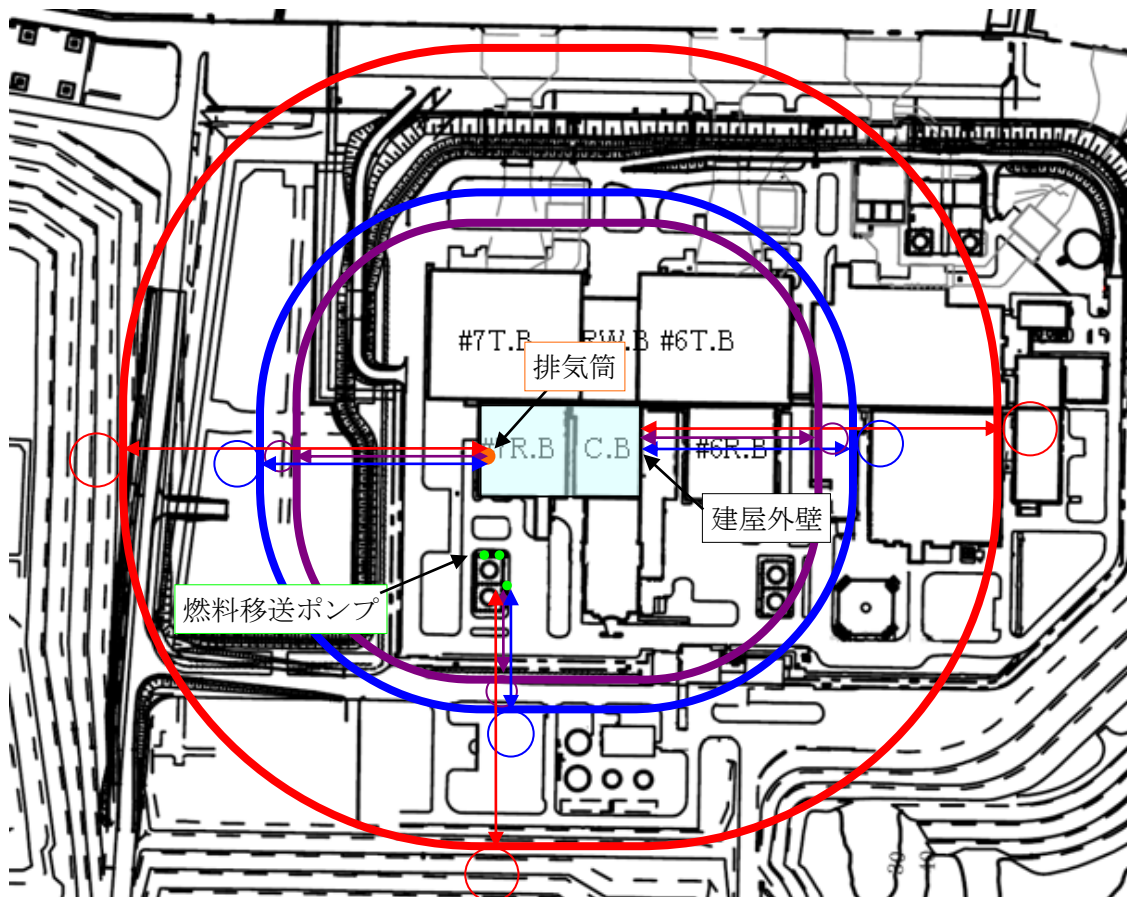
○：航空機墜落位置（円筒火炎モデル）

大型民間航空機墜落位置

小型民間航空機墜落位置  
大型軍用航空機墜落位置

小型軍用航空機墜落位置

第2-1図 各航空機の墜落位置（6号炉）



○：航空機墜落位置（円筒火炎モデル）

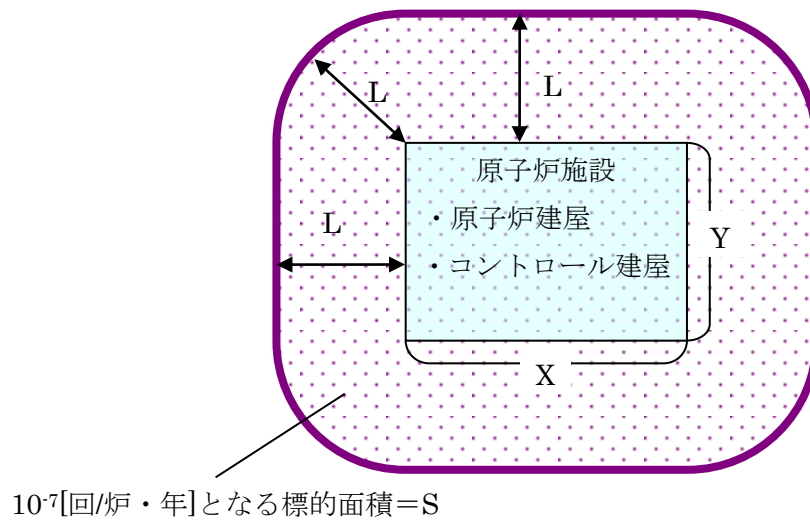
大型民間航空機墜落位置

小型民間航空機墜落位置  
大型軍用航空機墜落位置

小型軍用航空機墜落位置

第2-2図 各航空機の墜落位置（7号炉）

$10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積の考え方は、以下の通り。



第2-3図 標的面積の考え方

発電用原子炉施設（原子炉建屋およびコントロール建屋）外壁面から等距離の離隔をとり、 $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積をSとした場合、以下の式が成り立つ。

$$S = XY + 2LX + 2LY + \pi L^2 / 4 \times 4$$

$$\pi L^2 + 2(X+Y)L + XY - S = 0$$

二次方程式の解の公式より、以下の式となる。

$$L = \frac{-(X+Y) + \sqrt{(X+Y)^2 - \pi(XY - S)}}{\pi}$$

(6) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。なお、温度評価においては、離隔距離が短い方が評価が厳しくなることから、6号炉の外壁面、6号炉燃料移送ポンプ、7号炉排気筒の温度評価を実施する。また、下表に示すとおり、小型民間航空機は大型軍用航空機と比べ輻射発散度が小さく、燃料タンク面積も小さく、離隔距離も離れていることから大型軍用航空機の評価に包絡される。

第2-8表 航空機火災影響評価に必要なデータ

項目	大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
想定する航空機	B747-400	Do228-200	KC-767	AH-1S
燃料の種類	Jet A-1	Jet A-1	JP-4	JP-4
燃料量[m <sup>3</sup> ]	216.84	2.386	145.033	0.98
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	50	50	58	58
燃焼速度[m/s]	6.666×10 <sup>-5</sup>	6.666×10 <sup>-5</sup>	6.710×10 <sup>-5</sup>	6.710×10 <sup>-5</sup>
燃料タンク面積[m <sup>2</sup> ]	606	26	281	12
6号炉外壁面までの離隔距離[m]	218	134	133	109
6号炉燃料移送ポンプまでの離隔距離[m]	158	74	73	49
7号炉排気筒までの離隔距離[m]	226	141	141	117

※出典については、参考資料7-1参照

(7) 燃焼半径の算出

航空機墜落による火災においては墜落の状況によって、様々な燃焼範囲の形態が想定されるが、円筒火炎モデルとして評価を実施するため、燃焼半径は対象とした航空機燃料タンクの投影面積を円筒の底面と仮定して以下のとおり算出した。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

R：燃焼半径[m]，S：燃料タンク投影面積（火炎円筒の底面積）

第2-9表 燃焼半径の算出結果

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
想定する航空機	B747-400	KC-767	AH-1S
燃料タンク面積[m <sup>2</sup> ]	606	281	12
燃焼半径[m]	13.8	9.45	1.95

(8) 形態係数の算出

次の式から形態係数を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、

$$m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$$

$\phi$  : 形態係数, L : 離隔距離[m], H : 火炎高さ[m], R : 燃焼半径[m]

第 2-10 表 形態係数の算出結果

項目		大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
燃焼半径 [m]		13.8	9.45	1.95
6 号炉外壁 面	離隔距離 [m]	218	133	109
	形態係数	0.0070295	0.0086371	0.0005997
6 号炉燃料 移送ポンプ (防護板 (鋼板))	離隔距離 [m]	158	73	49
	形態係数	0.0127068	0.0249018	0.0027727
7 号炉排気 筒	離隔距離 [m]	226	141	117
	形態係数	0.0065677	0.0077434	0.0005214

(9) 輻射強度の算出

火災の火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E : 輻射強度, R<sub>f</sub> : 輻射発散度,  $\phi$  : 形態係数

第 2-11 表 輻射強度の算出結果

項目		大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射発散度 [kW/m <sup>2</sup> ]		50	58	58
6 号炉外壁 面	形態係数	0.0070295	0.0086371	0.0005997
	輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	351.47	500.95	34.78
6 号炉燃料 移送ポンプ (防護板 (鋼板))	形態係数	0.0127068	0.0249018	0.0027727
	輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	635.34	1444.30	160.82

7号炉排気筒	形態係数	0.0065677	0.0077434	0.0005214
	輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	328.38	449.11	30.24

(10) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho} \quad \text{より}, \quad t = \frac{V \times \rho}{\pi R^2 \times M}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料積載量[m<sup>3</sup>], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]  
M : 質量低下速度[kg/m<sup>2</sup>・s], ρ : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

第2-12表 燃焼継続時間の算出結果

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
燃料量[m <sup>3</sup> ]	216.84	145.032	0.98
燃料面積 π R <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	606	281	12
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s]	0.054	0.051	0.051
燃料密度[kg/m <sup>3</sup> ]	810	760	760
燃焼速度[m/s]	6.667 × 10 <sup>-5</sup>	6.711 × 10 <sup>-5</sup>	6.711 × 10 <sup>-5</sup>
燃焼継続時間[hour]	1.49	2.13	0.33

※出典については、添付資料7-8参照

(11) 評価結果

a. 建屋外壁の耐火性能評価

(a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）については、一般的にコンクリートの強度に影響がないとされる200度\*とする。

※原田和典，建築火災のメカニズムと火災安全設計，財団法人 日本建築センター

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容限界温度以下であるか評価を実施した。

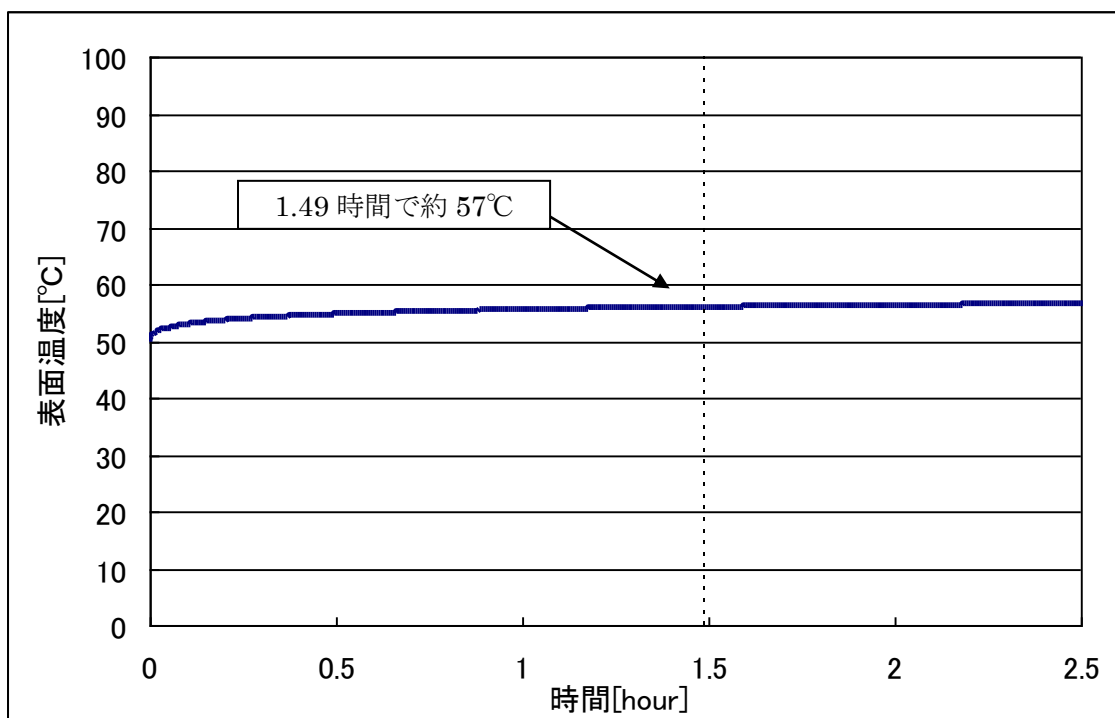
$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right) \frac{h}{\varepsilon E}}$$



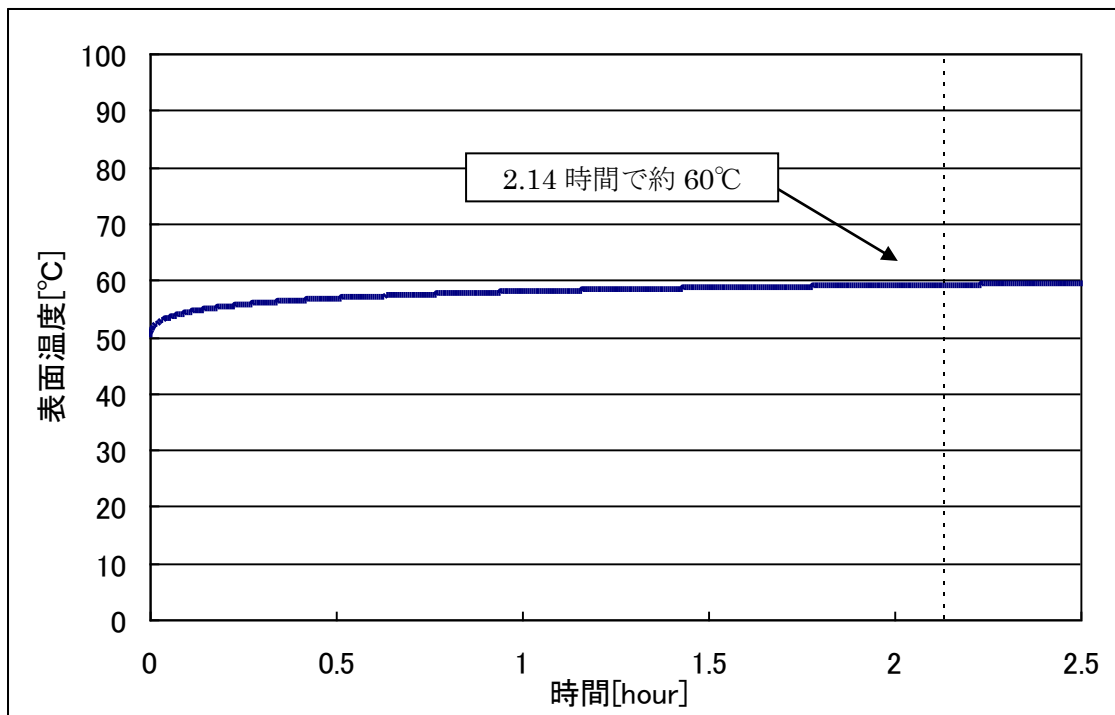
出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター  
 $T_0$ ：初期温度[50℃]， $E$ ：輻射強度[W/m<sup>2</sup>]， $\epsilon$ ：コンクリート表面の放射率(0.95)※， $h$ ：コンクリート表面熱伝達率[34.9W/m<sup>2</sup>K]※， $k$ ：コンクリート熱伝導率[1.6W/mK]※， $\rho$ ：コンクリート密度[2200kg/m<sup>3</sup>]※， $c$ ：コンクリート比熱[879J/kgK]※， $t$ ：燃焼継続時間[s]  
 ※：建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

第 2-13 表 外壁面の温度評価結果

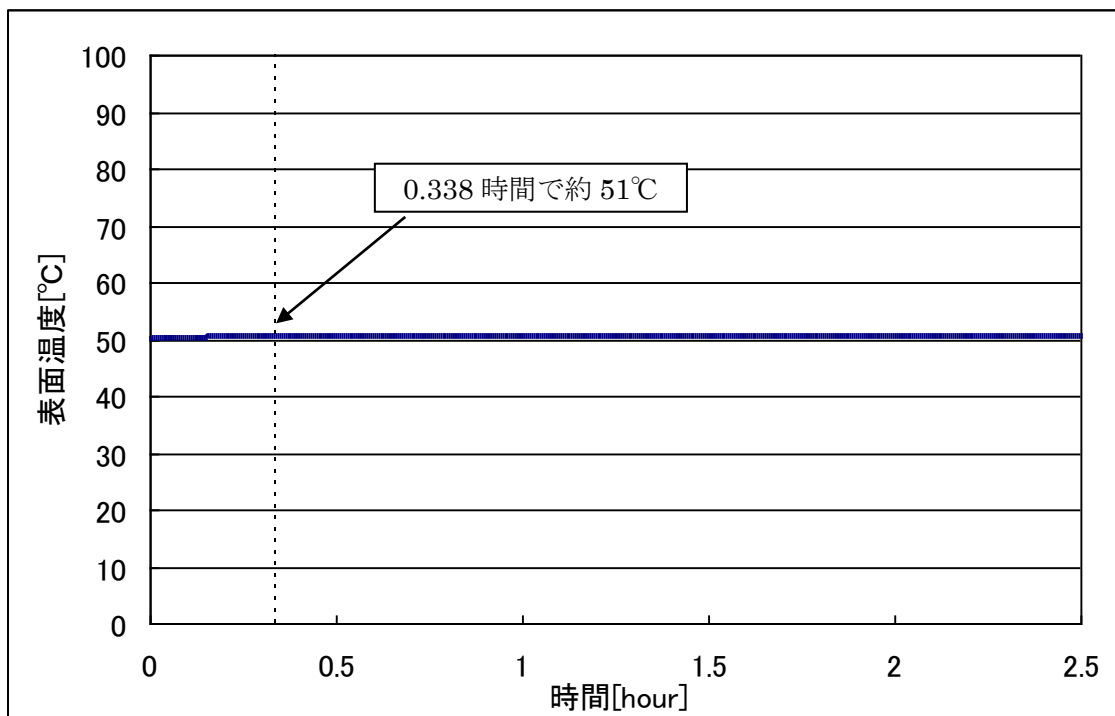
6号炉外壁面			
項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	351.47	500.95	34.78
燃焼継続時間[hour]	1.49	2.14	0.33
表面温度[℃]	57	60	51



第 2-4 図 外壁面温度推移 (大型民間航空機)



第 2-5 図 外壁面温度推移 (大型軍用航空機)



第 2-6 図 外壁面温度推移 (小型軍用航空機)

b. 燃料移送ポンプの温度評価

(a) 許容限界値（許容限界温度）

燃料移送ポンプの許容限界値（許容限界温度）が端子ボックスパッキンの耐熱温度100℃であることを踏まえ、燃料移送ポンプの周囲に設置されている防護板（鋼板）の許容温度を当該ポンプの許容限界温度と同様の100℃とする。

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で燃料移送ポンプの防護板（鋼板）が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より防護板（鋼板）の最大温度を求め、防護板（鋼板）の温度が許容温度以下であるか評価を実施した。

$$T = \frac{\epsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - \left( \frac{\epsilon ES_1 + hS_2 T_{air}}{hS_2} - T_0 \right) e^{\left( -\frac{hS_2}{c} \right) t}$$

$T_0$ ：初期温度[55℃]， $E$ ：輻射強度[W/m<sup>2</sup>]， $\epsilon$ ：防護板（鋼板）外面の放射率（0.9）※<sup>1</sup>， $h$ ：防護板（鋼板）表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>， $S$ ：防護板（鋼板）放熱面積[32.4m<sup>2</sup>]（ $S/2$ ：受熱面積は外面のみ）， $C$ ：防護板（鋼板）の熱容量[2.41×10<sup>6</sup>J/K]， $t$ ：燃焼継続時間[s]， $T_{air}$ ：外気温度[55℃]

※1：伝熱工学資料，※2：空気調和・衛生工学便覧

防護板（鋼板）の温度は最高でも87℃（燃料移送ポンプの許容限界温度以下）であることから、防護板（鋼板）の内側に設置されている燃料移送ポンプに対して熱影響はない。

第2-14表 燃料移送ポンプ（防護板（鋼板））の温度評価結果

6号炉燃料移送ポンプ			
項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	635.34	1444.30	160.82
燃焼継続時間[hour]	1.49	2.13	0.33
防護板（鋼板）温度[℃]	67	87	56

c. 排気筒の温度評価

(a) 許容限界値（許容限界温度）

本評価で用いる許容限界値（許容限界温度）は、鋼材の許容限界温度325℃とする。

(b) 耐火性能の評価結果

一定の輻射強度で排気筒が昇温されるものとして、下記の式より、排気

筒の最大温度を求め、排気筒の温度が許容温度以下であることを確認した。

$$T = T_0 + \frac{\varepsilon E}{2h}$$

$T_0$  : 初期温度[50℃],  $E$  : 輻射強度[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  : 排気筒表面の放射率 (0.9)

※<sup>1</sup>,  $h$  : 排気筒表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>2</sup>

※<sup>1</sup> : 伝熱工学資料, ※<sup>2</sup> : 空気調和・衛生工学便覧

第 2-15 表 排気筒の温度評価結果

7号炉排気筒			
項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	635.34	1444.30	160.82
表面温度[℃]	59	62	51

d. 軽油タンクの温度評価

航空機墜落位置より原子炉建屋側にある軽油タンクが航空機墜落火災により発火するかどうか評価する。航空機墜落火災時に軽油タンク内の軽油が発火点となる輻射強度[kW/m<sup>2</sup>]を算出し、その輻射強度が航空機燃料の輻射発散度(最大58kW/m<sup>2</sup>)より大きいことから、輻射熱により軽油が発火しないことを確認した。

(a) 軽油タンクの危険輻射強度の算出

一定の輻射強度で軽油および軽油タンクが昇温されるものとして、下記の式より、許容限界温度となる輻射強度を危険輻射強度とする。

$$E_{\max} = \frac{(C + hSt)(T - T_0)}{\varepsilon St}$$

$T_0$  : 初期温度[38℃],  $T$  : 許容限界温度[225℃]※<sup>1</sup>,  $\varepsilon$  : 軽油タンク表面の放射率 (0.9) ※<sup>2</sup>,  $h$  : 軽油タンク表面熱伝達率[17W/m<sup>2</sup>K]※<sup>3</sup>,  $S$  : 軽油タンク受熱面積[m<sup>2</sup>],  $C$  : 軽油タンクおよび軽油の熱容量[8.72×10<sup>8</sup>J/K]※<sup>4</sup>,  $t$  : 燃焼継続時間[s] ※<sup>5</sup>

※<sup>1</sup> : 軽油の発火点, ※<sup>2</sup> : 伝熱工学資料, ※<sup>3</sup> : 空気調和・衛生工学便覧

※<sup>4</sup> : 軽油保有量を保安規定で定められる最低量として算出

※<sup>5</sup> : 評価対象航空機の中で最も燃焼継続時間の長い大型軍用航空機の2.14時間

(b) 評価結果

以上より、燃焼継続時間2.14時間で軽油の発火点225℃となる輻射強度は、

107kW/m<sup>2</sup>となる。ここで、航空機燃料の輻射発散度が58kW/m<sup>2</sup>であり、軽油タンク受熱面での輻射強度は輻射発散度(58kW/m<sup>2</sup>)に形態係数(0~1の間の値)を掛けた値であることから、軽油タンク受熱面の輻射強度は58kW/m<sup>2</sup>以下である。よって、軽油タンク受熱面での輻射強度が軽油の発火点以上となる危険輻射強度より小さいことから、輻射熱により軽油が発火することはない。

e. タービン建屋非常用電気品室の温度評価

航空機墜落火災では、タービン建屋周辺にも墜落する可能性が有ることから、航空機墜落火災による熱影響を検討する。タービン建屋非常用電気品室への熱影響は、航空機墜落のみ(単独火災)よりも危険物タンクとの重畳を考慮する場合が厳しくなるため、航空機墜落火災単独での評価は(12)で示す危険物タンクとの重畳火災に包絡されるため熱影響はない。

f. 廃棄物処理建屋の温度評価

航空機墜落火災では、廃棄物処理建屋周辺にも墜落する可能性があることから、航空機墜落火災による熱影響を検討する。廃棄物処理建屋には復水貯蔵槽があるが、建屋外壁から2枚以上隔てたエリアにあるため直接熱影響はないと考えられるが、廃棄物処理建屋外壁の温度評価を実施することで廃棄物処理建屋の耐性を評価する。

評価に使用する条件は以下の通り。

第2-16表 廃棄物処理建屋火災影響評価に必要なデータ

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	50	58	58
燃焼半径[m]	13.8	9.45	1.95
離隔距離[m]	143	58	34
燃焼継続時間[hour]	1.49	2.13	0.33

以上より形態係数および輻射強度を求め、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容限界温度以下であることを確認した。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left( \frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18h\sqrt{t}} + 1 \right) \frac{h}{\varepsilon E}}$$

出典：田中 哮義，改訂版建築火災安全工学入門，日本建築センター  
 T<sub>0</sub>: 初期温度[50℃], E: 輻射強度[W/m<sup>2</sup>], ε: コンクリート表面の放射率(0.95)

※, h : コンクリート表面熱伝達率[34.9W/m<sup>2</sup>K]※, k : コンクリート熱伝導率[1.6W/mK] ※, ρ : コンクリート密度[2200kg/m<sup>3</sup>] ※, c : コンクリート比熱[879J/kgK] ※, t : 燃焼継続時間[s]

※ : 建築設計竣工図書 原子炉建屋構造計算書

第2-17表 廃棄物処理建屋外壁の温度評価結果

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
形態係数	0.0152953	0.0370673	0.0057874
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	764.77	2149.90	335.67
表面温度[°C]	64	90	55

(12) 危険物タンクとの重畳

a. 重畳する危険物タンクの選定

航空機火災が発生した場合に重畳を考慮する危険物タンクを検討する。航空機落下確率が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]となる航空機墜落位置とその周辺の危険物施設位置を第2-7図および第2-8図に示す。発電用原子炉施設周辺には多量の油を保有する軽油タンクがあることから、まず、航空機墜落位置より原子炉建屋側にある軽油タンクが航空機墜落火災により発火するかどうか評価する。(11)の「d. 軽油タンクの温度評価」に示すとおり、航空機墜落火災時に軽油タンク内の軽油が発火点となる輻射強度[kW/m<sup>2</sup>]を算出し、その輻射強度が航空機燃料の輻射発散度(最大58kW/m<sup>2</sup>)より大きいことから、輻射熱により軽油が発火しないことを確認した。よって、航空機墜落位置より内側にある軽油タンクが航空機墜落により発火することはないことから、航空機墜落との重畳を考慮する危険物タンクは、航空機墜落位置より外側の軽油タンクとする。

6号炉では、航空機落下確率が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]以上となる範囲にある危険物タンクは5号炉の軽油タンクとなる。7号炉では、航空機落下確率が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]以上となる範囲にある危険物タンクは5号炉および6号炉の軽油タンクとなる。

6号炉に対する影響評価を考えると、5号炉軽油タンクは海側に設置されており、小型軍用航空機、小型民間航空機および大型軍用航空機が5号炉軽油タンク位置に航空機が墜落したとしても、6号炉の原子炉建屋およびコントロール建屋への輻射熱はタービン建屋により遮蔽されるため影響はない。ただし、6号炉タービン建屋1階の非常用電気品室は、5号炉軽油タンクの熱影響を受ける位置にあることから、燃料積載量・燃料タンク投影面積が大きい大型軍用航空機(KC-767)が5号炉軽油タンク周辺に墜落し、5号炉軽油タンク2台火災と航空機墜落火災が重畳した場合の熱影響評価を実施する。なお、航空機墜落位置は、航空機墜落火災による影響が最も厳しくなるよう落下確率が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]となる位置とする。

7号炉に対する影響評価を考えると、5号炉軽油タンクは海側に設置されており、大型民間航空機が5号炉軽油タンクに墜落したとしても、7号炉の原子炉建屋、コントロール建屋およびタービン建屋1階の非常用電気品室は6号炉タービン建屋により輻射熱が遮られることから影響は無い。6号炉軽油タンクは山側に設置されていることから、小型軍用航空機(AH-1S)が6号炉軽油タンク周辺に墜落し、6号炉軽油タンク2台火災と航空機墜落火災が重畳した場合の熱影響評価を実施する。なお、航空機墜落位置は、航空機墜落火災による影響が最も厳しくなるよう落下確率が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる位置とする。



第2-7図 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置（6号炉）



第 2-8 図 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置（7号炉）

- b. 6号炉に対する影響評価（5号炉軽油タンクとの重畳）
  - (a) 6号炉タービン建屋非常用電気品室の外壁面温度評価  
評価に必要なデータは以下の通り

第 2-18 表 軽油タンク火災影響評価に必要なデータ

6号炉タービン建屋1F 非常用電気品室評価			
項目	5号炉南側 軽油タンク	5号炉北側 軽油タンク	大型軍用航空機 (KC-767)
燃料の種類	軽油	軽油	JP-4
燃料量[m <sup>3</sup> ]	344	344	145.033
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	42	42	58
燃焼速度[m/s]	$4.793 \times 10^{-5}$	$4.793 \times 10^{-5}$	$6.710 \times 10^{-5}$
燃焼面積[m <sup>2</sup> ]	185.64	193.64	281
燃焼半径[m]	7.68	7.85	9.45
タービン建屋までの距離[m]	91.4	120.6	67
燃焼継続時間[hour]	10.73	10.30	2.14



次の式から形態係数を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{(n-1)}}{\sqrt{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

$\phi$  : 形態係数, L : 離隔距離[m], H : 火炎高さ[m], R : 燃焼半径[m]

第 2-19 表 形態係数の算出結果

6号炉タービン建屋1F 非常用電気品室評価			
項目	5号炉南側 軽油タンク	5号炉北側 軽油タンク	大型軍用航空機 (KC-767)
タービン建屋までの距離[m]	91.4	120.6	67
燃焼半径 R[m]	7.69	7.85	9.46
形態係数	0.0138238	0.0083052	0.0292795

火災の火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E : 輻射強度, R<sub>f</sub> : 輻射発散度,  $\phi$  : 形態係数

第 2-20 表 輻射強度の算出結果

6号炉タービン建屋1F 非常用電気品室評価			
項目	5号炉南側 軽油タンク	5号炉北側 軽油タンク	大型軍用航空機 (KC-767)
輻射発散度 [kW/m <sup>2</sup> ]	42	42	58
形態係数	0.0138238	0.0083052	0.0292795
輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	580.60	348.81	1698.21

ここで重畳を考慮した場合、航空機が墜落し同時に軽油タンクが延焼する場合は輻射強度が大きくなり、航空機が墜落後時間において軽油タンクが発火する場合は燃焼継続時間が大きくなることから、それらを包絡するように、評価を実施する（第2-9図）。

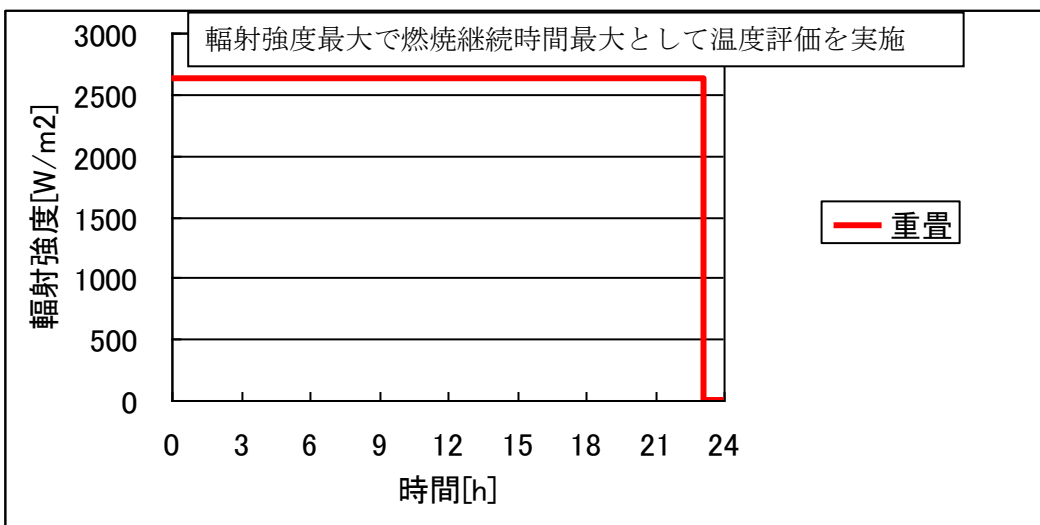
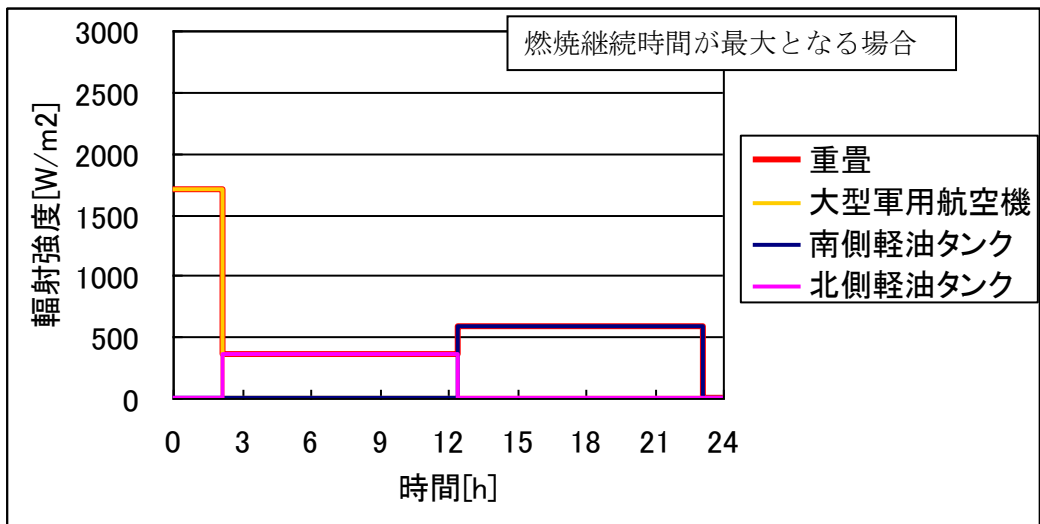
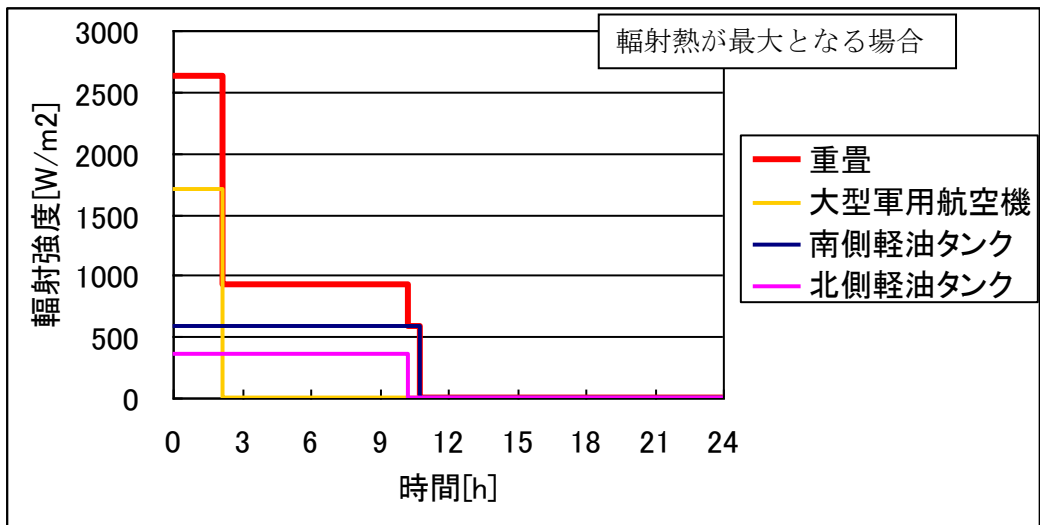
航空機と軽油タンクが同時に延焼する場合の輻射強度Eは、以下の通り  
 $E = 580.61$ （5号炉南側軽油タンク）+  $348.82$ （5号炉北側軽油タンク）  
 +  $1698.22$ （大型軍用航空機）

$$E = 2627.65 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

航空機が墜落後時間において軽油タンクが発火する場合の最大の燃焼継続時間 $t$ は、以下の通り

$$t = 10.73 \text{ (5号炉南側軽油タンク)} + 10.30 \text{ (5号炉北側軽油タンク)} \\ + 2.14 \text{ (大型軍用航空機)}$$

$$t = 23.17 \text{ [時間]}$$



第 2-9 図 重畳を考慮した場合の輻射強度および燃焼継続時間の関係

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容限界温度以下であるか評価を実施した。

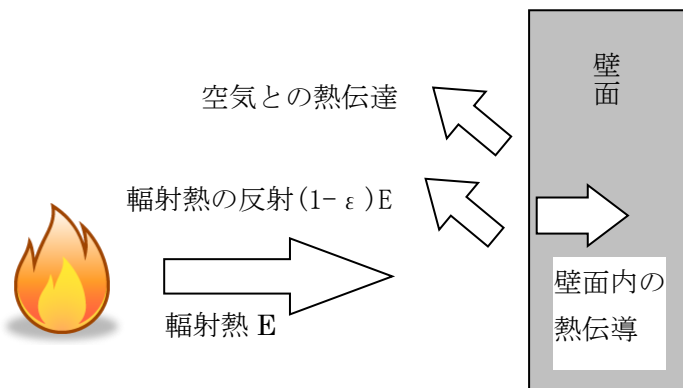
$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 建物壁内における外壁面からの距離,  $\alpha$  : 熱拡散率

第 2-21 表 建屋外壁面の温度評価結果

6号炉タービン建屋 1 F 非常用電気品室評価 (建屋外壁面温度)	
項目	危険物タンクと航空機の重畳
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	2627.65 (=580.61+348.82+1698.22)
燃焼継続時間[hour]	23.17 (=10.73+10.30+2.14)
表面温度[°C]	102

評価の結果、表面温度は102°Cとなり、許容限界温度を下回ることから、熱影響は無い。

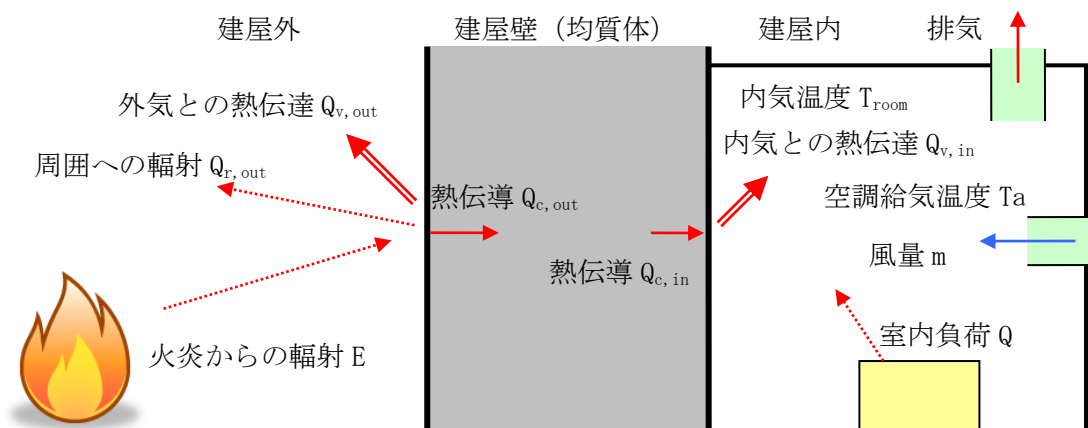


第 2-10 図 建屋温度評価体系図

(b) 6号炉タービン建屋非常用電気品室の内気温度評価

火災が発生した時間から、燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設が昇温されるものとして、内壁の温度上昇に伴う内気温度の上昇から、非常用電気品室内に設置している機器等への影響について評価した。

以下に概念図を示す。



第2-11 図 伝熱の概念図

評価に必要なパラメータを示す。

第2-22 表 航空機火災影響評価に必要なパラメータ

項目	パラメータ	備考
外気温度[°C]	50 °C	日射の影響を考慮し設定
外壁面熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	34.883	コンクリートの外壁面熱伝達率
内壁面熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	3.4883	コンクリートの内壁面熱伝達率
壁の熱伝導率[W/mK]	1.6279	コンクリートの熱伝導率
熱拡散率[m <sup>2</sup> /s]	8.42×10 <sup>-7</sup>	コンクリートの熱拡散率
壁厚[m]	0.6	

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、外壁および内壁面温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 建物壁内における外壁面からの距離, α : 熱拡散率

外壁および内壁面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

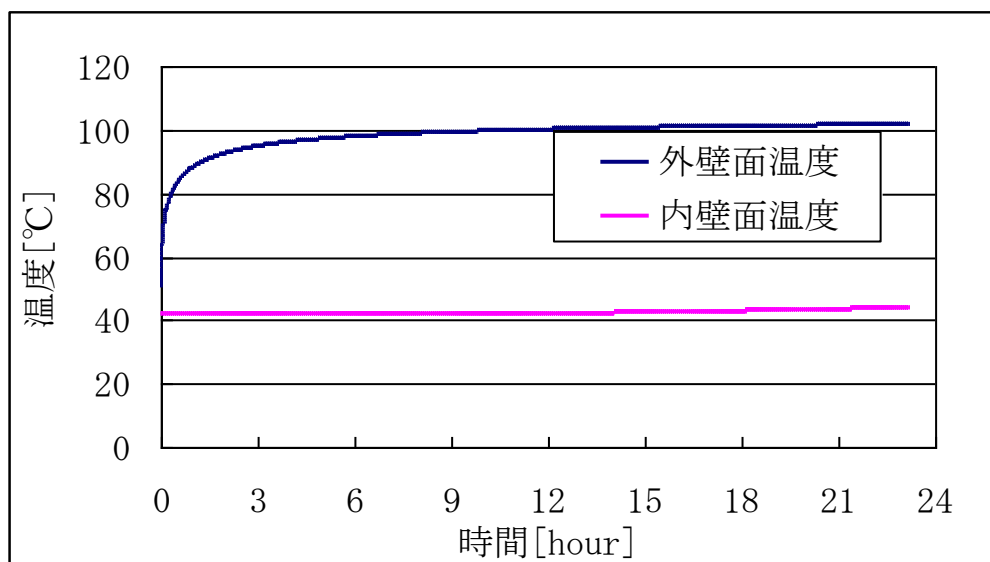
$$Q_{v, in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

$h_{in}$  : 内壁面熱伝達率, A : 内壁の表面積,  $T_{in}$  : 内壁面温度,  $T_{room}$  : 内気温度  
内気温度は、火災による内壁面温度上昇に伴う熱負荷と室内の熱負荷および空調による除熱を考慮し、次式で求める。

$$T_{room} = \frac{Q + Q_{v.in}}{m \rho C} + T_a$$

Q : 室内負荷, m : 風量,  $\rho$  : 空気密度, C : 空気比熱,  $T_a$  : 空調給気温度

以下に評価結果を示す。



第 2-12 図 外壁および内壁面温度（発火～鎮火時）

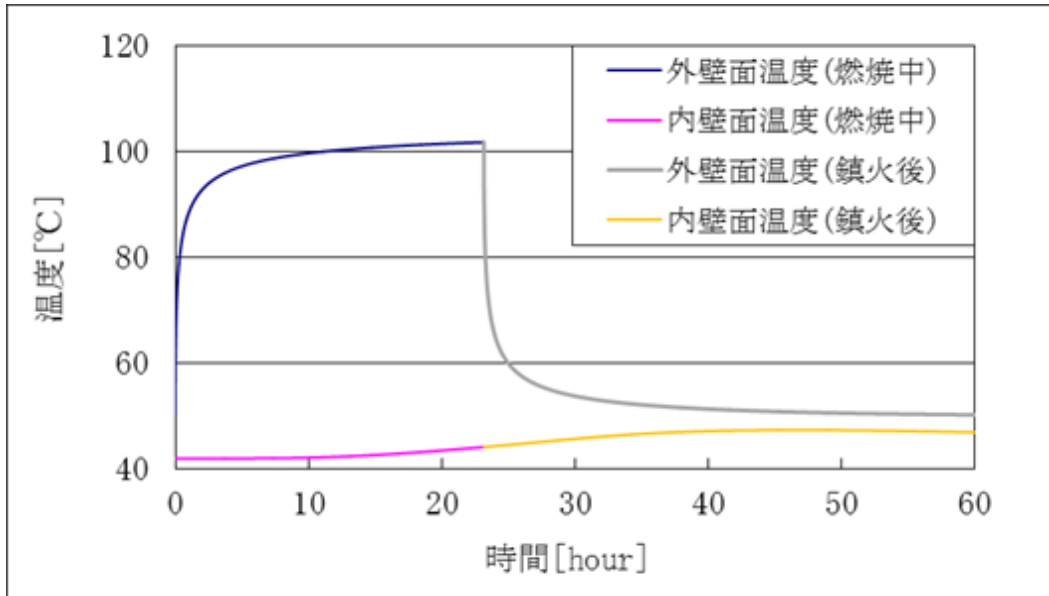
第 2-23 表 非常用電気品室の温度評価結果

6号炉タービン建屋非常用電気品室評価（鎮火時）	
項目	危険物タンクと航空機の重畳
輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	2627.65 (=580.61+348.82+1698.22)
燃焼継続時間 [hour]	23.17 (=10.73+10.30+2.14)
外壁面温度 [°C]	102
内壁面温度 [°C]	44.1
内気温度 [°C]	36.7
許容温度 [°C]	40*

※：室内の電気設備（パワーセンター，モータコントロールセンター）の最高使用温度

6号炉タービン建屋非常用電気品室は，後述の7号炉コントロール建屋に対して，輻射強度，燃焼継続時間等の評価条件が厳しいことから，鎮火後の内気温度についても評価を実施する。

以下に評価結果を示す。



第 2-13 図 外壁および内壁面温度（発火～鎮火後）

第 2-24 表 非常用電気品室の温度評価結果

6号炉タービン建屋非常用電気品室評価（鎮火後）	
項目	危険物タンクと航空機の重量
時間	鎮火から 46.7 時間後
外壁面温度[°C]	50.7
内壁面温度[°C]	47.3
内気温度[°C]	37.0
許容温度[°C]	40*

※：室内の電気設備（パワーセンター，モータコントロールセンター）の最高使用温度

評価の結果，内気温度は鎮火から46.7時間後に37.0℃（最大値）まで上昇するが，室内の電気設備（パワーセンター，モータコントロールセンター）の最高使用温度40℃を下回ることを確認した。

c. 7号炉に対する影響評価（6号炉軽油タンクとの重畳）

(a) 7号炉コントロール建屋の外壁面温度評価

評価に必要なデータは以下の通り

第2-25表 軽油タンク火災影響評価に必要なデータ

7号炉コントロール建屋評価			
項目	6号炉西側 軽油タンク	6号炉東側 軽油タンク	小型軍用航空 機(AH-1S)
燃料の種類	軽油	軽油	JP-4
燃料量[m <sup>3</sup> ]	565	565	0.98
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	42	42	58
燃焼速度[m/s]	4.793×10 <sup>-5</sup>	4.793×10 <sup>-5</sup>	6.710×10 <sup>-5</sup>
燃焼面積[m <sup>2</sup> ]	289	289	12
燃焼半径	9.59	9.59	1.95
コントロール建屋までの距離[m]	100	109.5	116
燃焼継続時間[hour]	11.33	11.33	0.34

次の式から形態係数を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{A(n-1)}}{\sqrt{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right] \right\}$$

ただし、  $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

φ：形態係数，L：離隔距離[m]，H：火炎高さ[m]，R：燃焼半径[m]

第2-26表 形態係数の算出結果

7号炉コントロール建屋評価			
項目	6号炉西側 軽油タンク	6号炉東側 軽油タンク	小型軍用航空 機(AH-1S)
コントロール建屋までの距離[m]	100	109.5	116
燃焼半径 R[m]	9.59	9.59	1.95
形態係数	0.0179039	0.0149786	0.0005303

火災の火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E：輻射強度，R<sub>f</sub>：輻射発散度，φ：形態係数



第 2-27 表 輻射強度の算出結果

7号炉コントロール建屋評価			
項目	6号炉西側 軽油タンク	6号炉東側 軽油タンク	小型軍用航空 機(AH-1S)
輻射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	42	42	58
形態係数	0.0179039	0.0149786	0.0005303
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	751.97	629.11	30.77

ここで重畳を考慮した場合、航空機が墜落し同時に軽油タンクが延焼する場合は輻射強度が大きくなり、航空機が墜落後時間において軽油タンクが発火する場合は燃焼継続時間が大きくなることから、それらを包絡するように、評価を実施する（第2-14図）。

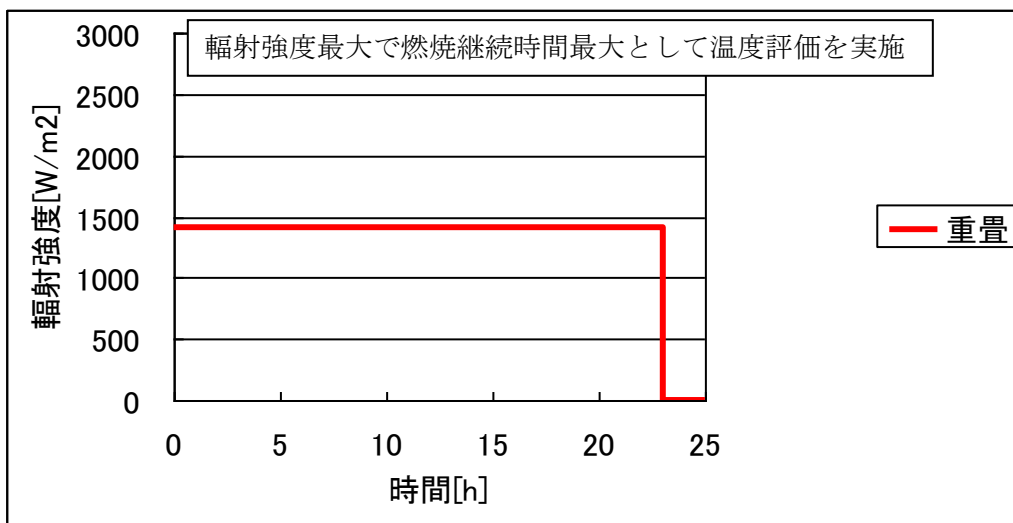
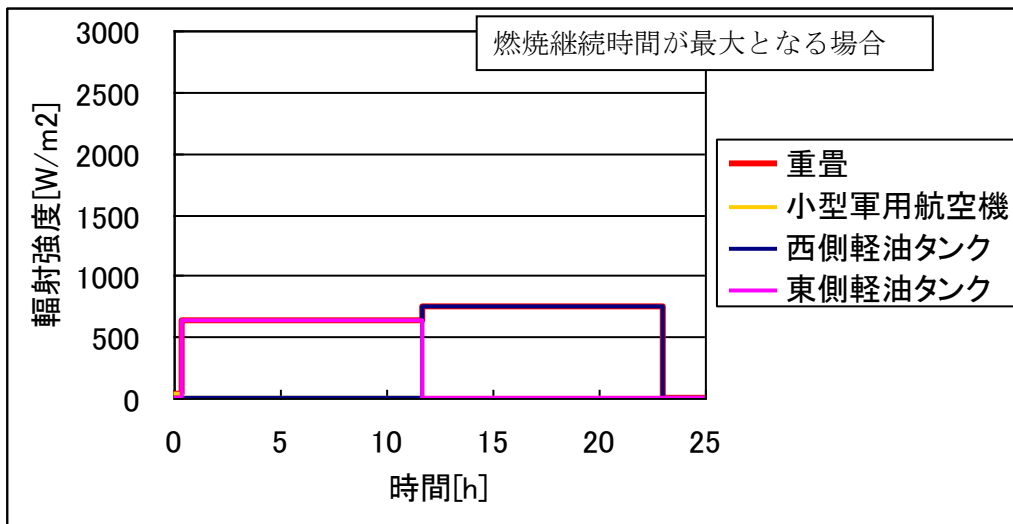
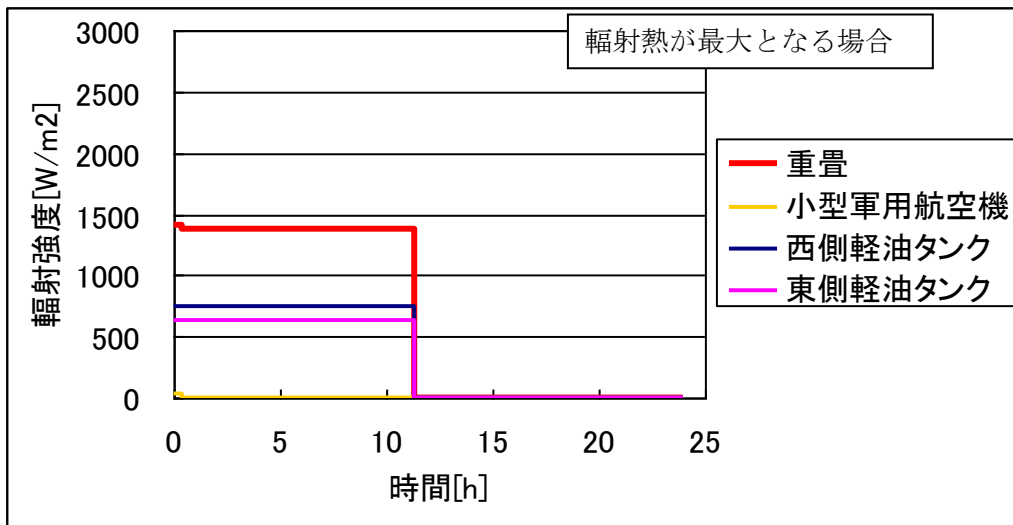
航空機と軽油タンクが同時に延焼する場合の輻射強度Eは、以下の通り  
 $E = 751.97$ （6号炉西側軽油タンク）+  $629.11$ （6号炉東側軽油タンク）+  $30.77$ （小型軍用航空機）

$$E = 1411.85 \quad [\text{W/m}^2]$$

航空機が墜落後時間において軽油タンクが発火する場合の最大の燃焼継続時間tは、以下の通り

$$t = 11.33 \text{（6号炉西側軽油タンク）} + 11.33 \text{（6号炉東側軽油タンク）} + 0.34 \text{（小型軍用航空機）}$$

$$t = 23.00 \text{ [時間]}$$



第2-14図 重畳を考慮した場合の輻射強度および燃焼継続時間の関係

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容限界温度以下であるか評価を実施した。

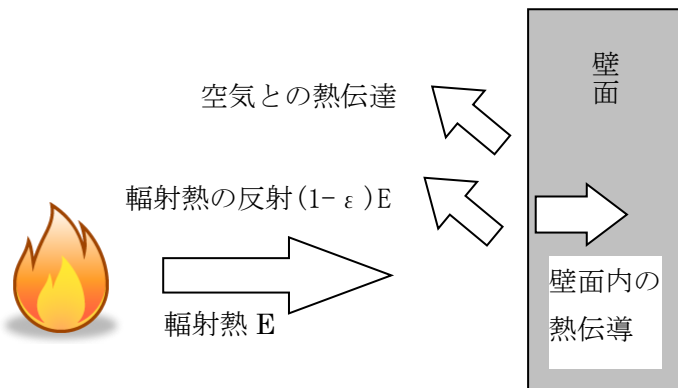
$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 建物壁内における外壁面からの距離,  $\alpha$  : 熱拡散率

第 2-28 表 建屋外壁面の温度評価結果

7号炉コントロール建屋評価 (建屋外壁面温度)	
項目	危険物タンクと航空機の重畳
輻射強度[W/m <sup>2</sup> ]	1411.85 (=751.97+629.11+30.77)
燃焼継続時間[hour]	23.00 (=11.33+11.33+0.34)
表面温度[°C]	77.9

評価の結果、表面温度は77.8°Cとなり、許容限界温度を下回ることから、熱影響は無い。

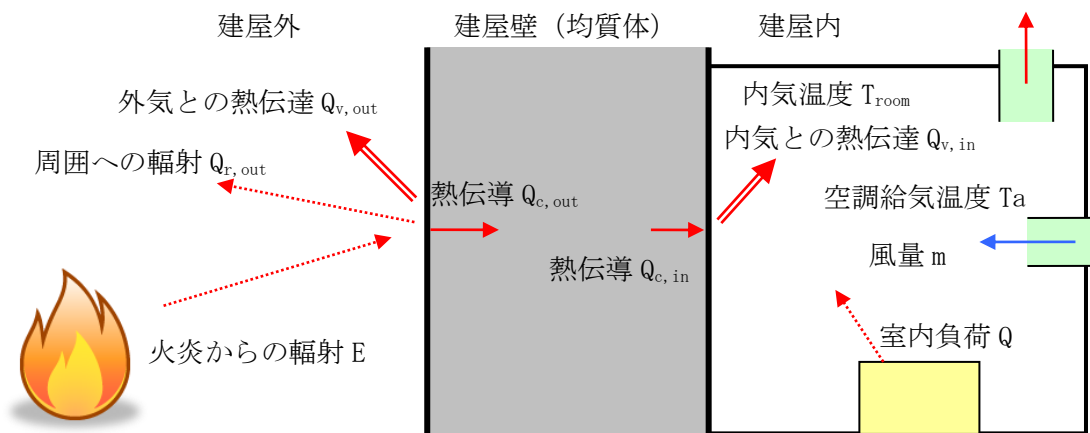


第 2-15 図 建屋温度評価体系図

(b) 7号炉コントロール建屋の内気温度評価

火災が発生した時間から、燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で発電用原子炉施設が昇温されるものとして、内壁の温度上昇を求め、コントロール建屋に設置している機器等への影響について評価した。評価対象エリアは、壁厚が最も薄いエリアを選定した。

以下に概念図を示す。



第 2-16 図 伝熱の概念図

評価に必要なパラメータを示す。

第 2-29 表 航空機火災影響評価に必要なパラメータ

項目	パラメータ	備考
外気温度[°C]	50	日射の影響を考慮し設定
外壁面熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	34.883	コンクリートの外壁面熱伝達率
内壁面熱伝達率[W/m <sup>2</sup> K]	3.4883	コンクリートの内壁面熱伝達率
壁の熱伝導率[W/mK]	1.6279	コンクリートの熱伝導率
熱拡散率[m <sup>2</sup> /s]	8.42×10 <sup>-7</sup>	コンクリートの熱拡散率
壁厚[m]	0.5	

以下の式に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて、外壁および内壁面温度を求める。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

T : 温度, t : 時刻, x : 建物壁内における外壁面からの距離, α : 熱拡散率

外壁および内壁面温度上昇に伴う熱負荷は次式で計算される。

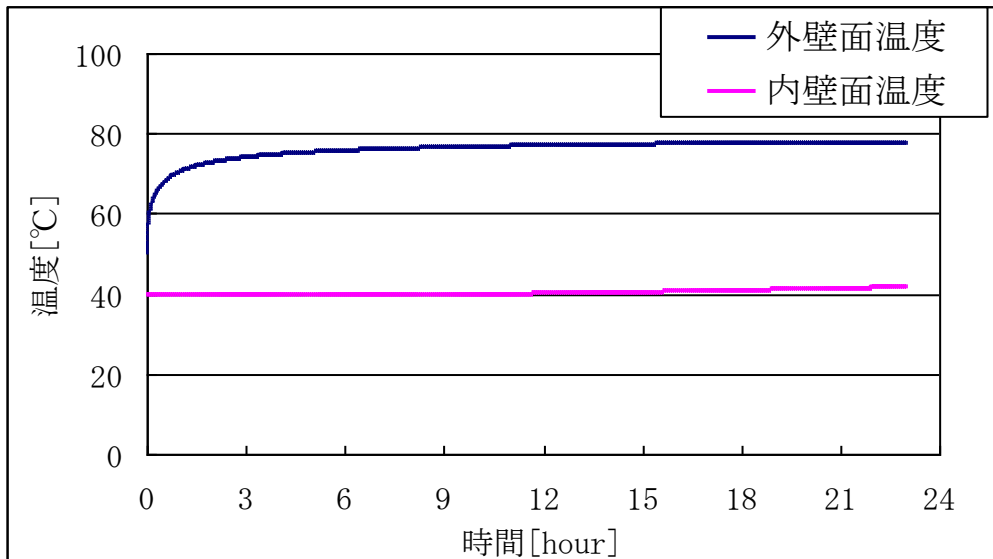
$$Q_{v, in} = h_{in} A (T_{in} - T_{room})$$

h<sub>in</sub> : 内壁面熱伝達率, A : 内壁の表面積, T<sub>in</sub> : 内壁面温度, T<sub>room</sub> : 内気温度  
内気温度は、火災による内壁面温度上昇に伴う熱負荷と室内の熱負荷および空調による除熱を考慮し、次式で求める。

$$T_{room} = \frac{Q + Q_{v, in}}{m \rho C} + T_a$$

Q : 室内負荷, m : 風量,  $\rho$  : 空気密度, C: 空気比熱, Ta : 空調給気温度

以下に評価結果を示す。



第 2-17 図 外壁および内壁面温度

第 2-30 表 建屋内気温度の評価結果

7号炉コントロール建屋評価 (建屋内気温度)	
項目	危険物タンクと航空機の重畳
輻射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	1411.85 (=751.97+629.11+30.77)
燃焼継続時間 [hour]	23.00 (=11.33+11.33+0.34)
外壁面温度 [°C]	77.9
内壁面温度 [°C]	41.8
内気温度 [°C]	37.2
許容温度 [°C]	60*

※ : 室内の電気設備 (ケーブル) の最高使用温度

出典 : 日本電線工業会規格 JCS 0168-1:2004 ケーブルの常時許容温度

評価の結果, 内気温度は37.2°Cとなり, ケーブル常時許容温度60°Cを下回ることを確認した。

d. まとめ

6号炉の評価では外壁面は102度, 7号炉の評価では外壁面は77.8°Cであり, 許容限界温度を下回ることから, 熱影響はないと評価する。また, 6号炉の評価で

は内気温度は36.7℃，7号炉の評価では内気温度は37.2℃であり，室内の電気設備の許容温度を下回ることから，熱影響はないと評価する。

(13) 火災による熱影響の有無の評価

以上の結果から，航空機墜落において火災が発生した場合を想定したとしても，外壁面の温度が許容限界温度を超えないことから，発電用原子炉施設に熱影響をおよぼすことはないと評価する。

第 1 表 評価対象航空機の種類

		民間航空機		自衛隊機、在日米軍機
		計器飛行方式	有視界飛行方式	
固定翼 (ジェット旅客機等)	大型機	定期便：評価対象 (例) 大型旅客機 (B747、 B777 等)	定期便：該当なし	評価対象  自衛隊機 (F-4EJ 改、 F-15 等) 在日米軍機 (F-16、 F/A-18 等)
		不定期便：評価対象外 (注 1)	不定期便：評価対象 (例) 海上保安庁のパトロール 機 (ヒューコック 90 型等) 民間の社有機 (三菱式 MU-300 型等) 等	
	小型機	定期便：評価対象外(注 2)	定期便：評価対象外(注 2)	評価対象  自衛隊機 (T-1 等)
		不定期便：評価対象(注 3)	不定期便：評価対象 (例) 本土-離島間コミュニタ (DHC-6、BN-2 等) 軽飛行機 (セスナ 172 等)	
回転翼 (ヘリコプター)	大型機	定期便：評価対象外(注 2)	定期便：評価対象外(注 2)	評価対象  自衛隊機 (MH-53 等) 在日米軍機 (CH-53 等)
		不定期便：評価対象(注 3)	不定期便：評価対象 (例) 資材輸送 (ハール 214B、 AS332 等) 等	
	小型機	定期便：評価対象外(注 2)	定期便：評価対象外(注 2)	評価対象  自衛隊機 (OH-6 等) 在日米軍機 (UH-1 等)
		不定期便：評価対象(注 3)	不定期便：評価対象 (例) 離島間コミュニタ (SA365 等) 資材輸送、緊急医療、報 道用等 (アエロスハシアル AS350、川崎 BK117)	

(注1) 計器飛行方式で飛行する大型固定翼機の不定期便は、定期便と比べて運航回数が極めて少ないことから、評価対象外とする。

(注2) 小型固定翼機及び回転翼機の定期便については、定期航空運送事業者の登録機数の割合から、運航頻度が大型機の定期便の数%であると判断できることから評価対象外とする。

(注3) 小型固定翼機及び回転翼機では、リクエストベースで計器飛行方式による飛行が可能となっているが、原則としては、有視界飛行方式による飛行形態を取っていることから、本基準では、全て有視界飛行方式として評価することとする。

※：実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について（内規）より抜粋

- 大型民間航空機（固定翼，回転翼）
- 小型民間航空機（固定翼，回転翼）
- 大型軍用航空機（固定翼，回転翼）
- 小型軍用航空機（固定翼，回転翼）

第 1 表 主要自衛隊航空機の仕様

所属	形式	機種	保有数 [機]	全長 [m]	全幅 [m]	燃料積載量 [l]
陸上自衛隊	小型固定翼	LR-1	2	10	12	920
	大型固定翼	LR-2	7	14	18	2040
	小型回転翼	AH-1S	70	14	3	980
	小型回転翼	OH-6D	84	7	2	242
	小型回転翼	OH-1	38	12	3	953
	小型回転翼	UH-1H/J	141	12/13 <sup>※1</sup>	3	833
	大型回転翼	CH-47J/JA	56	16	4/5 <sup>※1</sup>	3899
	大型回転翼	UH-60JA	34	16	3	3255
	大型回転翼	AH-64D	10	18	6	1421
海上自衛隊	大型固定翼	P-3C	75	36	30	34820
	大型固定翼	P-1	4	38	35	- <sup>※2</sup>
	大型回転翼	SH-60J	46	15	3	1361
	大型回転翼	SH-60K	39	16	3	1361
	大型回転翼	MH-53E	6	22	6	12113
	大型回転翼	MCH-101	5	23	19	5250
航空自衛隊	大型固定翼	F-15J/DJ	201	19	13	14647
	大型固定翼	F-4EJ	62	19	12	12260
	大型固定翼	F-2A/B	92	16	11	11053
	大型固定翼	RF-4E/EJ	13	19	12	12579
	大型固定翼	C-1	25	29	31	15709
	大型固定翼	C-130H	15	30	40	26344
	大型固定翼	KC-767	4	49	48	145033
	大型固定翼	KC-130H	1	30	40	26344
	大型固定翼	E-2C	13	18	25	7002
	大型固定翼	E-767	4	49	48	- <sup>※2</sup>
	大型回転翼	CH-47J	15	16	4	3899

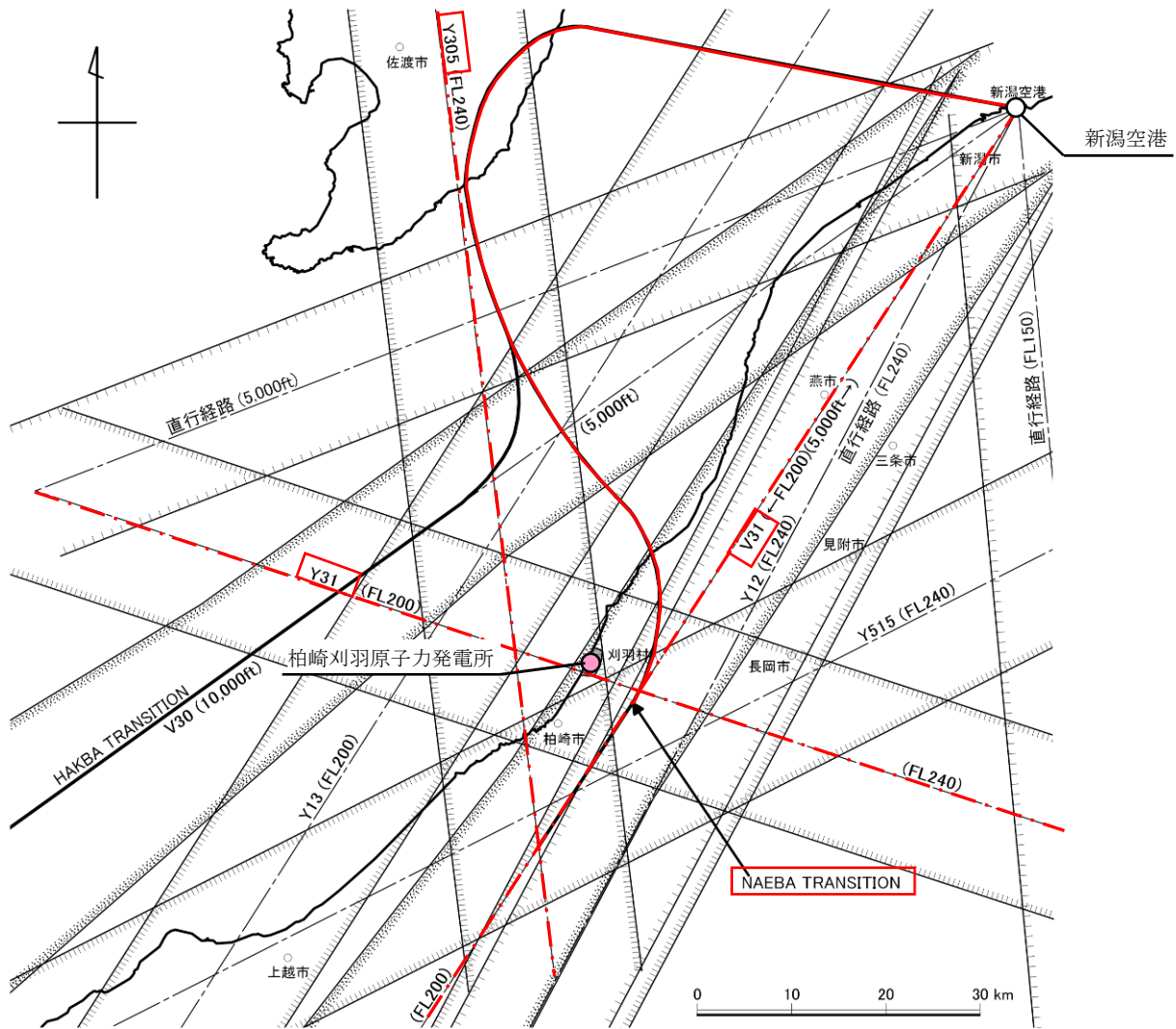
平成 25 年版防衛白書より作成。燃料積載量は日本航空機全集 2013(鳳文書林), 世界航空機年鑑 2012-2013(酣燈社)より。なお, 灰色で網掛けした航空機は小型航空機。

※ 1 : UH-1H, UH-1J の全長がそれぞれ 12, 13m, CH-47J, CH-47JA の全幅がそれぞれ 4, 5m を意味する

※ 2 : P-1 (哨戒), E-767 (早期警戒管制) の燃料積載量は不明だが, 機体サイズおよび用途を考えると, KC-767 (空中給油) より燃料補給機は少ないと推定する







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

第1図 柏崎刈羽原子力発電所周辺の航空図

(出典：AIP-JAPAN，国土交通省航空局，平成25年3月)

柏崎刈羽原子力発電所 第 1 表 飛行回数 (飛行回数)

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

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

注 2 : 実際の便数は 0 であるが、保守的に 0.5 とする。

第 1 表 標的面積

単位：km<sup>2</sup>

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

工事計画認可申請書記載の建屋寸法から面積を算出した。

注 1：ディーゼル発電機室は原子炉建屋に含む。

注 2：中央制御室は 6, 7 号炉合計。

注 3：海水ポンプエリアは地下に設置のため除外。

## 延べ飛行距離について

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

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

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

第 1 表 運航距離

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

## 航空機落下確率の評価を最新データに更新した場合の影響について

## 1. はじめに

発電所敷地内への航空機墜落による火災影響については、設置許可申請当時（平成25年9月）の最新データとして、「平成23年度 航空機墜落事故に関するデータの整備（平成24年9月 独立行政法人 原子力安全基盤機構）」に基づく航空機の落下確率より、原子炉施設からの離隔距離を算出し、熱影響評価を行っている。

しかしながら、安全審査が長期化し、その間に、「航空機落下事故に関するデータ（平成28年6月 NRA技術報告）」がとりまとめられたことを受け、その影響について確認することとした。

## 2. 航空機事故等のデータ更新による影響

「航空機落下事故に関するデータ（平成28年6月 NRA技術報告）」では、平成5年1月～平成24年12月までの航空機事故データ、運行実績データ及び訓練空域面積データとして更新されているが、各航空機の落下事故率は、同等もしくは低下している。このため、航空機の墜落位置から発電用原子炉施設までの離隔距離は同等もしくは長くなり、火災による影響も軽減される傾向となっている。

以下、更新されたデータに基づき、「航空機の墜落位置から発電用原子炉施設までの離隔距離」ならびに「危険物タンクとの重畳による影響」について評価する。

## 3. 航空機墜落の火災影響評価

「添付資料-7 原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災について」における航空機墜落の火災影響評価のうち、(1) 航空機墜落の火災の想定～(3) 評価対象範囲の考え方は同様であるため、(4) 以降について、評価する。

## (1) 標的面積の算出

## a. 大型民間航空機および小型民間航空機の標的面積の算出

## (a) 計器飛行方式民間航空機の航空路を巡航中の落下事故

$$P_c = f_c \cdot N_c \cdot A / W$$

$P_c$  : 対象施設への巡航中の航空機落下確率[回/年]

$N_c$  : 評価対象とする航空路等の年間飛行回数[飛行回/年]

$A$  : 発電用原子炉施設の標的面積[km<sup>2</sup>]

$W$  : 航空路幅[km]

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

$G_c$  : 巡航中事故件数[回]

$H_c$  : 延べ飛行距離[飛行回・km]

第3-1表 標的面積の算出結果

パラメータ	柏崎刈羽原子力発電所6, 7号炉			
対象航空路 <sup>注1</sup>	航空路 (V31)	転移経路 (NAEBA TRANSITION)	RNAV5 (Y31)	RNAV5 (Y305)
Nc <sup>注2</sup>	14600	4015	3650	182.5
A <sup>注3</sup>	0.01	0.01	0.01	0.01
W <sup>注4</sup>	14	14	18.52	18.52
Fc <sup>注5</sup>	0.5/9,740,013,768 = 5.13 × 10 <sup>-11</sup>			
Pc	5.35 × 10 <sup>-10</sup>	1.47 × 10 <sup>-10</sup>	1.01 × 10 <sup>-10</sup>	5.05 × 10 <sup>-12</sup>
Pc (合計)	7.88 × 10 <sup>-10</sup>			

注1：柏崎刈羽原子力発電所周辺の航空図（AIPエンルートチャート）による。（別紙7-4）

注2：国土交通省航空局への問合せ結果（ピークデイの値）を365倍した値。ただし、平成24年のピークデイにおける飛行回数が0回の場合は、保守的に0.5回とみなし、年間182.5回とした。（別紙7-5）

注3：原子炉建屋，コントロール建屋等の水平面積の合計値は0.01km<sup>2</sup>以下であるので標的面積は0.01km<sup>2</sup>とする。（別紙7-6）

注4：「航空路の指定に関する告示」及び「航空路等設定基準」による。

注5：巡航中事故件数は，平成5年～平成24年の間で0件のため，保守的に0.5件とした。延べ飛行距離は，平成5年～平成24年の「航空輸送統計年報，第1表 総括表，1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内の値を合計した値。（別紙7-9）

(b) 有視界飛行方式民間航空機の落下事故

$$P_v = (f_v / S_v) \cdot A \cdot \alpha$$

P<sub>v</sub>：対象施設への航空機落下確率[回/年]

f<sub>v</sub>：単位年当たりの落下事故率[回/年]

S<sub>v</sub>：全国土面積[km<sup>2</sup>]

A：発電用原子炉施設の標的面積[km<sup>2</sup>]

α：対象航空機の種類による係数

第3-2表 落下確率の算出結果

パラメータ	大型固定翼機	大型回転翼機	小型固定翼機	小型回転翼機
f <sub>v</sub> 注	0.5/20=0.025	1/20=0.05	35/20=1.75	24/20=1.20
S <sub>v</sub> 注	372,000			
α 注	1.0	1.0	0.1	0.1
A	0.01	0.01	0.01	0.01
P <sub>v</sub>	6.72×10 <sup>-10</sup>	1.34×10 <sup>-9</sup>	4.70×10 <sup>-9</sup>	3.22×10 <sup>-9</sup>
P <sub>v</sub> (合計)	9.94×10 <sup>-9</sup>			

注：「NTEC-2016-2002 NRA技術報告 航空機落下事故に関するデータ」（平成28年6月 原子力規制委員会）による。

以上より、

大型民間航空機の落下確率（P<sub>c</sub>（計器飛行方式）+P<sub>v</sub>（大型固定翼機）+P<sub>v</sub>（大型回転翼機））が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]となる標的面積A1[km<sup>2</sup>]を計算すると以下の通りとなる。

$$A1 = 10^{-7} \div (7.88 \times 10^{-10} + 6.72 \times 10^{-10} + 1.34 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.357 [\text{km}^2]$$

小型民間航空機の落下確率（P<sub>v</sub>（小型固定翼機）+P<sub>v</sub>（小型回転翼機））が10<sup>-7</sup>[回/炉・年]となる標的面積A2[km<sup>2</sup>]を計算すると以下の通りとなる。

$$A2 = 10^{-7} \div (4.70 \times 10^{-9} + 3.22 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.126 [\text{km}^2]$$

b. 大型軍用航空機および小型軍用航空機の標的面積の算出

柏崎刈羽原子力発電所の上空には訓練空域がないため、軍用航空機の落下確率P<sub>so</sub>を求める式は、以下の通りとなる。

$$P_{so} = (f_{so} / S_o) \cdot A$$

P<sub>so</sub>：訓練空域外での対象施設への航空機落下確率[回/年]

f<sub>so</sub>：単位年当たりの訓練空域外落下事故率[回/年]

S<sub>o</sub>：全国土面積から全国の陸上の訓練空域の面積を除いた面積[km<sup>2</sup>]

A：発電用原子炉施設の標的面積[km<sup>2</sup>]

第3-3表 落下確率の算出結果

パラメータ	大型自衛隊機	大型米軍機	小型自衛隊機	小型米軍機
f <sub>so</sub> 注	1/20=0.05	4/20=0.2	6/20=0.3	1/20=0.05
S <sub>o</sub> 注	295,000	372,000	295,000	372,000
A	0.01	0.01	0.01	0.01
P <sub>so</sub>	1.69×10 <sup>-9</sup>	5.37×10 <sup>-9</sup>	1.01×10 <sup>-8</sup>	1.34×10 <sup>-9</sup>
P <sub>so</sub> (合計)	1.85×10 <sup>-8</sup>			



注：「NTEC-2016-2002 NRA技術報告 航空機落下事故に関するデータ」（平成28年6月 原子力規制委員会）による。

以上より、

大型軍用航空機の落下確率( $P_{so}$ (大型自衛隊機)+ $P_{so}$ (大型米軍機))が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積 $A3$ [ $\text{km}^2$ ]を計算すると以下の通りとなる。

$$A3 = 10^{-7} \div (1.69 \times 10^{-9} + 5.37 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.141 [\text{km}^2]$$

小型軍用航空機の落下確率( $P_{so}$ (小型自衛隊機)+ $P_{so}$ (小型米軍機))が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積 $A4$ [ $\text{km}^2$ ]を計算すると以下の通りとなる。

$$A4 = 10^{-7} \div (1.01 \times 10^{-8} + 1.34 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.086 [\text{km}^2]$$

## (2) 発電用原子炉施設からの離隔距離の算出

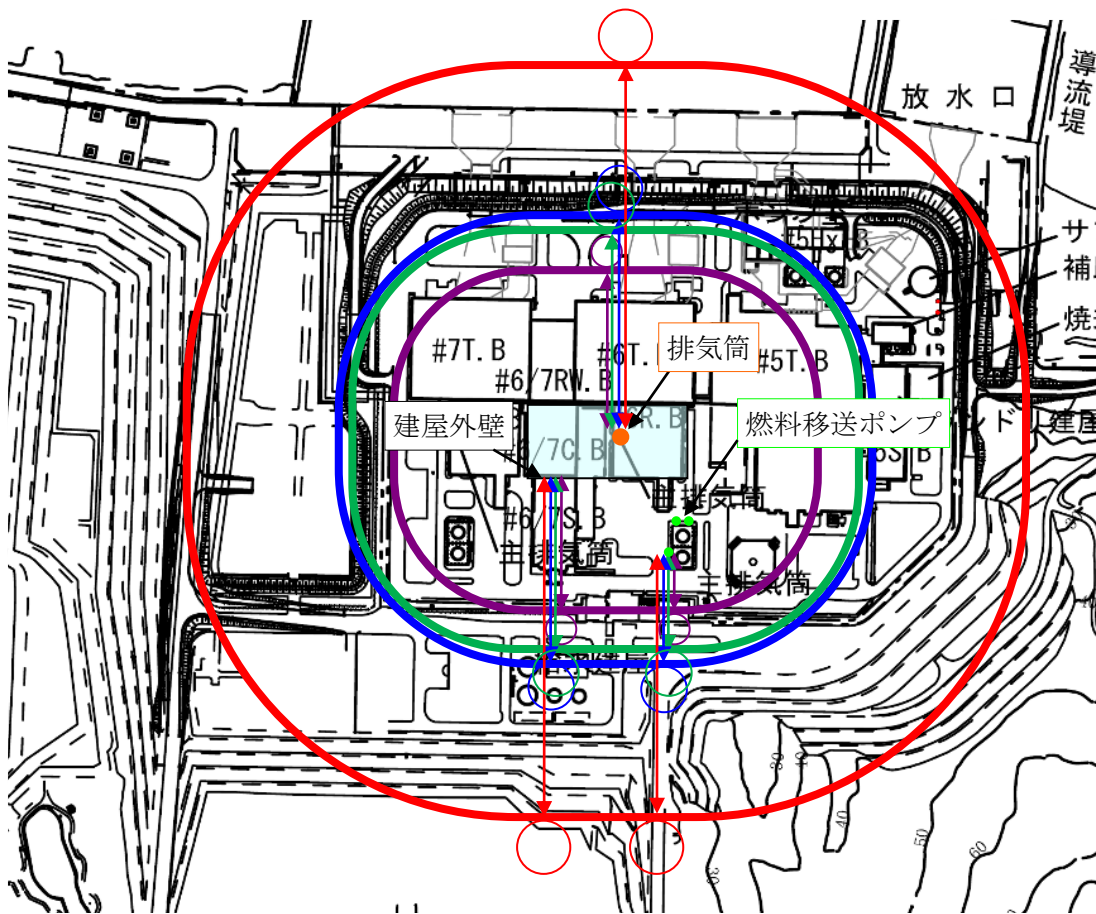
(1)で求めた面積が、評価対象となる発電用原子炉施設(原子炉建屋およびコントロール建屋)外壁面から等距離の離隔をとった場合の標的面積と等しくなる距離を離隔距離 $L$ [m]とし、離隔距離 $L$ を算出した結果を以下に示す。また、各航空機の離隔距離を第3-1図、第3-2図に示す。

$10^{-7}$ [回/炉・年]となる標的面積の考え方は、添付資料-7「2.航空機墜落の火災影響評価(5) 発電用原子炉施設からの離隔距離の算出」と同様。

第3-4表 発電用原子炉施設からの離隔距離の算出結果

項目		大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
対象航空機		B747-400	Do228-200	KC-767	AH-1S
6号炉	外壁面	278	143	155	109
7号炉	までの離隔距離[m]	286	150	161	116
6号炉	燃料移送ポンプ	218	83	95	49
7号炉	までの離隔距離[m]	227	91	103	57
6号炉	排気筒	300	164	176	131
7号炉	までの離隔距離[m]	286	151	162	116

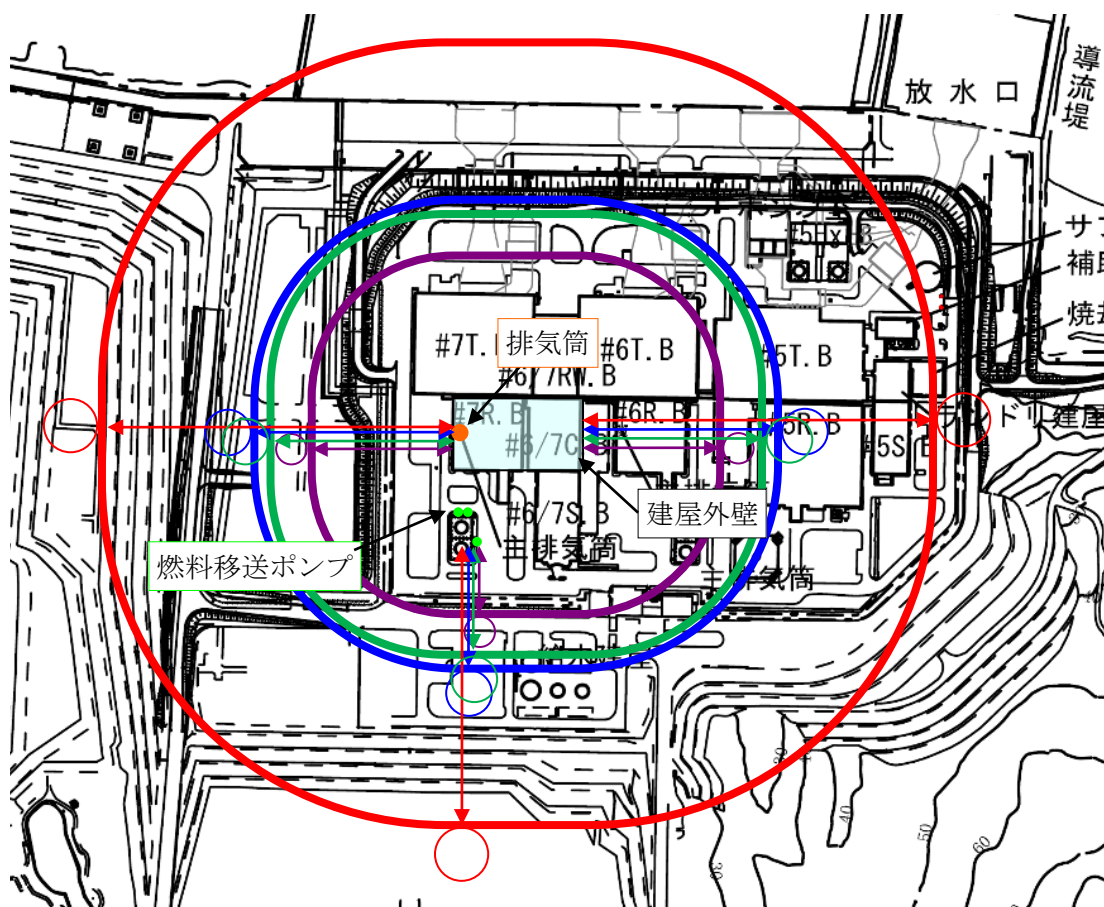
※：軽油タンクの熱影響評価は、航空機墜落による軽油タンク火災の重畳火災も考慮する。評価結果は(6)に示す。



○：航空機墜落位置（円筒火炎モデル）

大型民間航空機墜落位置	大型軍用航空機墜落位置
小型民間航空機墜落位置	小型軍用航空機墜落位置

第3-1図 各航空機の墜落位置（6号炉）



○：航空機墜落位置（円筒火炎モデル）

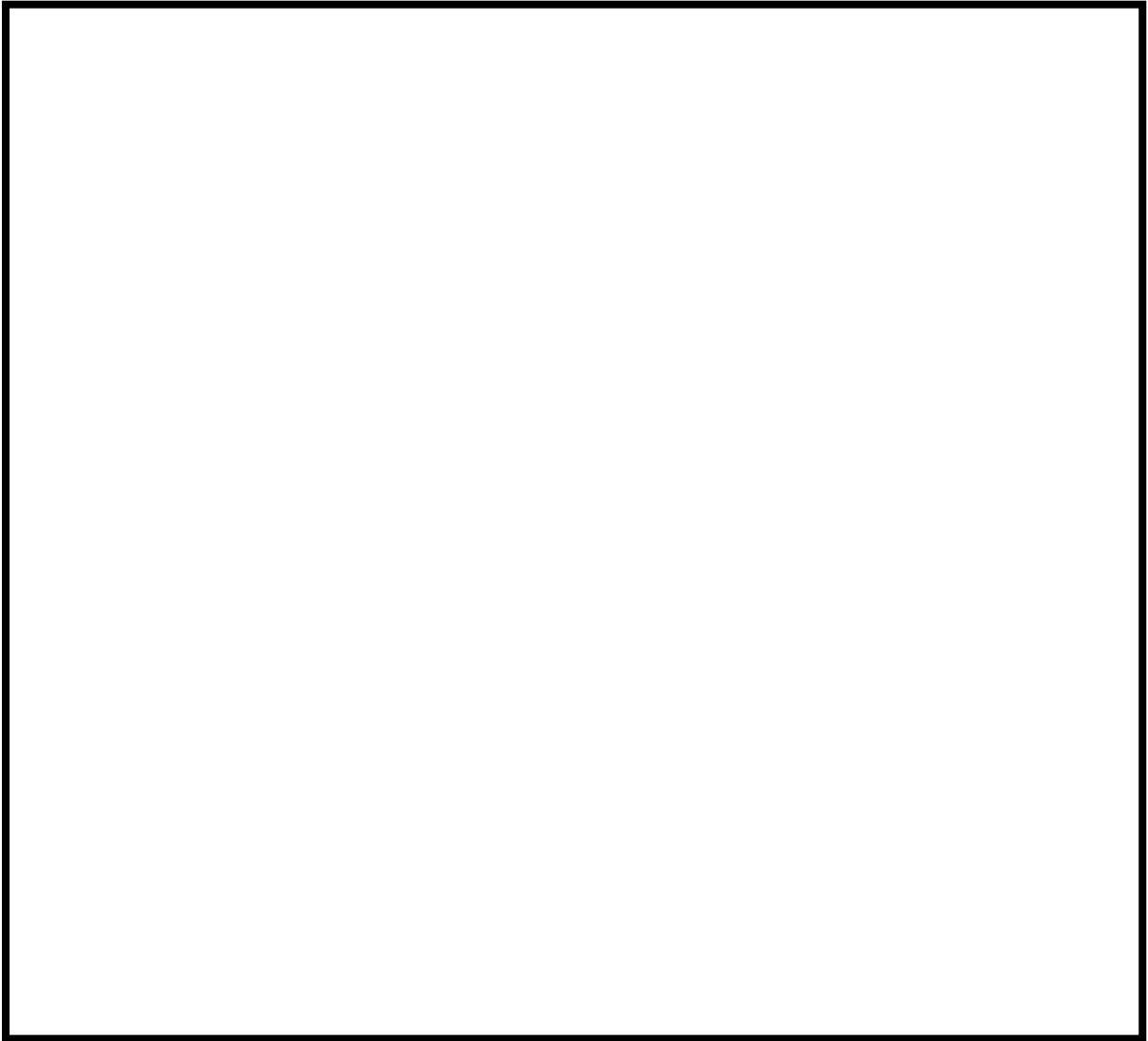
大型民間航空機墜落位置	大型軍用航空機墜落位置
小型民間航空機墜落位置	小型軍用航空機墜落位置

第3-2図 各航空機の墜落位置（7号炉）

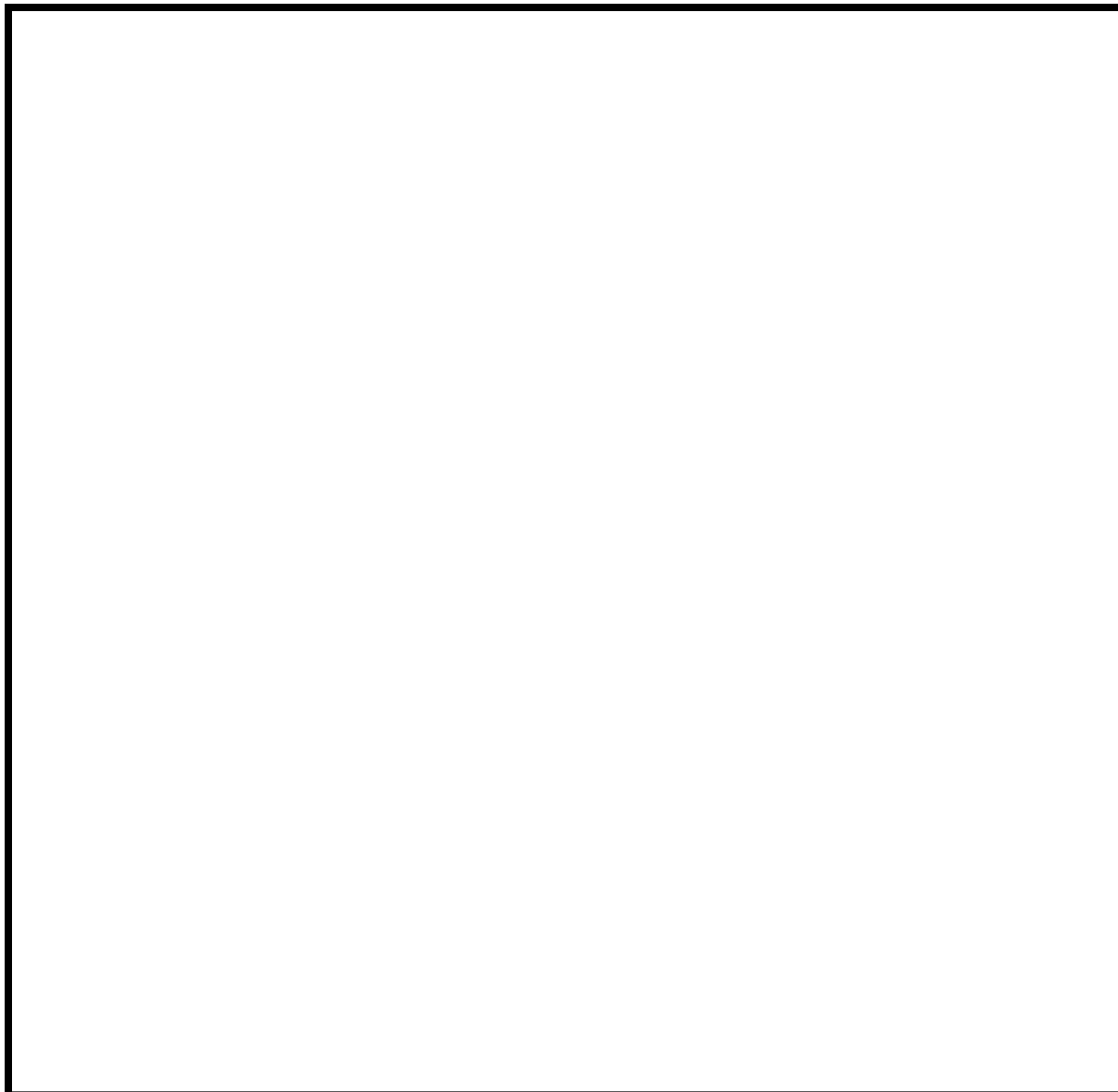
以上の結果より、各航空機の墜落位置から算出した原子炉施設との離隔距離は、「添付資料-7 原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災について」と同等もしくは、それ以上であることから、発電用原子炉施設への熱影響は既評価と同等もしくは包絡されるものと評価する。

### (3) 危険物タンクとの重畳

航空機火災が発生した場合に重畳を考慮する危険物タンクを検討する。航空機墜落が $10^{-7}$ [回/炉・年]となる航空機落下位置とその周辺の危険物施設位置を第3-3図および第3-4図に示す。



第3-3図 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置（6号炉）



#### 第3-4図 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置（7号炉）

第3-3図および第3-4図より、各航空機の墜落位置から算出した発電用原子炉施設との離隔距離は、「添付資料－7 原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災について」と比較し、同等もしくは、数十メートル程度長くなっていること、最も厳しいケースとして、6号炉では、5号炉軽油タンク2台火災と大型軍用航空機（KC-767）火災が重畳すること、7号炉では、6号炉軽油タンク2台火災と小型軍用航空機（AH-1S）火災が重畳することにより変わらないことから、原子炉施設への熱影響は既評価と同等もしくは包絡されるものと評価する。

#### 4. 航空機墜落火災による熱影響の評価

以上により、「航空機落下事故に関するデータ（平成28年6月 NRA技術報告）」のデータを反映した評価は、「添付資料－7 原子力発電所の敷地内への航空機墜

落による火災について」における熱影響評価と同等もしくは包絡される結果となることを確認した。

## 延べ飛行距離について

延べ飛行距離は、平成 5 年～平成 24 年の「航空輸送統計年報、第 1 表 総括表、1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内便のみの合計値とした。

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

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

第 1 表 運航距離

	日本国機の運行距離 (飛行回・k m)
平成 5 年	326, 899, 203
平成 6 年	343, 785, 576
平成 7 年	380, 948, 123
平成 8 年	397, 146, 610
平成 9 年	420, 920, 228
平成 10 年	449, 784, 623
平成 11 年	459, 973, 069
平成 12 年	480, 718, 878
平成 13 年	489, 803, 107
平成 14 年	498, 685, 881
平成 15 年	519, 701, 117
平成 16 年	517, 485, 172
平成 17 年	527, 370, 038
平成 18 年	555, 543, 154
平成 19 年	559, 797, 874
平成 20 年	554, 681, 669
平成 21 年	544, 824, 157
平成 22 年	548, 585, 258
平成 23 年	555, 144, 327
平成 24 年	608, 215, 704
合 計	9, 740, 013, 768

## 航空機墜落による火災の影響評価に用いたデータについて

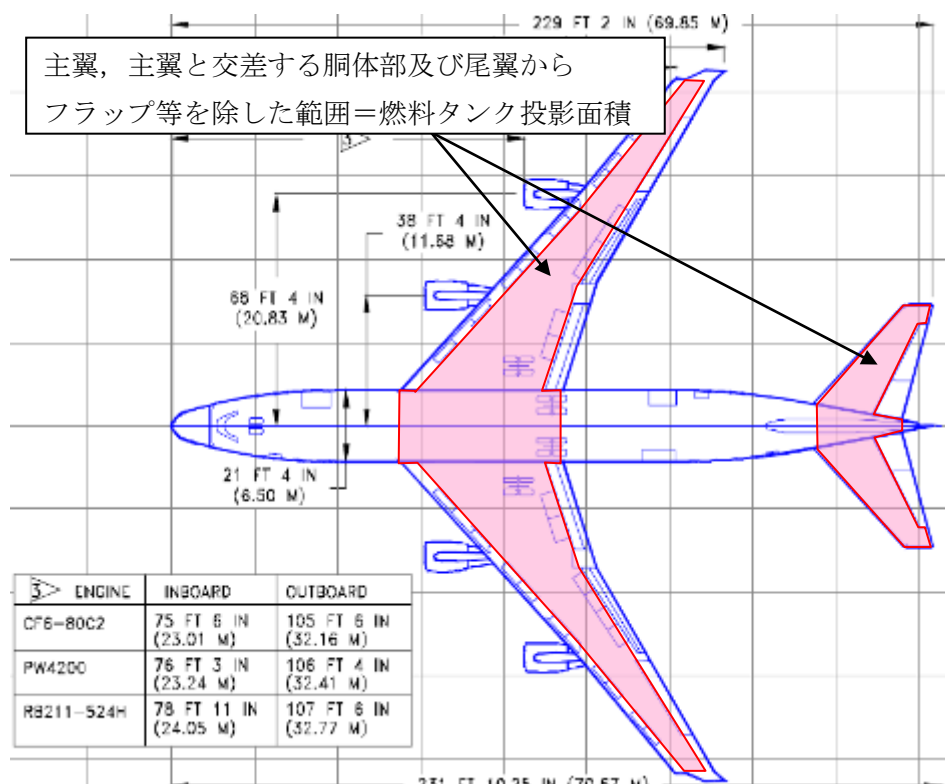
## 1. 航空機の仕様について

第 1-1 表 航空機の仕様

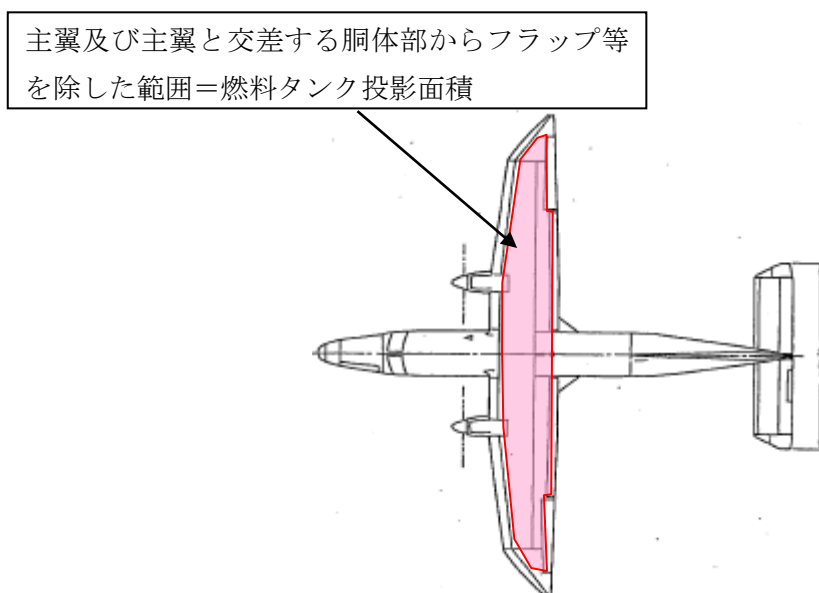
項目	大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
想定する航空機	B747-400	Do228-200	KC-767	AH-1S
燃料の種類	Jet A-1	Jet A-1	JP-4	JP-4
燃料量[m <sup>3</sup> ]	216.84 <sup>1)</sup>	2.386 <sup>2)</sup>	145.033 <sup>3)</sup>	0.98 <sup>2)</sup>
燃料タンク面積[m <sup>2</sup> ]	606 <sup>4)</sup>	26 <sup>5)</sup>	281 <sup>6)</sup>	12 <sup>7)</sup>

- 1) ボーイング社ホームページ“Technical Characteristics Boeing 747-400”に記載の値
- 2) 日本航空機全集 2013, (鳳文書林出版販売(株)発行)記載値
- 3) 世界航空機年鑑 2012-2013 に記載の燃料重量及び燃料密度(NUREG-1806)から算出した値
- 4) ボーイング社ホームページ資料「747-400 Airplane Characteristics for Airport Planning」の機体図面より, 主翼, 主翼と交差する胴体部及び尾翼の面積からフラップ等の面積を除いた面積が燃料タンク面積と同等と想定し算出した値(第 1-1(a)図)。
- 5) 日本航空機全集 2013 に記載の図面から, 主翼及び主翼と交差する胴体部の面積からフラップ等の面積を除いた面積が燃料タンク面積と同等と想定し算出した値(第 1-1(b)図)
- 6) ボーイング社ホームページ資料「767 Airplane Characteristics for Airport Planning」の機体図面より, KC-767 のベースとなっている航空機 B767-200ER の主翼, 主翼と交差する胴体部および補助燃料タンクが搭載される床下貨物室の面積からフラップ等の面積を除いた面積を燃料タンク面積として算出した値(第 1-1(c)図)
- 7) 日本航空機全集 2013 に記載の図面から, 機体の投影面積を燃料タンク投影面積と同等と想定し算出した値(第 1-1(d)図)

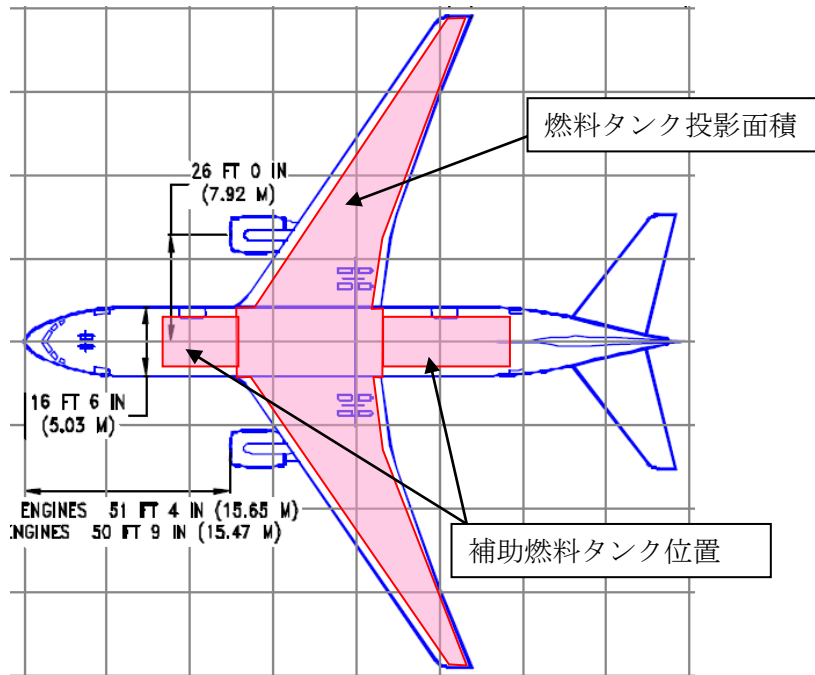




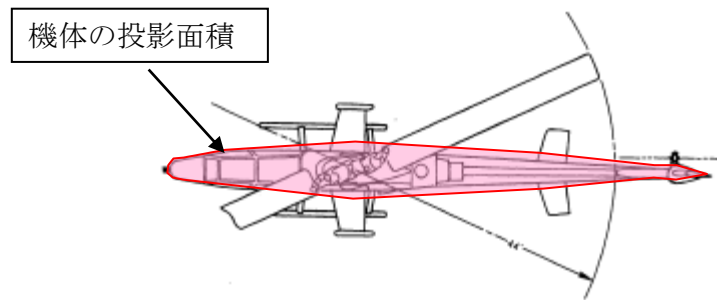
第 1-1(a) 図 燃料タンク 投影面積 (B747-400)  
(出典 : 747-400 Airplane Characteristics for Airport Planning)



第 1-1(b) 図 燃料タンク 投影面積 (Do228-200)  
(出典 : 日本航空機全集 2013)



第 1-1(c) 図 燃料タンク 投影面積(KC-767)  
 (出典 : 767 Airplane Characteristics for Airport Planning)



第 1-1(d) 図 燃料タンク 投影面積(AH-1S)  
 (出典 : 日本航空機全集 2013)

## 2. 燃料物性値について

ジェット燃料は、JIS 規格では 1 号の灯油型（低析出点）、2 号灯油型および 3 号広範囲沸点型（ガソリン型）の 3 種類があり、ASTM 規格の Jet A-1, Jet A, Jet B に相当する。また、MIL 規格では、JP-4(ガソリン型)、JP-5（灯油型）や JP-8（灯油型）があり、日本の民間航空機では安全性の高い 1 号（灯油型）が使用されており<sup>※1</sup>、軍用航空機では JP-4 が使われている<sup>※2</sup>。よって、民間航空機の燃料の種類は Jet A-1（灯油型）、軍用航空機は JP-4 とする。

火災影響評価において使用する燃料物性値のうち、放射発散度および質量低下速度については、Jet A-1 燃料に関する明確な知見がない。このため、Jet A-1 は灯油型であることから、放射発散度は灯油の値を採用した。

また、Jet A-1 の質量低下速度、密度については、NUREG-1805 において、JP-4、JP-5 の質量低下速度、密度が与えられていることから、同じ灯油型である JP-5 の値を採用した。なお、JP-5 の方が JP-4 より燃焼速度が遅く、燃焼継続時間が長くなるので保守的である。

軍用航空機の燃料（JP-4）は、ガソリン系の燃料であることから、放射発散度はガソリン・ナフサの値を採用し、質量低下速度、密度は、NUREG-1805 の JP-4 の値を採用した。

※1：公益社団法人 石油学会 HP

※2：石油便覧 JX 日鉱日石エネルギーHP

第 2-1 表 評価対象航空機の燃料物性値

項目	大型	小型	大型	小型
	民間航空機	民間航空機	軍用航空機	軍用航空機
想定する航空機	B747-400	Do228-200	KC-767	AH-1S
燃料の種類	Jet A-1	Jet A-1	JP-4	JP-4
放射発散度[kW/m <sup>2</sup> ]	50 <sup>1)</sup>	50 <sup>1)</sup>	58 <sup>2)</sup>	58 <sup>2)</sup>
質量低下速度[kg/m <sup>2</sup> ・s]	0.054 <sup>3)</sup>	0.054 <sup>3)</sup>	0.051 <sup>4)</sup>	0.051 <sup>4)</sup>
燃料密度[kg/m <sup>3</sup> ]	810 <sup>3)</sup>	810 <sup>3)</sup>	760 <sup>4)</sup>	760 <sup>4)</sup>
燃焼速度[m/s]	6.666×10 <sup>-5</sup>	6.666×10 <sup>-5</sup>	6.710×10 <sup>-5</sup>	6.710×10 <sup>-5</sup>

1) 評価ガイド 附属書 B における灯油の値

2) 評価ガイド 附属書 B におけるガソリン・ナフサの値

3) NUREG-1805, Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program に記載の JP-5(灯油型)の値

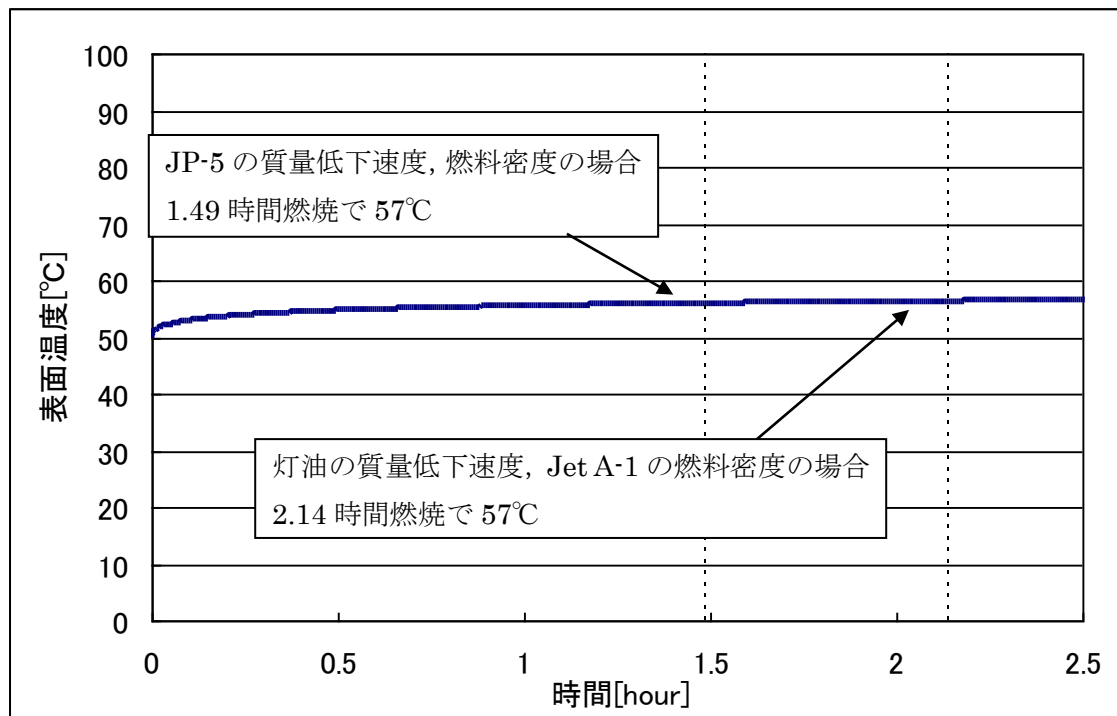
4) NUREG-1805, Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program 5 に記載の JP-4(ガソリン型)の値

NUREG-1805 より抜粋。

第 2-2 表 軍用航空機の燃料物性値

種類	質量低下速度 [kg/m <sup>2</sup> ・s]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	燃焼速度 [m/s]
JP-4 (ガソリン型)	0.051	760	$6.710 \times 10^{-5}$
JP-5 (灯油型)	0.054	810	$6.666 \times 10^{-5}$

また、質量低下速度を灯油の値(0.039kg/m<sup>2</sup>・s)とし、密度を JetA-1 の値の最大値(840kg/m<sup>3</sup>)とした場合、燃焼速度は、 $4.644 \times 10^{-5}$ [m/s]となり、燃焼継続時間は2.14時間となり、JP-5 の値を採用した場合の1.49時間に比べ約0.65時間長くなるが、2.14時間であった場合でも外壁面の温度は約57℃であり、JP-5 で評価した場合と相違ない。



第 2-1 図 航空機火災影響評価の外壁面の温度推移

ばい煙および有毒ガスの影響評価について

## 1. はじめに

外部火災により発生するばい煙および有毒ガスについては、火災による上昇気流により上空に運ばれ、発電所近傍に滞留することはない。そのため、ばい煙および有毒ガスが、換気空調系の外気取入口から建屋内に進入する可能性は小さいと考える。万一、高濃度のばい煙および有毒ガスが建屋内に進入することを想定し、以下の通り評価を行った。

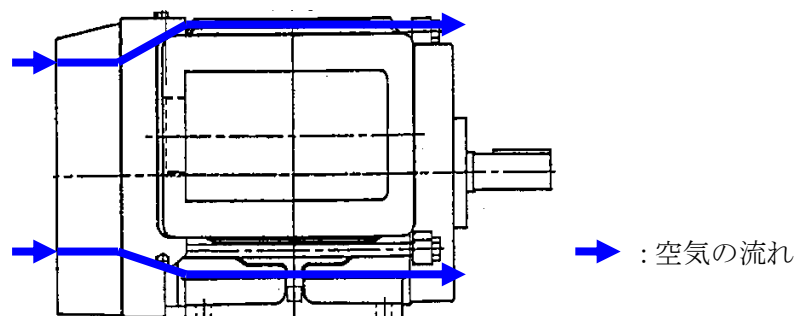
## 2. 評価対象

ばい煙の影響が想定される施設として、設備内にばい煙を含んだ外気を取り込む可能性のある機器、煙や埃に対して脆弱な設備、建屋外部に開口部を有する設備について影響評価を実施する。また、建屋内にばい煙及び有毒ガスを含んだ外気が取り込まれた場合の居住性の観点から評価を実施する。評価対象は以下のとおり。

第 2-1 表 評価対象

分類	影響評価設備
換気空調系で給気されるエリアの設置機器	非常用ディーゼル発電機 安全保護系
建屋外部に開口部を有する設備	非常用ディーゼル発電機排気口
居住性への影響	中央制御室 緊急時対策所

なお、原子炉補機冷却海水ポンプ電動機は、タービン建屋内に配置しており、直接ばい煙を取り込むことはなく影響はない。また、燃料移送ポンプ電動機は、屋外に設置しているが、電動機内部に直接外気を取り込まない全閉外扇構造の冷却方式であり、外気を直接電動機内部に取り込まない構造であることから影響はない(第 2-1 図)。



第 2-1 図 燃料移送ポンプ電動機外形図

### 3. 評価結果

#### 3.1 換気空調系設備で給気されるエリアの設置機器

外気を取り入れている空調系統として、原子炉建屋、ディーゼル発電機電気品区域、中央制御室、コントロール建屋計測制御電源盤区域、海水熱交換器区域の換気空調系がある（第 3.2-1(a)(b)(c)図）。

これらの換気空調系の外気取入経路には、フィルタ（11 種試験粉体（JIS Z 8901）粒径約  $2\mu\text{m}$  に対して 80%以上を捕獲する性能）を設置しているため、ばい煙が外気取入口に到達した場合であっても、一定以上の粒径のばい煙はフィルタにより進入を阻止出来る。

上記系統のうち、外気取入ダンパを設置し再循環運転が可能である中央制御室換気空調系については、ばい煙の進入が想定される場合には、外気取り入れダンパを閉止し、再循環運転を行うことにより、ばい煙の進入を阻止出来る。それ以外の換気空調系については、空調ファンを停止することでばい煙の進入を阻止出来る。

#### <非常用ディーゼル発電機>

非常用ディーゼル発電設備は、換気空調系で給気されるエリアに設置していることから、空調ファンを停止することでばい煙の進入を阻止出来る。

フィルタの入口と出口間の差圧を検知できる差圧感知計を監視し、差圧が上昇しフィルタが目詰まりした場合はフィルタの交換が可能である。

なお、非常用ディーゼル機関は吸気系統から外気を取り入れているため、機関内にばい煙が流入し、機関燃焼を阻止することが考えられるが、ディーゼル機関への外気取入経路にはフィルタ（11 種試験粉体（JIS Z 8901）粒径約  $2\mu\text{m}$  に対して 80%以上を捕獲する性能）を設置していることから、一定以上の粒径のばい煙粒子が捕獲され、フィルタにより捕集されなかったばい煙粒子が機関内へ送気される。フィルタでは、粒径が数  $\mu\text{m}$  程度の粒子が捕集され、それ以下のばい煙が機関内に送気されるが、シリンダまでの通気流路（過給器、空気冷却器等）の隙間より小さいことから閉塞に至ることはない（第 3.2-2 図）。また、通常運転においても燃料油（軽油）の燃焼に伴うばい煙が発生していることから、機関に損傷を与えることや運転機能を阻害することはない。

#### <安全保護系>

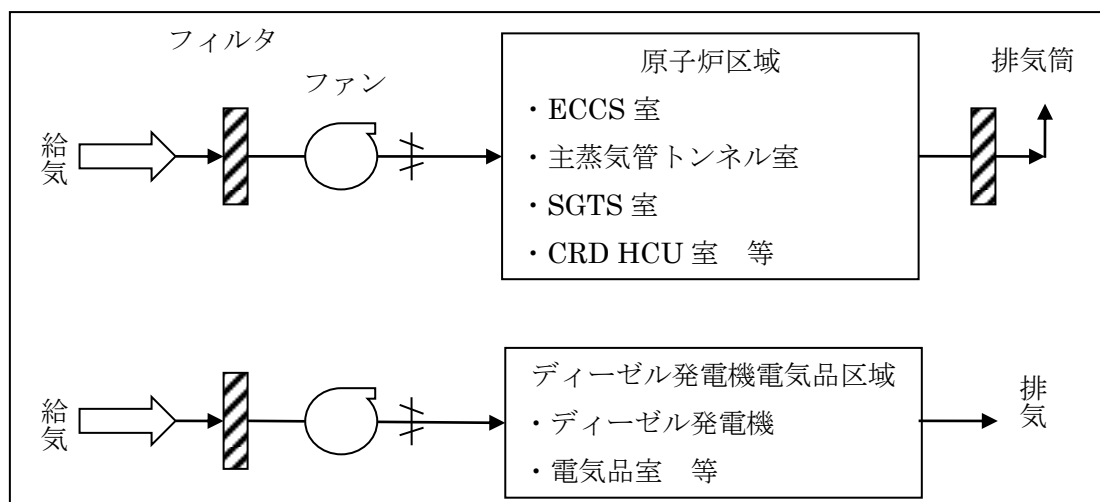
安全保護系設備は、現場盤が非常用電気品室、安全保護系盤が中央制御室に設置してある。非常用電気品室への外気取入経路にはフィルタ（11 種試験粉体（JIS Z 8901）粒径約  $2\mu\text{m}$  に対して 80%以上を捕獲する性能）を設置していることから、一定以上の粒径のばい煙については進入を阻止することが可能である。フィルタにより捕集しきれなかったばい煙等が非常用電気品室に進入した場合において

も、空調ファンを停止することでばい煙の進入を阻止することが可能である。また、中央制御室への外気取入経路にはフィルタ（11種試験粉体（JIS Z 8901）粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して80%以上を捕獲する性能）を設置していることから、一定以上の粒径のばい煙については進入を阻止することが可能である。フィルタにより捕集しきれなかったばい煙等が中央制御室内に進入する可能性がある場合、及び中操内においてばい煙等が流入したことを煙や異臭で確認した場合等は、当直長の指示により、非常時モードへ切り替えることにより、隔離が可能であり安全保護系設備に影響はない（第3.2-3図、第3.2-4(a)(b)図）。

なお、中央制御室に侵入する可能性のあるばい煙の粒径は、概ね $2\mu\text{m}$ 以下の細かな粒子であると推定されるが、計装盤等において、数 $\mu\text{m}$ 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、これらの部品はモールド（樹脂）で保護されているため、ばい煙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あることから、ばい煙が付着しても、直ちに短絡等を発生させることはない。したがって、万が一、細かな粒子のばい煙が盤内に侵入した場合においても、ばい煙の付着等により短絡等を発生させる可能性はない。

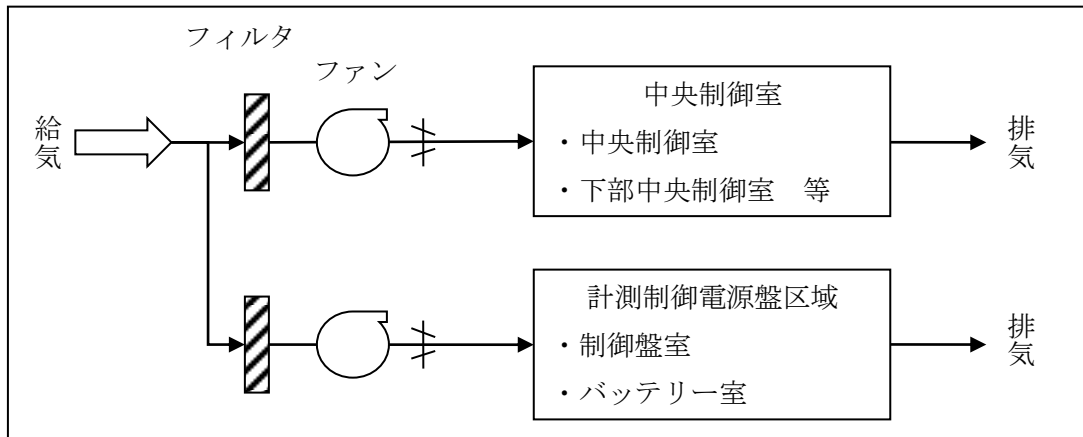
### 3.2 建屋外部に開口部を有する設備

屋外部に開口部を有する設備として、非常用ディーゼル発電機の排気口があるが、仮にばい煙が配管等の内部に侵入した場合においても、その動作時には侵入したばい煙は吹き出されることから、その機能に影響を及ぼすことはない。（第3.2-5図）なお、主排気筒も同様にばい煙が配管等の内部に侵入した場合においても、その動作時には侵入したばい煙は吹き出されることから、その機能に影響を及ぼすことはない。

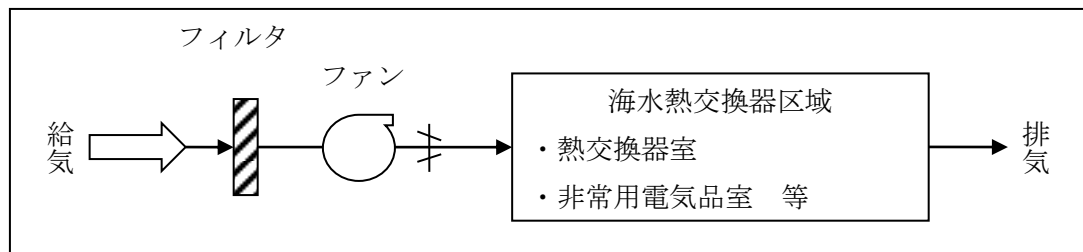


第3.2-1(a)図 原子炉建屋換気空調系

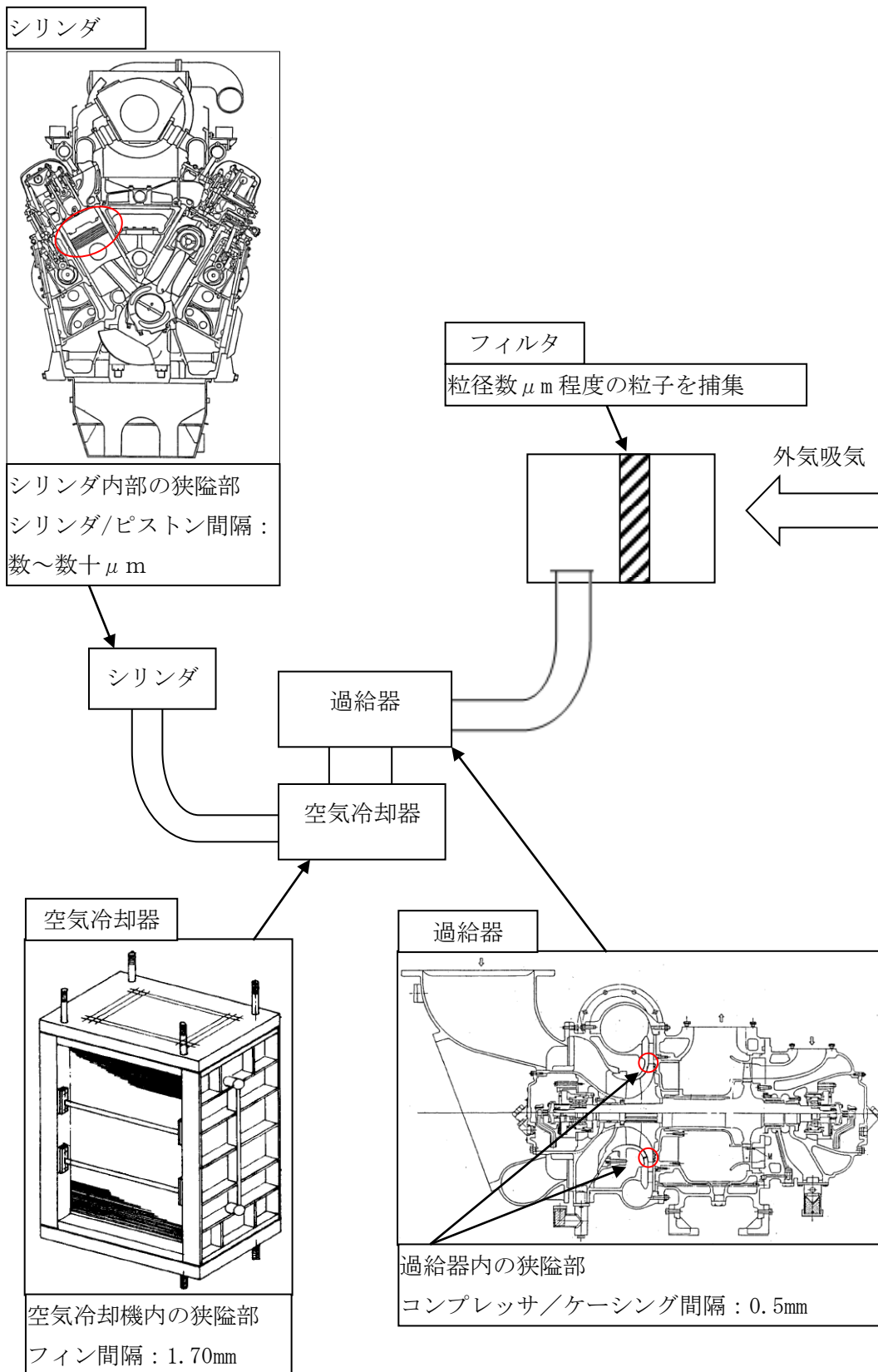




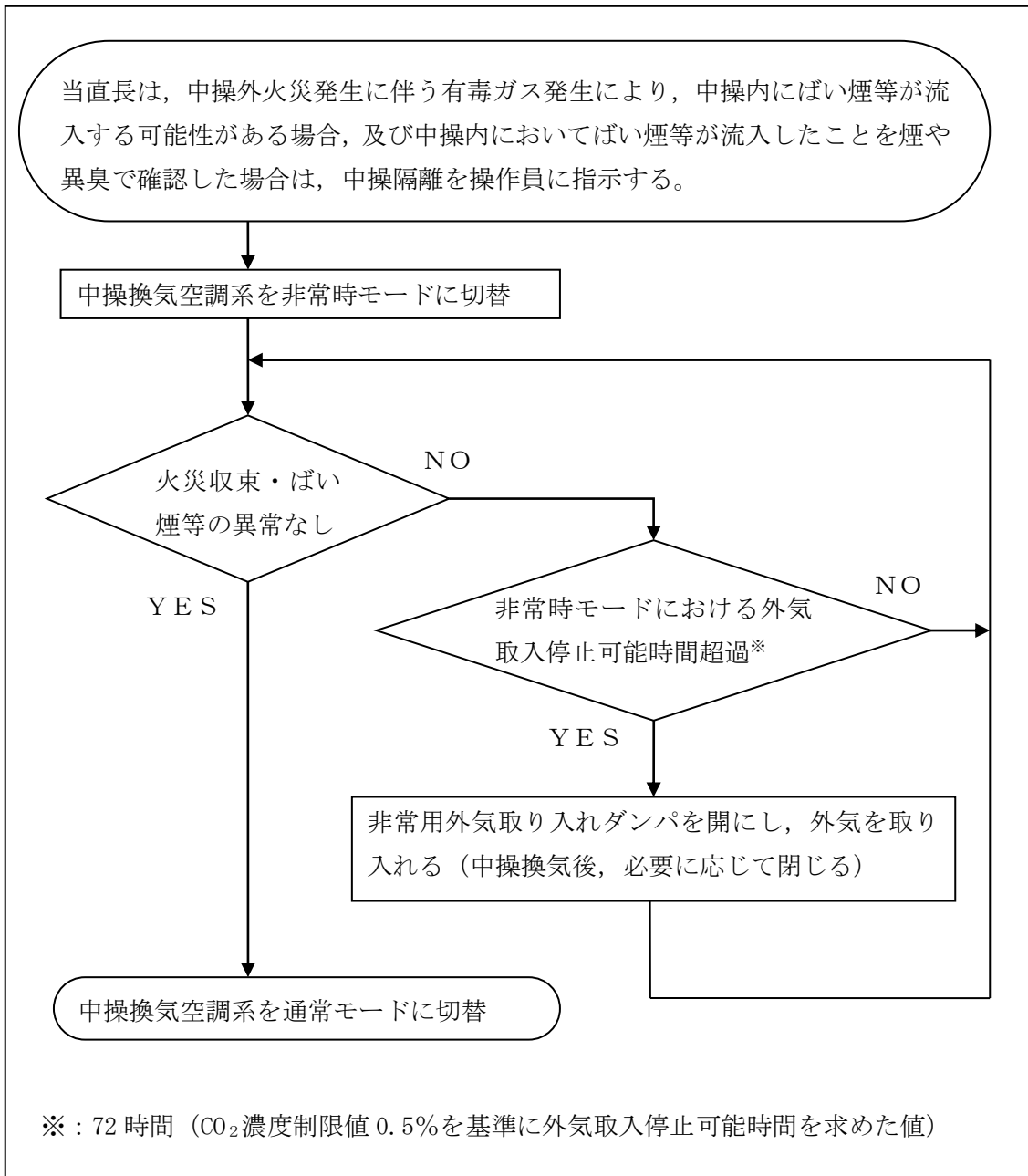
第 3. 2-1 (b) 図 コントロール建屋換気空調系



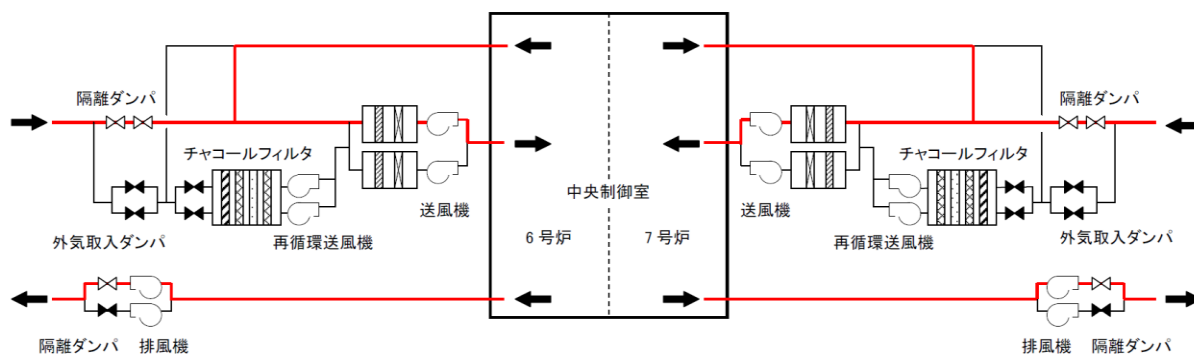
第 3. 2-1 (c) 図 タービン建屋換気空調系



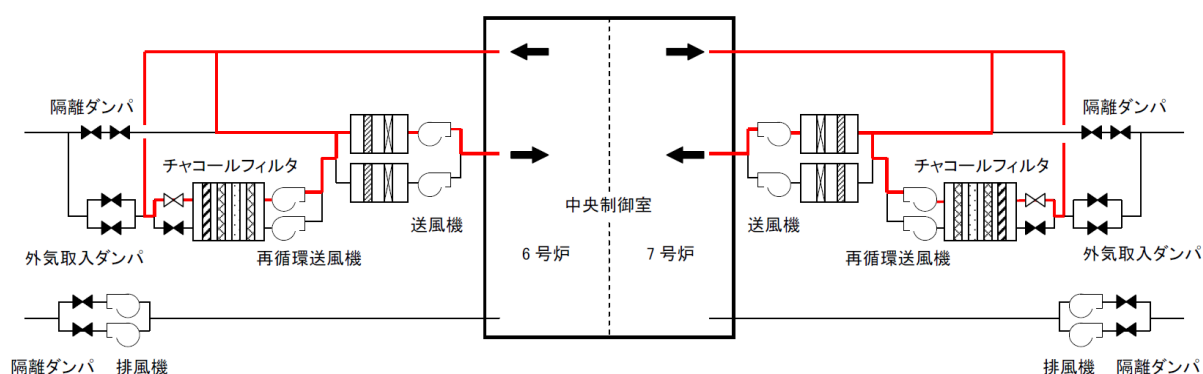
第 3.2-2 図 ディーゼル機関吸気系統概略図



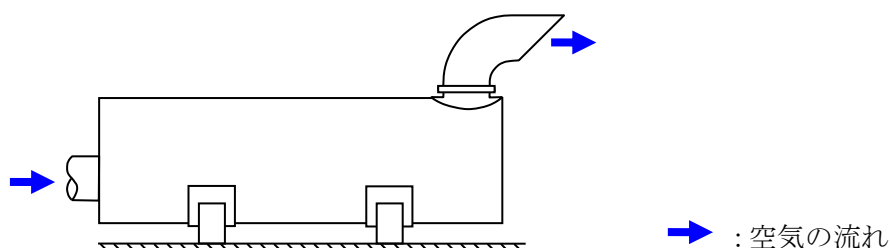
第 3.2-3 図 中操外火災発生に伴う中操隔離手順概要フロー



第 3.2-4(a) 図 通常モードの状態 (中央制御室)



第 3.2-4(b) 図 非常時モードの状態 (中央制御室)



第 3.2-5 図 非常用ディーゼル発電機排気口外形図

### 3.3 居住性への影響

中央制御室換気空調設備は、外気を遮断し、再循環させる非常時モードに切り替えることができる。外気との遮断が長期にわたり室内の空気が悪くなった場合は、外気取入モードに切り換え、外気を取り入れることができる。また、外気からの空気取り込みを一時的に停止した場合に、活動に支障のない酸素濃度の範囲にあることを正確に把握するため、酸素濃度計を配備する。

外気取入遮断時の中央制御室内に滞在する運転員の操作環境の悪化防止のため、酸素濃度及び炭酸ガス濃度について評価を行い、中央制御室の居住性に影響がないことを確認した。

また、発電所敷地内で多量の油を内蔵する施設および中央制御室外気取入口までの距離が近い設備（軽油タンク、主変圧器、RIP-ASD 入力変圧器）からの火災を想定し、中央制御室内に進入する有毒物質（CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>）の最大濃度を判断基準(IDLH<sup>※</sup>)と比較することで、有毒ガスに対する評価を実施し、中央制御室の居住性に影響が無いことを確認した。

※: 30分暴露によって生命及び健康に対する即時の危険な影響を与える濃度限度値であり、脱出を妨げる目や呼吸器への刺激の予防も考慮されている

### 3.3.1 中央制御室内の二酸化炭素、酸素濃度の評価

外部火災時の6, 7号炉中央制御室の居住性の評価として、外気取入遮断時の中央制御室内に滞在する運転員の作業環境の劣化防止のため、二酸化炭素濃度および酸素濃度について評価を行った。なお、中央制御室内には、燃焼による二酸化炭素の排出や酸素を消費する機器はなく、非常用ディーゼル発電機の火災時に消火設備より二酸化炭素が放出されたとしても、中央制御室換気空調設備との系統分離および給排気口の位置的分散が図られており、中央操作室内に二酸化炭素が取り込まれることはないことから、在室人員の呼吸のみを想定し評価を行う。

#### (1) 二酸化炭素濃度評価

以下の通り二酸化炭素濃度について評価した。

##### a. 評価条件

- ・ 在室人員 20人<sup>※1</sup>
- ・ 中央制御室バウンダリ内体積 14640[m<sup>3</sup>]
- ・ 外気流入はないものとして評価する
- ・ 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）」）
- ・ 許容二酸化炭素濃度 0.5[%]  
（事務所衛生基準規則（昭和47年労働省令第43号、最終改正平成16年3月30日厚生労働省令第70号））
- ・ 呼吸による排出する二酸化炭素濃度 0.046[m<sup>3</sup>/h/人]  
（「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）」）
- ・ 評価期間は、各火災の燃焼継続時間を考慮し24時間<sup>※2</sup>とする

※1：6, 7号炉の運転員(18人)に余裕を持って20人とした。

※2：外部火災影響評価にて長期間の影響をもたらす、航空機墜落と軽油タンク火災の重畳を考慮すると、約23.2時間が火災の継続時間とな

ることから、24 時間で評価を実施した。

b. 評価結果

- ・ 外気遮断期間 t [hour] での二酸化炭素濃度 C [%]

$$C = (M \times N \times t) / V \times 100 + C_0$$

M : 呼吸による排出する二酸化炭素濃度 0.046 [m<sup>3</sup>/h/人]

N : 在室人員 20 [人]

V : 中央制御室バウンダリ内体積 14640 [m<sup>3</sup>]

C<sub>0</sub> : 初期炭酸ガス濃度 0.03 [%]

上記評価条件から求めた二酸化炭素濃度は、以下のとおりであり、30 時間外気取入れを遮断したままでも、運転員の作業環境に影響を与えない。

第 3.3.1-1 表 二酸化炭素濃度の時間変化

時間	6 時間	12 時間	24 時間
二酸化炭素濃度 [%]	0.07	0.11	0.18

(2) 酸素濃度評価

以下の通り酸素濃度について評価した。

a. 評価条件

- ・ 在室人員 20 人
- ・ 中央制御室バウンダリ内体積 14640 [m<sup>3</sup>]
- ・ 外気流入はないものとして評価する
- ・ 初期酸素濃度 20.95%  
(「空気調和・衛生工学便覧」の成人の呼吸気・肺胞気の組成の値を使用)
- ・ 酸素消費量 1.25ℓ/min/人  
(「空気調和・衛生工学便覧」の作業強度分類の中くらいの作業強度に対する酸素消費量の中央値を使用)
- ・ 許容酸素濃度 18%以上  
(酸素欠乏症等防止規則 (昭和 47 年労働省令第 42 号, 最終改正平成 15 年 12 月 19 日厚生労働省令第 175 号))
- ・ 評価期間は、各火災の燃焼継続時間を考慮し 24 時間とする

b. 評価結果

- ・ 中央制御室の初期酸素量 3067.08 [m<sup>3</sup>] = 14640 [m<sup>3</sup>] × 20.95%
- ・ 24 時間後の酸素濃度 20.7 [%]  
= (3067.08 [m<sup>3</sup>] - 1.25 [ℓ/min/人] × 10<sup>-3</sup> [m<sup>3</sup>/ℓ] × 20 [人] × 60 [min/h] ×

$$24[h]) / 14640[m^3] \times 100$$

上記評価条件から求めた酸素濃度は、以下のとおりであり、24 時間外気取入れを遮断したままでも、運転員の作業環境に影響を与えない。

第 3.3.1-2 表 酸素濃度の時間変化

時間	6 時間	12 時間	24 時間
酸素濃度 [%]	20.8	20.8	20.7

### 3.3.2 中央制御室に対する有毒ガス影響評価

#### (1) 評価の概要

発電所敷地内で多量の油を内蔵する施設および中央制御室外気取入口までの距離が近い設備からの火災を想定し、中央制御室内に侵入する有毒ガスの最大濃度を判断基準と比較することで、有毒ガスに対する中央制御室居住性の影響評価を実施する。

本評価では、石油コンビナートの防災アセスメント指針での判断基準と同様に、米国国立労働安全衛生研究所が定める IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) を採用する。この IDLH は、30 分暴露によって生命及び健康に対する即時の危険な影響を与える濃度限度値であり、脱出を妨げる目や呼吸器への刺激の予防も考慮されている。

#### (2) 評価対象物質及び固定設備

発電所敷地内で多量の油を内蔵する施設および中央制御室外気取入口までの距離が近い設備として軽油タンク、航空機及び変圧器を評価対象とし、第 2-1 表に評価対象施設および評価対象設備から外気取入口までの距離および火災燃焼面積を示す。また、火災によって発生する物質のうち、IDLH 対象物質である一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)および二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)を評価対象物質とする。軽油タンク、変圧器、航空機墜落位置および外気取入口の位置関係を第 2-1 図に示す。

第 3. 3. 2-1 表 評価対象施設と外気取入口までの距離および火災面積

火災発生場所	離隔距離 x [m]	排煙上昇高度 $\angle$ h [m]	火災面積 A [m <sup>2</sup> ]
軽油タンク	80	18.3	289
主変圧器	30	18.3	43
RIP 入力変圧器	11	5.1	9
大型民間航空機	218	18.3	606
小型民間航空機	134	18.3	27
大型軍用航空機	133	18.3	281
小型軍用航空機	109	18.3	12
航空機墜落と重畳の 可能性がある 6号炉軽油タンク	111	18.3	583

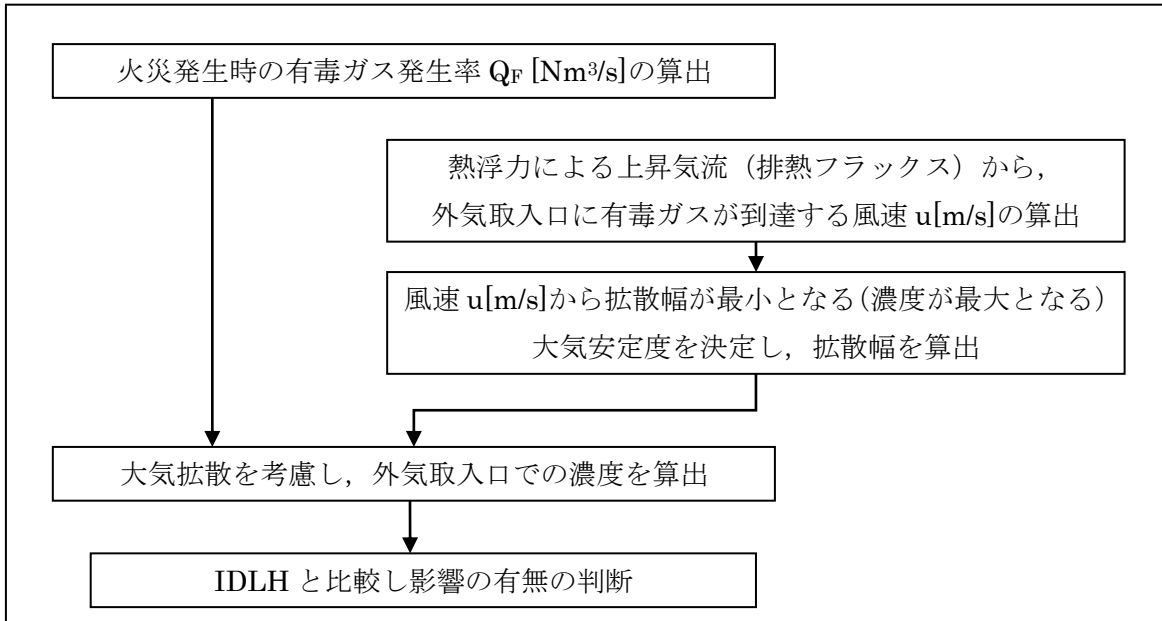


第 3. 3. 2-1 図 軽油タンク、航空機墜落、変圧器および外気取入口の位置関係

(3) 評価方法

火災時の有毒ガスの発生率、外気取入口に有毒ガスが到達する風速および大気拡散を考慮し、中央制御室外気取入口における有毒ガスの最大濃度を評価し、判断基準である IDLH と比較する。第 3. 3. 2-2 図に有毒ガス影響評価フローを示す。





第 3.3.2-2 図 有毒ガス影響評価フロー

a. 火災時の有毒ガスの発生率

火災時に発生する有毒ガス発生率は、燃料の元素組成に基づき、燃料 1kg 当たりの各有毒ガスの発生率に燃料消費速度を乗じて算出する。評価対象ガスの発生率  $Q_F$  [Nm<sup>3</sup>/s] は、次式を用いて計算する。計算結果を第 3.3.2-4 表にまとめる。

$$Q_F = Q_F' \times M$$

ここで、

$Q_F'$  : 燃料 1 kg 当たりのガスの発生率 [Nm<sup>3</sup>/kg]

$M$  : 燃料消費速度 [kg/s]

ただし、 $M = \rho \times A \times V$

$V$  : 液面降下速度 [m/s]

$A$  : 火災面積 [m<sup>2</sup>]

$\rho$  : 燃料密度 [kg/m<sup>3</sup>]

第 3.3.2-2 表 有毒ガス発生率

火災発生場所	$Q_F'$			
	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
軽油タンク・変圧器	$2.6 \times 10^{-2}$ ※1	$1.5 \times 10^0$ ※1	$1.1 \times 10^{-3}$ ※1	$5.3 \times 10^{-4}$ ※1
航空機	$6.1 \times 10^{-1}$ ※2	$1.8 \times 10^0$ ※3	$4.2 \times 10^{-4}$ ※2	$2.8 \times 10^{-3}$ ※2

※1 : Smoke Plume Trajectory from In Situ Burning of Crude Oil in Alaska より、燃料 1kg 当たりのガス発生率を標準状態体積に換算

※2 : Air Quality Procedures For Civilian Airports & Air Force Bases より、

燃料 1kg 当たりのガス発生率を標準状態体積に換算

※3：環境省，温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルより，  
燃料 1kg 当たりのガス発生率を標準状態体積に換算

第 3.3.2-3 表 燃料消費速度算出時の入力値

火災発生場所	液面降下速度[m/s]	燃料密度[kg/m <sup>3</sup> ]
軽油タンク・変圧器	$5.5 \times 10^{-5}$ ※1	875.7 ※2
民間航空機	$6.666 \times 10^{-5}$ ※3	810 ※3
軍用航空機	$6.710 \times 10^{-5}$ ※3	760 ※3

※1：石油コンビナートの防災アセスメント指針 消防庁特殊災害室 平成 13 年 3 月

※2：揮発油等の品質の確保等に関する法律（昭和五十一年十一月二十五日法律第八十八号）「第二条第八項」

※3：NUREG-1805 より

燃料 1kg 当たりのガスの発生率は，各文献に掲載されている単位重量当たりのガス発生率を単位換算することにより求めている。ただし，単位重量当たりのガス発生率は幅をもった値ではないため，保守性の観点からガス発生率が最大となる燃料を選定している。

変圧器の場合，絶縁油は重油および軽油同様に鉱物油を原料として精製されていることから，より高いガス発生率となる軽油の数値を用いている。また，航空機の場合，燃料は JP-8 を選定し，燃料 1kg 当たりのガス発生率が最大となるようにしている。

第 3.3.2-4 表 評価対象ガスの発生率の計算結果

火災発生場所	評価対象ガスの発生率 $Q_F$ [Nm <sup>3</sup> /s]			
	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
軽油タンク	$3.7 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^1$	$1.6 \times 10^{-2}$	$7.5 \times 10^{-3}$
主変圧器	$5.5 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^0$	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$
RIP 入力変圧器	$1.2 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-1}$	$5.0 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-4}$
大型民間航空機	$2.0 \times 10^1$	$6.0 \times 10^1$	$1.4 \times 10^{-2}$	$9.2 \times 10^{-2}$
小型民間航空機	$9.0 \times 10^{-1}$	$2.7 \times 10^0$	$6.2 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-3}$
大型軍用航空機	$8.8 \times 10^0$	$2.7 \times 10^1$	$6.1 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-2}$
小型軍用航空機	$3.8 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^0$	$2.6 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$
重畳の可能性のある 6号炉軽油タンク	$7.5 \times 10^{-1}$	$4.5 \times 10^1$	$3.3 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$

b. 外気取入口に有毒ガスが到達する風速

火災によって発生する有毒ガスは燃焼によって高温となり熱浮力によって上昇する。したがって、以下の Briggs 式（排煙上昇過程式）を用いて、有毒ガス発生源と外気取入口との距離と高度差から、外気取入口に有毒ガスが到達する風速  $u$ [m/s] を求める。風速と熱浮力の関係を第 3.3.2-2 図に示し、風速の計算結果を第 3.3.2-6 表にまとめる。

$$u = 1.6F^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta h^{-1} \cdot x^{\frac{2}{3}}$$

ここで、

$\Delta h$  : 排煙上昇高度[m] = 火災発生源と外気取入口の高度差

$F$  : 排熱フラックス[m<sup>4</sup>/s<sup>3</sup>] = 0.037 ·  $Q_H$

$Q_H$  : 排出熱量[kcal/s]

ただし、 $Q_H = q / (\rho / 1000) \times M$

$Q$  : 発熱量[kcal/l] ※

$M$  : 燃料消費速度[kg/s]

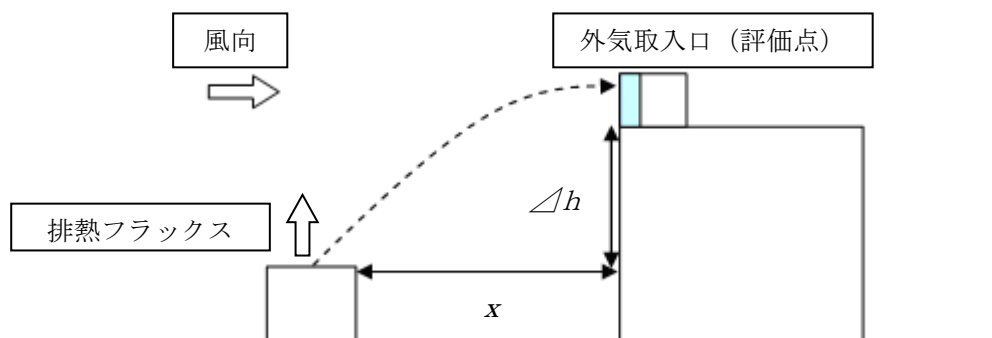
$\rho$  : 燃料密度[kg/m<sup>3</sup>]

$x$  : 離隔距離[m]

※ : 2005 年度以降適用する標準発熱量の検討結果と改定値について（経済産業省資源エネルギー庁 平成 19 年 5 月）

第 3.3.2-5 表 燃料の発熱量

火災発生場所	q 発熱量[kcal/l]
軽油タンクおよび変圧器	9004 kcal/l (37.7 MJ/l)
航空機	8765 kcal/l (36.7 MJ/l)



第 3.3.2-2 図 風速と熱浮力の関係（イメージ）

なお、Briggs の排煙上昇過程式の適用条件※は、以下のとおり。

$$x \leq x^*$$

$$x^* = 2.16F^{2/5} \cdot \Delta h^{3/5}$$

ここで、

$x$  : 離隔距離[m]

$x^*$  : 浮力の効果が薄れて大気乱流による拡散効果が支配的になり始める距離  
[m]

$F$  : 排熱フラックス[m<sup>4</sup>/s<sup>3</sup>]

$\Delta h$  : 排煙上昇高度[m] ( $\Delta h < 305\text{m}$ )

火災源ごとに  $x^*$  を求め、上記条件を満たしていることを確認しており、Briggs の排煙上昇過程式を用いて排煙高さが外気取入口高さと同じになる風速を求めることは妥当である。

※ : G. A. Briggs, “Plume Rise”, U. S. Atomic Energy Commission, 1969

第 3.3.2-6 表 風速の計算結果

火災発生場所	風速 $u$ [m/s]
軽油タンク	28.2
主変圧器	7.7
RIP 入力変圧器	8.4
大型民間航空機	77.5
小型民間航空機	19.3
大型軍用航空機	43.4
小型軍用航空機	12.8
重畳の可能性のある 6号炉軽油タンク	44.3

c. 火災によって発生する有毒ガスの大気拡散

外気取入口に到達する有毒ガスの濃度は、大気拡散を考慮しガウスプルームモデルの拡散式を用いて評価する。

火災地点から放出された有毒ガスは、中央制御室の外気取入口の方向に向かう風によって、風下直線方向に拡散していくものとし、先に求めた評価対象ガスの発生率および外気取入口に有毒ガスが到達する風速と、以下に示すガウスプルームモデルの拡散式を用いて、外気取入口の空気中に含まれる有毒ガスの濃度を計算する。なお、外気取入口での空気中の濃度は、下記数式の放出点の高さ  $H$  と評価点の高さ  $Z$  において  $H=Z=0$ ,  $Y=0$  として中心軸上最大濃度を計算する。計算結果を第 3.3.2-9 表にまとめる。

$$\chi(X, Y, Z) = \frac{Q_F}{2\pi u \sigma_Y \sigma_Z} \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_Y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(Z-H)^2}{2\sigma_Z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(Z+H)^2}{2\sigma_Z^2}\right] \right\}$$

ここで、

$\chi(X, Y, Z)$  : 評価点 (X, Y, Z) の有毒ガスの濃度 [g/m<sup>3</sup>]

u : 外気取入口に有毒ガスが到達するとした場合の風速 [m/s]

$\sigma_Y$  : 水平方向の拡散幅 [m]

$\sigma_Z$  : 鉛直方向の拡散幅 [m]

$Q_F$  : 火災によって発生する有毒ガスの発生率 [Nm<sup>3</sup>/s]

H : 放出源の有効高さ [m]

$$\sigma_Y = 0.67775 \theta_{0.1} \cdot (5 - \log x) \cdot x, \quad \sigma_Z = \sigma_1 \cdot x^{a_1 + a_2 \log x + a_3 (\log x)^2}$$

ただし、x の単位は km とし、

x が 0.2km 以遠の場合、 $\theta_{0.1}$ 、 $\sigma_1$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  は以下の通り。

第 3.3.2-7 表 大気安定度と入力値 (離隔距離が 0.2km 以遠)

大気安定度	$\theta_{0.1}$	$\sigma_1$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
A	50	768.1	3.9077	3.898	1.7330
B	40	122.0	1.4132	0.49523	0.12772
C	30	58.1	0.8916	-0.001649	0.0
D	20	31.7	0.7626	-0.095108	0.0
E	15	22.2	0.7117	-0.12697	0.0
F	10	13.8	0.6582	-0.1227	0.0

x が 0.2km 未満の場合は、 $\theta_{0.1}$ 、 $\sigma_1$ 、 $a_1$  は以下の通り。ただし、 $a_2$ 、 $a_3$  は 0 とする。

第 3.3.2-8 表 大気安定度と入力値 (離隔距離が 0.2km 未満)

大気安定度	$\theta_{0.1}$	$\sigma_1$	$a_1$
A	50	165	1.07
B	40	83.7	0.894
C	30	58	0.891
D	20	33	0.854
E	15	24.4	0.854
F	10	15.5	0.822

大気安定度は、発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針に記載のとおり、風速の範囲と日射や夜間の放熱の大小によって A-G に区分されるものであり、大気安定度 A が最も拡散しやすく G が最も拡散しにくい。本評価では、外気取入口に有毒ガスが到達するとした場合の風速 u [m/s] の中で、拡散幅が最小となる (濃

度が最大となる) より拡散しにくい大気安定度を選択する。風速と大気安定度の関係は以下の通りであり、本評価では第 3.3.2-10 表に示す通り風速は 6[m/s]以上であることから大気安定は C または D となり、より拡散しにくい大気安定度 D で評価を行う。

第 3.3.2-9 表 拡散幅の計算結果

火災発生場所	大気安定度	水平方向の 拡散幅 $\sigma_y$ [m]	鉛直方向の 拡散幅 $\sigma_z$ [m]
軽油タンク	D	6.6	3.8
主変圧器	D	2.6	1.6
RIP 入力変圧器	D	1.0	0.7
大型民間航空機	D	17.7	9.5
小型民間航空機	D	10.8	6.0
大型軍用航空機	D	11.2	6.2
小型軍用航空機	D	8.9	5.0
重畳の可能性のある 6号炉軽油タンク	D	8.9	5.0

第 3.3.2-10 表 風速, 日射量および放射収支量による大気安定度

風速 (U) m/s	日射量 (T) $\text{kw/m}^2$				放射収支量 (Q) $\text{kw/m}^2$		
	$T \geq 0.60$	$0.60 > T \geq 0.30$	$0.30 > T \geq 0.15$	$0.15 > T$	$Q \geq -0.020$	$-0.020 > Q \geq -0.040$	$-0.040 > Q$
$U < 2$	A	A-B	B	D	D	G	G
$2 \leq U < 3$	A-B	B	C	D	D	E	F
$3 \leq U < 4$	B	B-C	C	D	D	D	E
$4 \leq U < 6$	C	C-D	D	D	D	D	D
$6 \leq U$	C	D	D	D	D	D	D

#### (4) 評価結果

中央制御室外気取入口における有毒ガスの濃度を第 3.3.2-11 表にまとめる。なお、航空機墜落と軽油タンクの重畳火災については、重畳の可能性のある 6号炉軽油タンクと小型軍用航空機の濃度を足し合わせるにより求めた。第 4-1 表より、中央制御室外気取入口における有毒ガスの濃度が IDLH 以下であり、中央制御室の居住性が損なわれることがないことを確認した。

また、中央制御室に有毒ガスが進入してくる場合には、中央制御室の外気取り入れを遮断し、再循環させる非常時モードで運転することが可能であり、火災発生後 15 分程度\*で中央制御室への外気取り入れを停止し、非常時モードへ切り替えることが可能であることを確認した。

なお、火災（有毒ガス）の発生は、火災報知器（軽油タンク・主変圧器等）、振動や衝撃音（航空機墜落）、敷地境界監視用カメラ（森林火災）等により覚知できることに加え、中操外の火災発生に伴い、煙や異臭を確認した場合の当直長判断による中操隔離手順が操作手順書に定められている。これらの覚知・判断に時間を要するものではなく、迅速に対応することが可能である。

以上より、外部火災により有毒ガスが発生した場合において、中央制御室の居住性が損なわれることはない。

※：切り替えに要する一連の時間を実測したところ 15 分程度であった。

火報発生→現場確認→火災発生（ばい煙等の流入）を確認→非常時モードへ切替操作

第 3.3.2-11 表 中央制御室外気取入口における有毒ガス濃度

火災発生場所	CO 濃度 [ppm] (IDLH : 1,200)	CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm] (IDLH : 40,000)	SO <sub>2</sub> 濃度 [ppm] (IDLH : 100)	NO <sub>2</sub> 濃度 [ppm] (IDLH : 20)
軽油タンク	165	9,850	7.2	3.4
主変圧器	514	30,600	22.5	10.4
RIP 入力変圧器	598	35,600	26.1	12.1
大型民間航空機	490	1470	0.3	2.2
小型民間航空機	224	674	0.1	1.0
大型軍用航空機	915	2750	0.6	4.2
小型軍用航空機	206	619	0.1	0.9
航空機と軽油タンクの重畳	324	7,670	5.3	3.3

### 3.3.3 緊急時対策所に対する有毒ガス影響評価

森林火災及び近隣の産業施設の火災に伴い発生する有毒ガスに対しては、免震重要棟内緊急時対策所に対して、ばい煙等や異臭によって流入を確認した場合、一時的に外気からの空気を取り入れを停止し外気からの隔離ができる設計とし、有毒ガスの影響を受けないようにすると共に、酸素濃度計及び二酸化炭素濃度計により隔離中の居住性が維持されていることを確認できるようにする。隔離が長期間継続すると想定される場合には、居住性を確保するため、免震重要棟内緊急時対策所内にとどまる必要の無い人員については、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所等の有毒ガスの影響を受けない場所へ一時的に退避させる。また、外気遮断後のインリークを最小限にするため、不必要な空調設備の停止を行うこととする。それでもなお、インリークにより有毒ガスが流入した場合は、必要に応じて一時的に外気を取り入れて換気することとする。

5号炉原子炉建屋内緊急時対策所は、森林火災に伴い発生する有毒ガスに対しては、防火帯林縁からの離隔（約151m）を確保することにより影響を受けない設計とする。また近隣の産業施設の火災に伴い発生する有毒ガスに対しては、外気取入口（5号炉原子炉建屋3階北側に設置）への伝播経路が5号炉原子炉建屋等の構造物により遮られることにより、外気取入口に到達しないことから、影響を受けない設計とする。

航空機墜落による火災に伴い発生する有毒ガスに対しては、偶発的な航空機墜落に対して、互いに独立して分散配置した免震重要棟内緊急時対策所、5号炉原子炉建屋内緊急時対策所によって、柏崎刈羽原子力発電所の緊急時対策所機能が喪失しない設計とする。

### 3.3.4 免震重要棟内緊急時対策所内の二酸化炭素、酸素濃度の評価

外部火災時の緊急時対策所の居住性の評価として、外気取入遮断時の免震重要棟内緊急時対策所内に滞在する緊急時対策要員の作業環境の劣化防止のため、二酸化炭素濃度および酸素濃度について評価を行った。

なお、免震重要棟内緊急時対策所に設置しているガスタービン発電機の給気および排気は、緊急時対策所換気設備との系統分離および給排気口の位置的分散が図られており、免震重要棟内緊急時対策所内の二酸化炭素濃度や酸素濃度に影響を及ぼさないことから、在室人員の呼吸のみを想定し評価を行う。

#### (1) 二酸化炭素濃度評価

以下の通り二酸化炭素濃度について評価した。

##### a. 評価条件

- ・ 在室人員 64人<sup>※1</sup>
- ・ 緊急時対策所バウンダリ内体積 11000[m<sup>3</sup>]
- ・ 外気流入はないものとして評価する
- ・ 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）」）
- ・ 許容二酸化炭素濃度 0.5[%]  
（事務所衛生基準規則（昭和47年労働省令第43号、最終改正平成16年3月30日厚生労働省令第70号））
- ・ 呼吸による排出する二酸化炭素濃度 0.030[m<sup>3</sup>/h/人]  
（「空気調和・衛生工学便覧」の軽作業時の二酸化炭素吐出し量を使用）
- ・ 評価期間は、各火災の燃焼継続時間を考慮し24時間<sup>※2</sup>とする

※1：外気取入遮断時の必要要員として、休祭日・夜間の緊急時対策本部要員（44人）及び自衛消防隊（10人）に余裕を持った収容人数（1



～5号炉の対応要員含む)の合計64人を想定した。

※2：外部火災影響評価にて長期間の影響をもたらす、航空機墜落と軽油タンク火災の重畳を考慮すると、約23.2時間が火災の継続時間となることから、24時間で評価を実施した。

#### b. 評価結果

- ・外気遮断期間 t [hour]での二酸化炭素濃度 C [%]

$$C = (M \times N \times t) / V \times 100 + C_0$$

M：呼吸による排出する二酸化炭素濃度 0.030 [m<sup>3</sup>/h/人]

N：在室人員 64 [人]

V：緊急時対策所バウンダリ内体積 11000 [m<sup>3</sup>]

C<sub>0</sub>：初期炭酸ガス濃度 0.03 [%]

上記評価条件から求めた二酸化炭素濃度は、以下のとおりであり、24時間外気取入れを遮断したままでも、対策要員の作業環境に影響を与えない。

第3.3.4-1表 二酸化炭素濃度の時間変化

時間	6時間	12時間	24時間
二酸化炭素濃度 [%]	0.14	0.24	0.45

#### (2) 酸素濃度評価

以下の通り酸素濃度について評価した。

##### a. 評価条件

- ・在室人員 64人
- ・緊急時対策所バウンダリ内体積 11000 [m<sup>3</sup>]
- ・外気流入はないものとして評価する
- ・初期酸素濃度 20.95%  
(「空気調和・衛生工学便覧」の成人の呼吸気・肺胞気の組成の値を使用)
- ・酸素消費量 1.092ℓ/min/人  
(「空気調和・衛生工学便覧」の歩行に対する酸素消費量を使用)
- ・許容酸素濃度 18%以上  
(酸素欠乏症等防止規則(昭和47年労働省令第42号、最終改正平成15年12月19日厚生労働省令第175号))
- ・評価期間は、各火災の燃焼継続時間を考慮し24時間とする

##### b. 評価結果

- ・緊急時対策所の初期酸素量 2304.5 [m<sup>3</sup>] = 11000 [m<sup>3</sup>] × 20.95%

- 24 時間後の酸素濃度 20.0[%]  

$$= (2304.5[\text{m}^3] - 1.092[\text{l}/\text{min}/\text{人}] \times 10^{-3}[\text{m}^3/\text{l}] \times 64[\text{人}] \times 60[\text{min}/\text{h}] \times 24[\text{h}]) / 11000 [\text{m}^3] \times 100$$

上記評価条件から求めた酸素濃度は、以下のとおりであり、24 時間外気取入れを遮断したままでも、対策要員の作業環境に影響を与えない。

第3.3.4-2表 酸素濃度の時間変化

時間	6 時間	12 時間	24 時間
酸素濃度 [%]	20.7	20.4	20.0

## 熱気流による影響評価について

軽油タンク火災や航空機墜落による火災が発生した場合、熱気流による発電用原子炉施設への影響が懸念されるため、その影響について評価するものである。

## 1. 熱気流の発生源

発電用原子炉施設から離れた位置における火災では、熱気流は上昇・拡散することから発電用原子炉施設に影響をおよぼすことはない。このため、発電用原子炉施設近傍で発生する軽油タンク火災および航空機墜落による火災を熱気流の発生源として想定する。

## 2. 評価対象

非常用ディーゼル発電機は、外部電源喪失が発生した場合において安全機能を有する設備に電源を供給する設備であり、外気を内部に取り込む設備でもあることから評価対象とした。なお、非常用ディーゼル発電機の給気口は原子炉建屋の3階に設置されている。

## 3. 評価結果

発電用原子炉施設近傍での火災を想定した場合、非常用ディーゼル発電機の給気口（6号B系，7号B系）から熱気流が直接取り込まれる可能性は否定できないが、熱気流の影響範囲は気象条件（風向，風速等）に大きく依存する（第1図～第3図）。

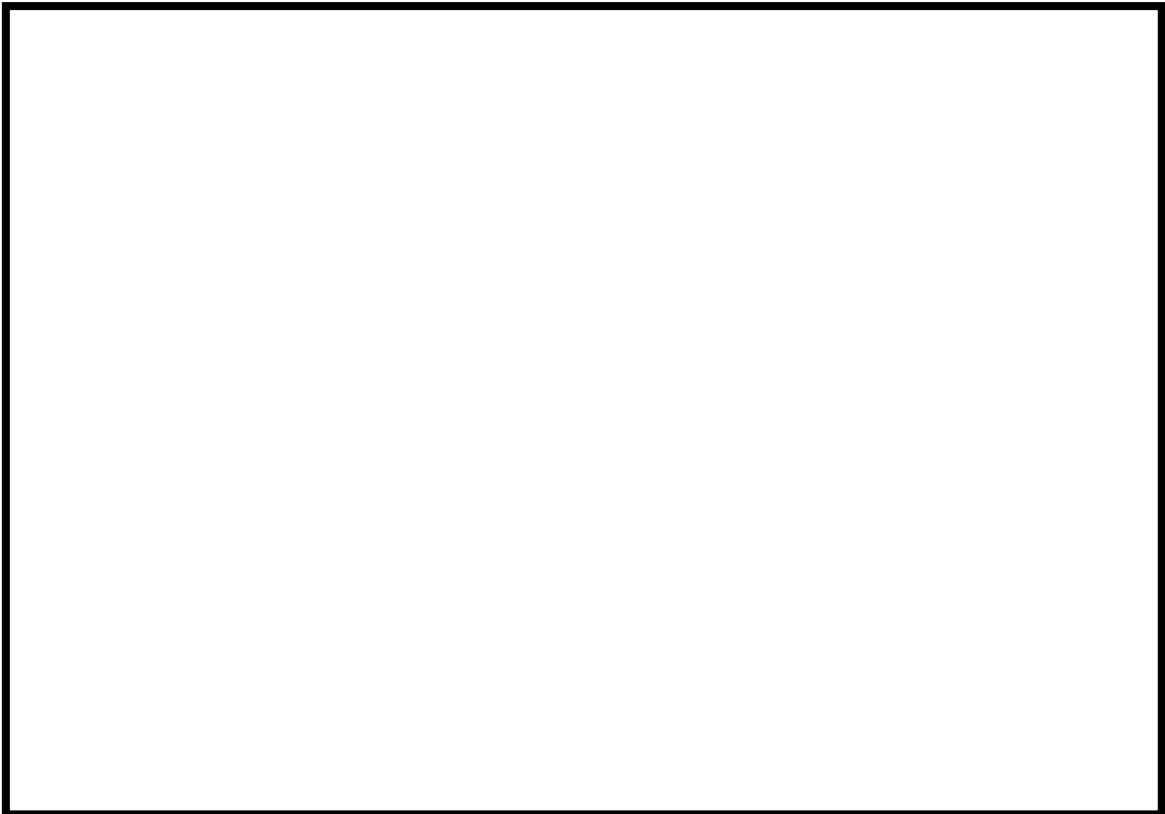
このため、これらの不確かさはあるものの、火災発生時は非常用ディーゼル発電機の給気温度を監視しつつ、熱気流の取り込みが懸念される場合は、当該設備を起動しない（起動している場合は停止する）ことにより熱気流の影響を回避する。

なお、非常用ディーゼル発電機の給気口は原子炉建屋の3階に集中して設置されていること、および位置的分散が図られていることから、同時に全ての設備が直接熱気流の影響を受けることは想定しづらく、影響を受けない方角に位置する非常用ディーゼル発電機は運転が可能である。また、消火が確認された時点で、停止していた非常用ディーゼル発電機の運転再開も可能となる。

以上より、熱気流の影響は限定的であり、発電用原子炉施設に影響をおよぼすことはないと評価する。



第1図 6号炉 熱気流を取り込む可能性のある給気口位置（軽油タンク火災）



第2図 6号炉 熱気流を取り込む可能性のある給気口位置（航空機火災）



第3図 7号炉 熱気流を取り込む可能性のある給気口位置 (航空機火災)