

(2) 森林火災の覚知から火炎到達までの対応について

(a) 森林火災発生覚知段階

敷地周辺の森林火災発生については以下の方法で覚知する。

・ 地元自治体の防災情報

むつ市で提供している気象，火災，防犯等の防災情報を電子メールで配信する「むつ市防災かまふせメール」に，自衛消防隊各班長等に貸与する社給携帯のメールアドレスを登録し，火災発生情報の内容を配信の都度確認し発生場所を特定する。この火災発生情報は，敷地周辺地域の場合は約 10 分程度で配信されており，鎮火の情報についても配信されている。

・ 公設消防及び警察からの連絡

・ 敷地内巡視及び監視時における発見

(b) 火炎が敷地近傍に迫るまでの段階

・ 現場状況の確認

自衛消防隊員（自衛消防副隊長，警備員等）が，森林火災発生場所の状況を確認する。

・ 気象状況の確認

敷地内気象観測設備のデータにより風向及び風速を確認するとともに，気象庁のホームページ等により気象状況の予測データを確認する。

・ 敷地内の監視カメラを森林火災現場方向に向け，モニタで確認する。

・ 森林火災の対応準備を実施する。

①動力消防ポンプを防火帯の外側の防火水槽に設置し，ホースを火炎の接近方向に展張して緑地等に事前放水する。また，状況に応じて緑地等の枯草及び枯枝等を撤去する。

②構内作業を中止する。また，火災の対応に必要な要員以外の者を貯蔵建屋から退出させるとともに，敷地の門扉を閉鎖する等の立入制限措置を行う。

- ③公設消防の出入管理及び誘導を行う。
- ④非燃焼領域及び防火帯内に可燃物等がある場合は、状況に応じて撤去または搬出を行う。
- ⑤非燃焼領域の外側にある車両及び可燃性物品等がある場合には、状況に応じて敷地外に移動または搬出を行う。

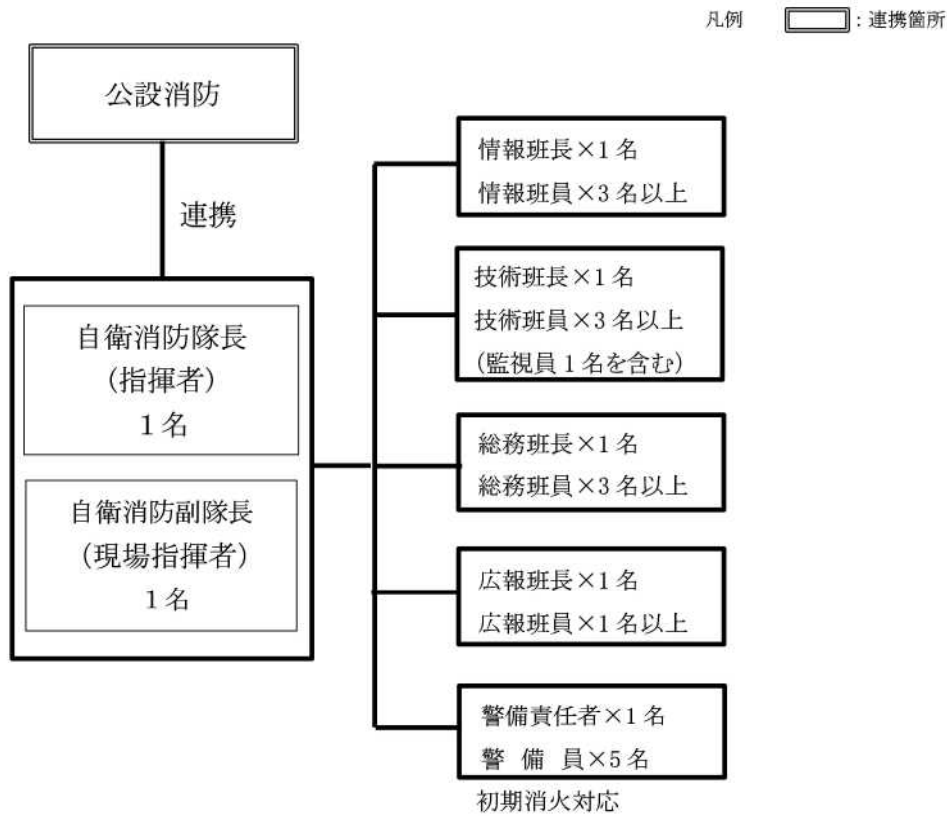
(c) 火炎が敷地境界を越えて非燃焼領域近傍に迫るまでの段階

- ・動力消防ポンプを防火帯の内側の防火水槽に移動し、ホースを火炎の接近方向に展張して貯蔵建屋の外壁及び防火帯内設置設備に事前放水する。
- ・動力消防ポンプを使用する者は、消防服（防火服）を装着し、状況に応じて防護マスク、空気呼吸器（セルフエアセット）及びガス検知器・濃度計を用いて対応する。

(d) 避難段階

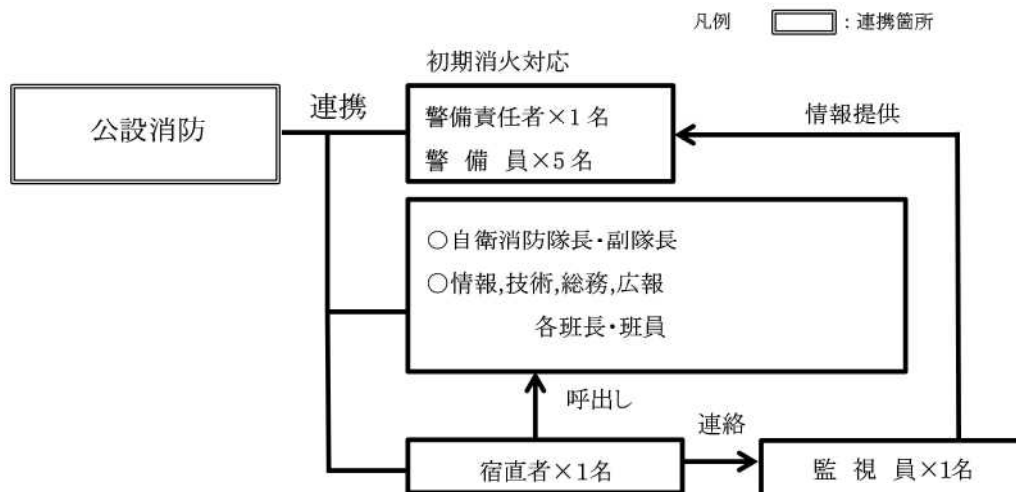
- ・森林火災が想定外に続いた場合等、人命に危険がおよぶ可能性がある場合は、火炎の接近方向と逆方向の、安全が確保できる場所まで一時的に避難する。

森林火災発生から火炎到達までの事前放水手順及び所要時間について第 24 表に示す。検討の結果、火災の覚知から事前放水の開始までは約 20 分で対応することが可能であることを確認した。森林火災影響評価における最短の火炎到達時間は、発火点 3 からの火炎であり、約 24 分で非燃焼領域外縁に達するが、発火点 3 は貯蔵施設東側約 200m の森林内であり、火災の発生も容易に覚知しやすいことから、火炎到達前に事前放水を開始可能であると考えらる。



第 31 図(1) 自衛消防隊体制図

平日通常時間帯及び緊急呼出後の自衛消防隊体制



第 31 図(2) 自衛消防隊体制図

平日夜間及び休祝祭日の自衛消防隊体制

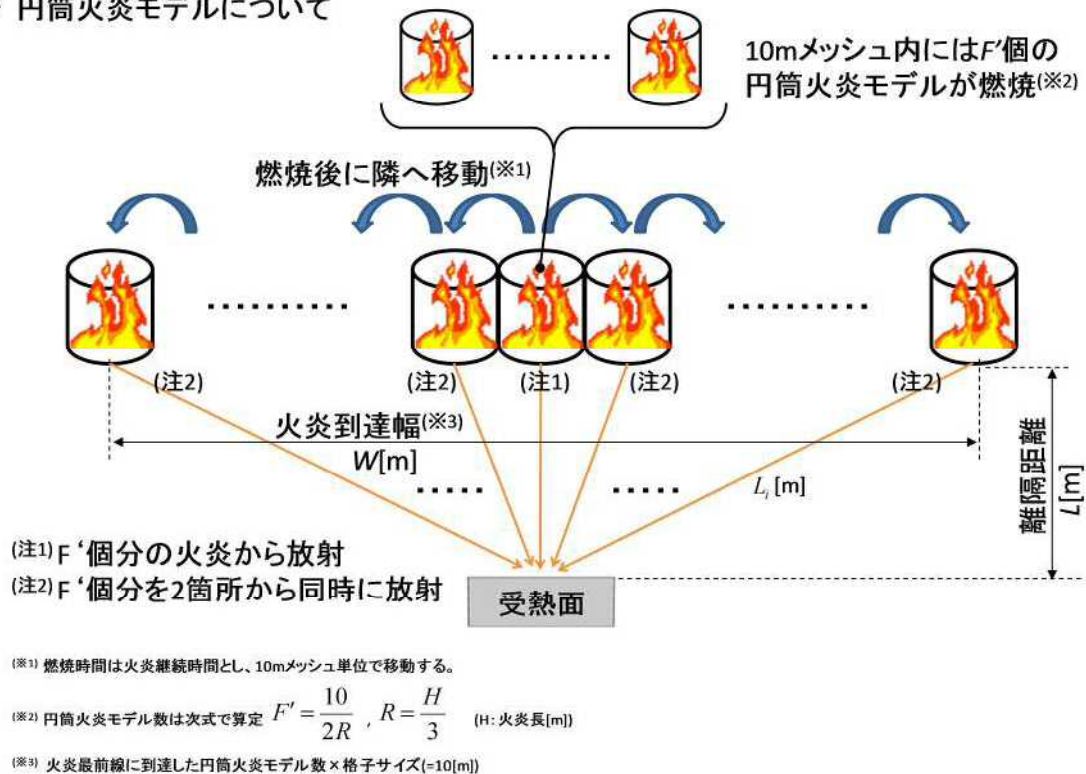
第 24 表 森林火災発生時の事前放水手順と所要時間

手順	内 容	所要時間(分)		
		0	10	20
火災発生	火災覚知から事前放水開始判断 ・ 発火点 1 : 西南西方向 3 km 先, 火炎到達時間 4.2 時間  ・ 発火点 2 : 南南西方向 2.5 km 先, 火炎到達時間 0.8 時間 (48 分)  ・ 発火点 3 : 東側方向 200m 先, 火炎到達時間 0.4 時間 (24 分) 敷地内から目視可能, 即時判断			
火災発見 ～放水指 示	警備責任者からの指示により 警備員が展開			
出動～放 水準備	動力消防ポンプ準備 (2 人) 動力消防ポンプ運転後, 1 人は 消防ホース展張に移動する。			
	消防ホース展張 (3 人) 防火帯東側から南側に消防ホ ースを展張する。 (20m / 巻 × 20 本)			
放水開 始	火炎の方向に応じて防火帯外 側の法面に放水する。 ・ 動力消防ポンプ操作 (1 人) ・ 筒先 (放水) 操作 (1 人) ・ 同上補助兼消火責任者 (1 人) ・ 消防ホース展張補助 (2 人)			

### 3.2.3.6 円筒火炎モデルによる森林火災影響評価

前項で評価した FARSITE 出力値に基づき，森林火災影響評価に必要な各項目について算出した。評価にあたっては，ガイドを参考とし火災を円筒火炎としてモデル化し，この円筒火炎モデルが評価した火炎到達幅の分だけ横一列に並ぶものとして評価を実施した。円筒火炎モデルの概念図について第 32 図に示す。

#### ▶ 円筒火炎モデルについて



第 32 図 森林火災影響評価における円筒火炎モデルの概念図

以下に，評価手順について示す。

(1) FARSITE による出力結果から以下のパラメータを抽出

- ・ 反応強度：  $I_R$  ( $W/m^2$ )
- ・ 火炎長：  $H$  (m)
- ・ 火炎到達幅：  $W$  (m)
- ・ 火炎継続時間：  $T_{fire}$  (s)

※火炎長及び火炎継続時間は最大反応強度位置（非燃焼領域外縁）における値

※火炎到達幅は非燃焼領域外縁で延焼したセル数 × 10 (m)（メッシュサイズ）で算定

(2) 反応強度  $I_R$  から火炎輻射強度  $R_f$  を算出

- ・火炎輻射強度は，反応強度を用いて算出する。
- ・火炎輻射強度の算出にあたっては，反応強度は炎から輻射として放出される熱エネルギーと火炎・煙として対流放出される熱エネルギーから求められることから，反応強度に対する火炎輻射強度の割合を求め，火炎輻射強度を算出する。
- ・このため，第 33 図に従い反応強度に対する火炎輻射強度の割合を算出した。



※ : THE SFPE HANDBOOK OF Fire Protection Engineering 4<sup>th</sup> EDITION  
(SFPE:防火技術者協会(本部米国))

第 33 図 反応強度に対する火炎輻射強度の割合

- ・反応強度と火炎輻射強度の割合を算出した結果，落葉広葉樹は 0.371 であり，針葉樹は 0.377 であった。このため数値の大きい 0.377 を輻射強度の割合として算出し，反応強度に 0.377 を乗ずることにより火炎輻射強度を算出した。

$$\rightarrow R_f = I_R \times 0.377$$

(3) 建屋壁面における輻射強度の算出

算出した火炎長と燃焼半径を有する円筒火炎が第 32 図のとおり，火炎到達幅の分だけ横一列に並ぶものとし，離隔距離分だけ離れた位置にある円筒火炎から燃焼開始後，火炎継続時間経過後に隣接するセル（セル幅 10m）に延焼するものとして評価を実施した。

火炎から任意の位置にある受熱点における輻射強度に関しては，

ガイドを参考とし円筒火炎モデルにおける円筒モデル 1 個の形態係数  $\phi$  を算出し、これを火炎輻射強度と乗ずることにより輻射強度  $E$  を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R \div 3$$

$$n = L/R$$

$$E = R_f \cdot \phi$$

$\phi$  : 形態係数,  $H$  : 火炎長 (m),  $L$  : 離隔距離 (m),

$E$  : 輻射強度 ( $W/m^2$ ),  $R_f$  : 火炎輻射強度 ( $W/m^2$ ),  $R$  : 燃焼半径 (m)

さらに、10m メッシュ内に燃焼半径から算出した  $F'$  個の円筒火炎が存在するものとして、上記で算出した輻射強度に円筒火炎数を乗じて貯蔵建屋の輻射強度を算出する。

$$E = F' \cdot R_f \cdot \phi_0 \quad (\text{中心位置の火炎})$$

$$E = 2 \cdot F' \cdot R_f \cdot \phi_i \quad (\text{中心以外の火炎, 両隣に移動後})$$

前項で評価した FARSITE 出力値、及び提示した式を用いて算出した森林火災影響評価に必要な各項目の算出結果について第 25 表に示す。各評価値については、前項と同様保守的に 1 つ下の小数点桁について切り上げ、または切り捨て処理を実施したものである。

第 25 表 森林火災影響評価に必要な項目の算出結果

項目	評価方法	発火点1 (6:58)	発火点1 (7:56)	発火点2 (10:00)	発火点3 (11:00)
火炎輻射強度 (kW/m <sup>2</sup> )	反応強度に米国 NFPA の係数 0.377 を乗じて算出*1	384	358	373	424
火炎継続時間(h)	最大火炎輻射強度位置と隣接する 位置(火炎伝播方向)における到達 時間の差*2	0.08	0.1	0.14	0.04
火炎到達幅(m)	非燃焼領域外縁で延焼したセル数 ×10m で算出*2	1050	1050	1050	1050
燃焼半径(m)	火炎長/3	0.5	0.5	0.4	0.2
輻射強度(kW/m <sup>2</sup> )	形態係数×火炎輻射強度	5.24	5.25	4.14	2.65

\*1:反応強度に対して、米国 NFPA (National Fire Protection Association) の“SFPE HANDBOOK of Fire Protection Engineering”における針葉樹の反応強度と火炎輻射強度の割合に関する係数 0.377 を乗じて算出

\*2:ガイドに基づき火災を円筒火炎モデルとし、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して評価した



### 3.2.4 森林火災に対する貯蔵建屋外壁の熱影響評価

#### 3.2.4.1 評価条件

森林火災影響評価の実施に関し，使用した入力パラメータについて以下に示す。

- ・ 離隔距離：22 m
- ・ 外壁厚み：1 m（貯蔵建屋外壁で最も薄い箇所の厚さ）
- ・ 外壁コンクリート許容温度：200 °C
- ・ 外壁コンクリート初期温度：50 °C
- ・ 外壁コンクリート物性（伝熱工学資料 第5版）  
密度： 2400 (kg/m<sup>3</sup>)  
比熱： 900 (J/kg/K)  
熱伝導率：1.2 (W/m/K)

貯蔵建屋はコンクリート製であるため，判断基準となる許容温度としては，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°C（保守的にコンクリートの圧縮強度が変化しない温度を想定）とした。（別添1）

また貯蔵建屋は自然循環構造となっており，建屋の除熱設計において，建屋内の空気温度は貯蔵区域における計測設備，放射線監視設備等の電気品の性能維持を考慮した 45°C以下となるよう設計されている。このため，建屋外壁の初期温度については，本値及び FARSITE への入力条件としても考慮したむつ観測所において観測開始以降最高値となる 34.7°C及び日射による温度上昇を保守的に考慮し，50°Cと設定した。

#### 3.2.4.2 貯蔵建屋外壁表面における熱影響評価について

##### (1) 外壁温度の算出

建屋の外壁温度は，次式に示す一次元非定常熱伝導方程式を解くことにより評価した。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

T : 温度 (K)    ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)    C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

k : 熱伝導率 (W/m/K)    E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>/K)    L : 厚さ (m)

上式は、伝熱工学資料第5版に記載の式を一次元に簡略化したものである。森林火災時の熱影響評価においては、火炎からの輻射強度が一定値とならないため一般的に上式の解析解が存在しないことから、上式を有限差分法により導出した以下の離散式について、熱影響の評価式として用いた。

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta x^2}$$

α = k / ρ · C<sub>p</sub>    t : 時間    i : 空間に対するインデックス

評価に際して、貯蔵建屋の外壁を厚さ方向に有数個 (n 個) のメッシュに分割し、外壁表面をインデックス 0、内壁表面をインデックス n として各インデックスにおける温度を算出した。評価のモデルについて第 34 図に示す。



第 34 図 評価モデル概念図

上記モデルにおいて、計算点 i における時刻 t + Δt の温度について以下の式で算出した。

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t)$$

外壁の外表面温度については、輻射強度 E を考慮し次式 (フーリ

エの熱伝導の式) で算出し、各メッシュごとに隣り合うインデックスにおける温度から次の時刻の温度を算出していき、内表面温度まで算出した。この時、外壁内表面での熱流束はないものとする(断熱状態)。

$$-k \frac{T_1^t - T_0^t}{\Delta x} = E \quad \Rightarrow \quad T_0^t = \frac{E \Delta x}{k} + T_1^t \quad (\text{外表面温度})$$

$$-k \frac{T_{n-1}^t - T_n^t}{\Delta x} = 0 \quad \Rightarrow \quad T_n^t = T_{n-1}^t \quad (\text{内表面温度})$$

## (2) 危険距離の算出

ガイドを参考とし、前項で算出した輻射強度が森林火災による輻射熱に対する貯蔵施設の危険輻射強度以下となるよう、危険距離を確保するものとする。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、火炎輻射強度に形態係数を掛けた値になる。

$$E = R_f \cdot \phi$$

$\phi$  : 形態係数,  $E$  : 輻射強度 ( $W/m^2$ ),  $R_f$  : 火炎輻射強度 ( $W/m^2$ )

次の式から形態係数  $\phi$  を求め、 $\phi > \phi_t$  なるように危険距離を算出する。

$$\phi_t = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R \doteq 3$$

$$n = L_t/R$$

$L_t$  : 危険距離 (m),  $H$  : 火炎長 (m),  $R$  : 燃焼半径 (m)

$\phi_t$  は、各円筒火炎モデルの形態係数を合計した値であり、 $\phi_t = (\phi_i + \phi_{i+1} + \phi_{i+2} + \dots)$  となる。また、 $(i + (i+1) + (i+2) \dots)$

$+(i+x)$ の円筒火炎モデル数の合計は  $F'$  個となる。

### 3.2.4.3 評価結果

発火点 1, 2, 3 における熱影響評価結果について第 26 表に示す。

各評価値については、前項と同様保守的に 1 つ下の小数点桁について切り上げ、または切り捨て処理を実施したものである。また、外壁及び内壁の温度については、設定した建屋外壁初期温度 50℃を加算した値である。

また、第 35 図～第 38 図に発火点別の建屋外壁温度上昇量の評価結果の時間変化グラフを示す。各図において (2) のグラフは、(1) のグラフの X 軸 (時間軸) を 5 時間まで拡大したものである。

第 26 表 貯蔵建屋の熱影響評価

項目	発火点 1 (6:58)	発火点 1 (7:56)	発火点 2 (10:00)	発火点 3 (11:00)
外壁外表面温度(℃)	128	138	132	75
外壁内表面温度(℃)	53	54	54	51
危険輻射強度(kW/m <sup>2</sup> )	9.87	8.83	7.41	20.87
危険距離(m)	15	16	16	7

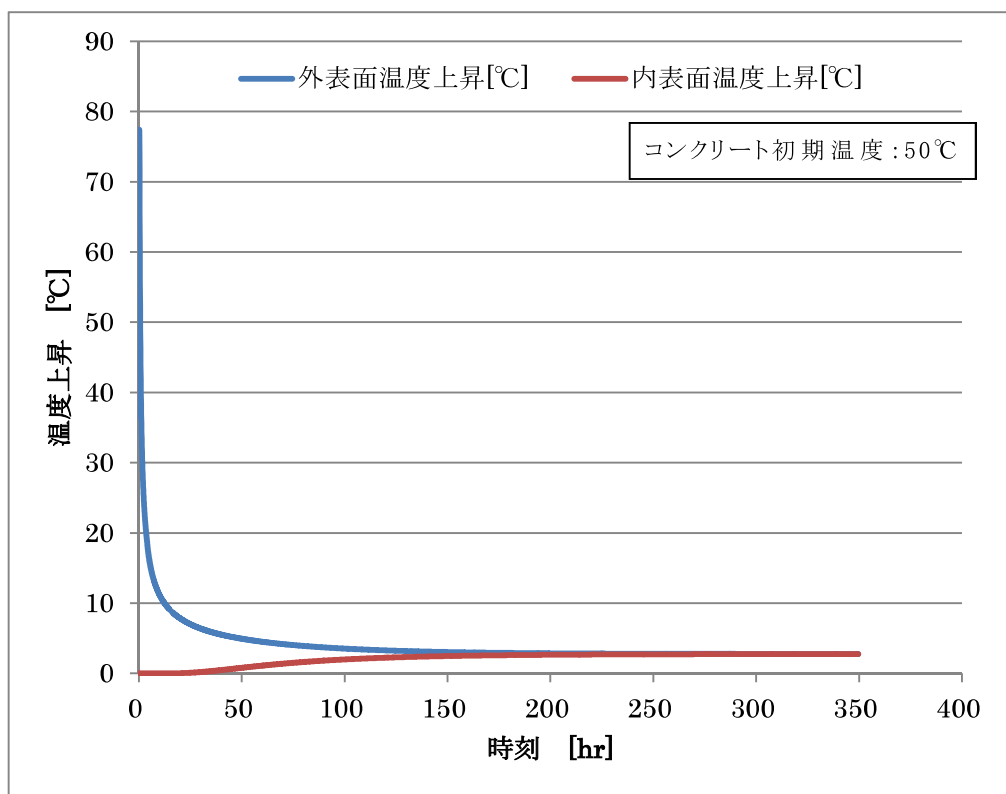
#### (1) 貯蔵建屋外壁温度の評価

森林火災による熱影響評価の流れに従って温度評価を実施したところ、貯蔵建屋外壁の初期温度を 50℃とした場合の外壁の最高温度は、発火点 1 における発火時刻 7:56 の評価で 138℃程度となり、許容温度 200℃以下であることを確認した。

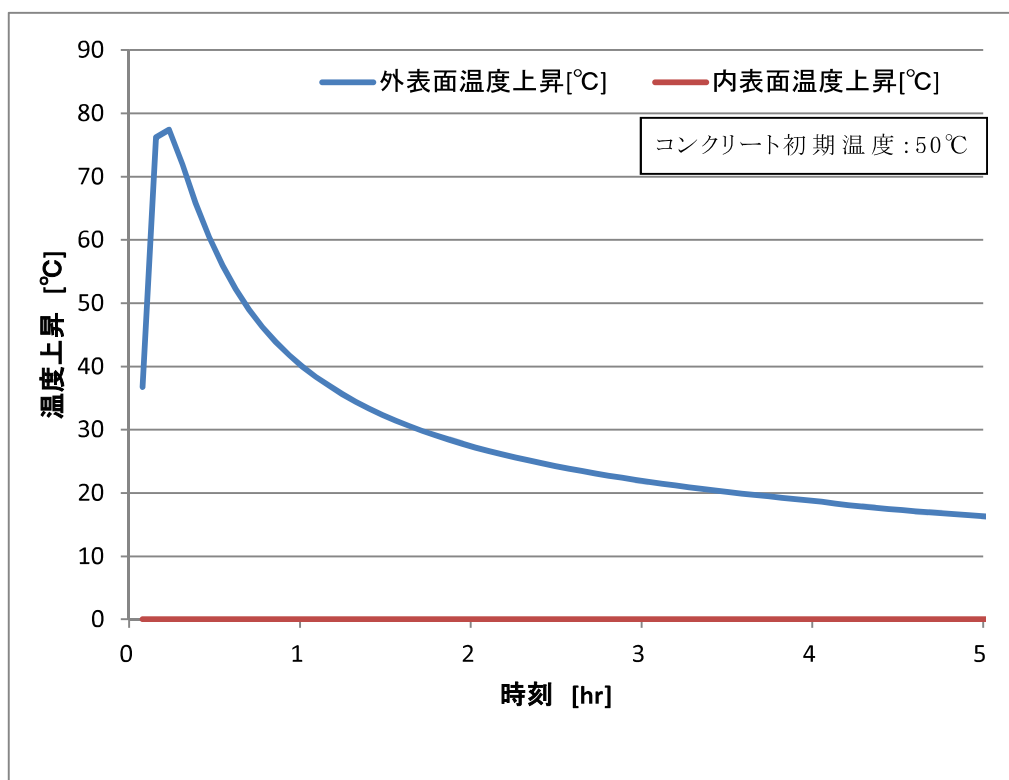
外壁温度については火災発生直後に最高温度となるが、その後輻射強度の低下に伴い徐々に低下する。これは、森林火災を円筒火炎としてモデル化した際、時間経過に伴い円筒火炎モデルが評価点より遠ざかるためである。

## (2) 危険距離の評価

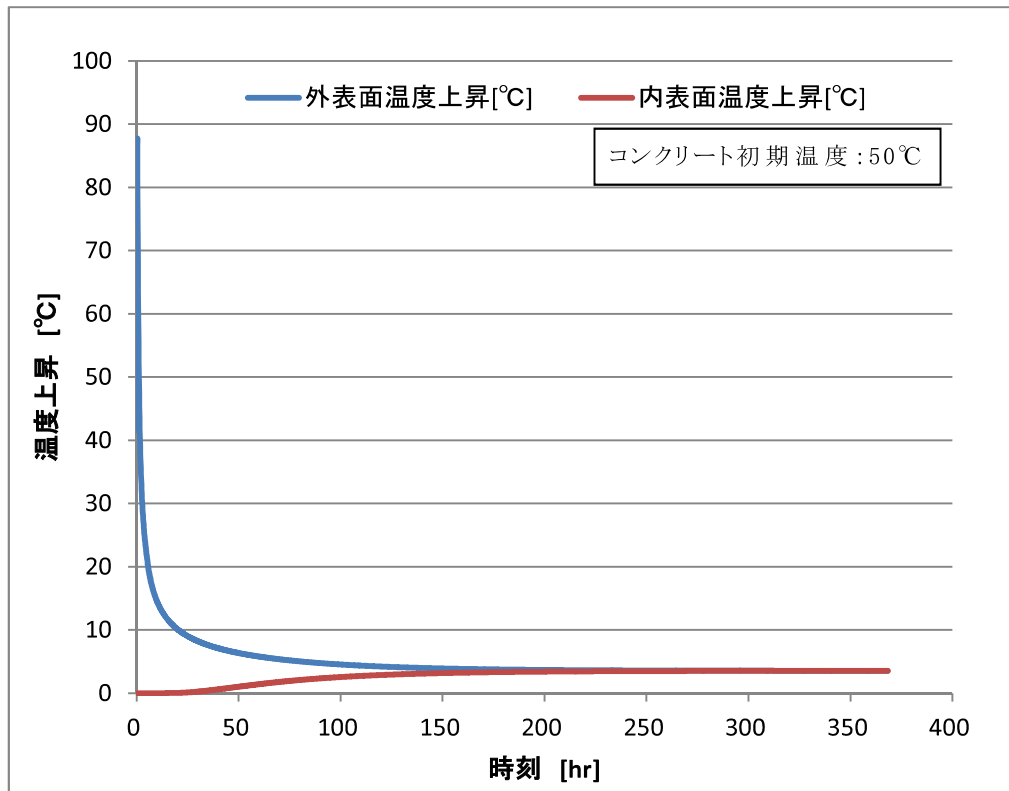
危険輻射強度から各発火点における危険距離を算出した結果、発火点1, 2, 3におけるいずれの評価結果においても必要防火帯幅である22 m以下であることから、貯蔵施設から防火帯外縁までの離隔距離については、想定される森林火災に対して評価上必要とされる危険距離以上であることを確認した。



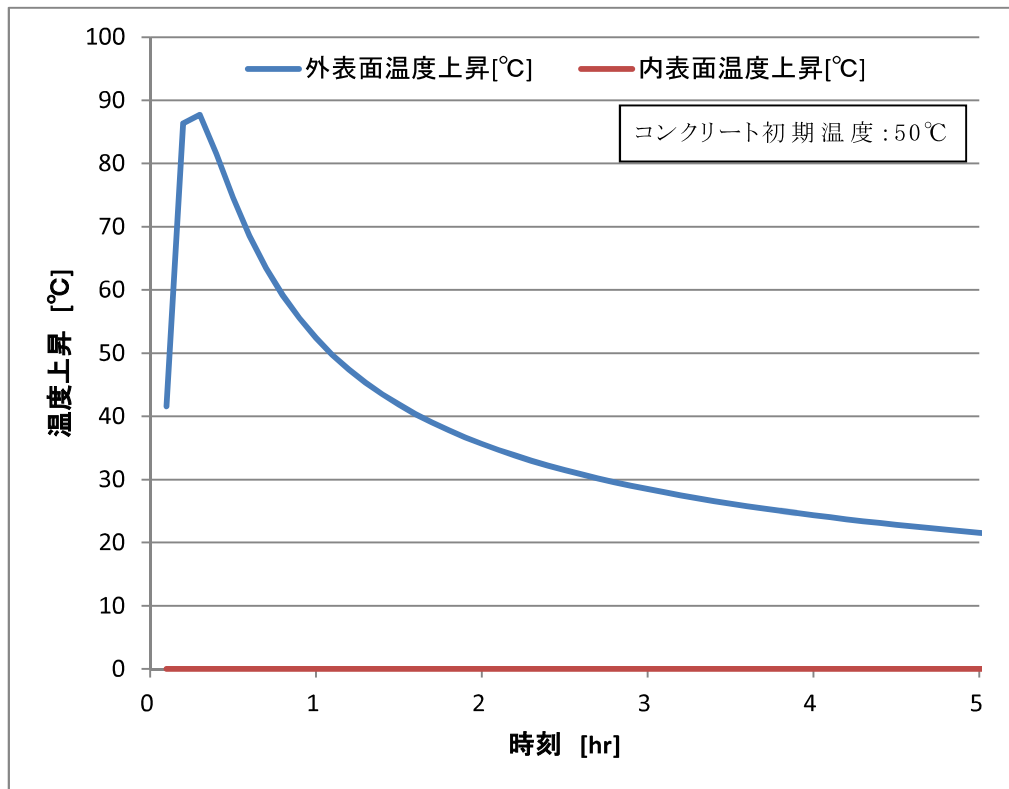
第 35 図(1) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 1（発火時刻 6:58））



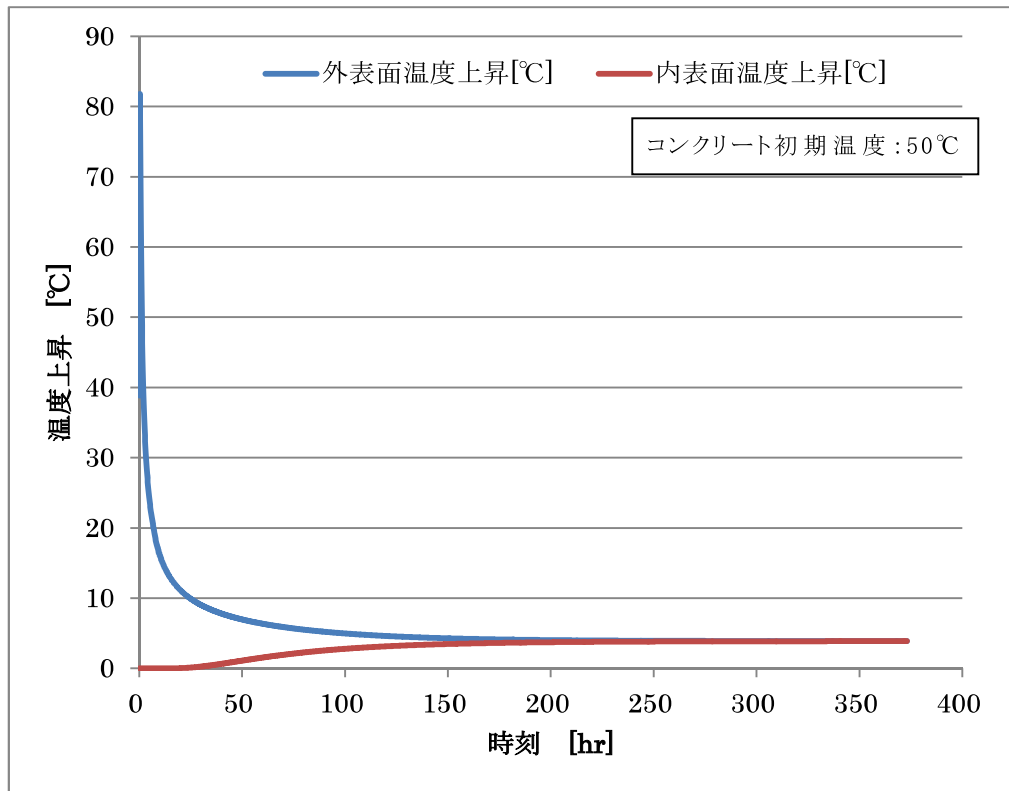
第 35 図(2) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 1（発火時刻 6:58））



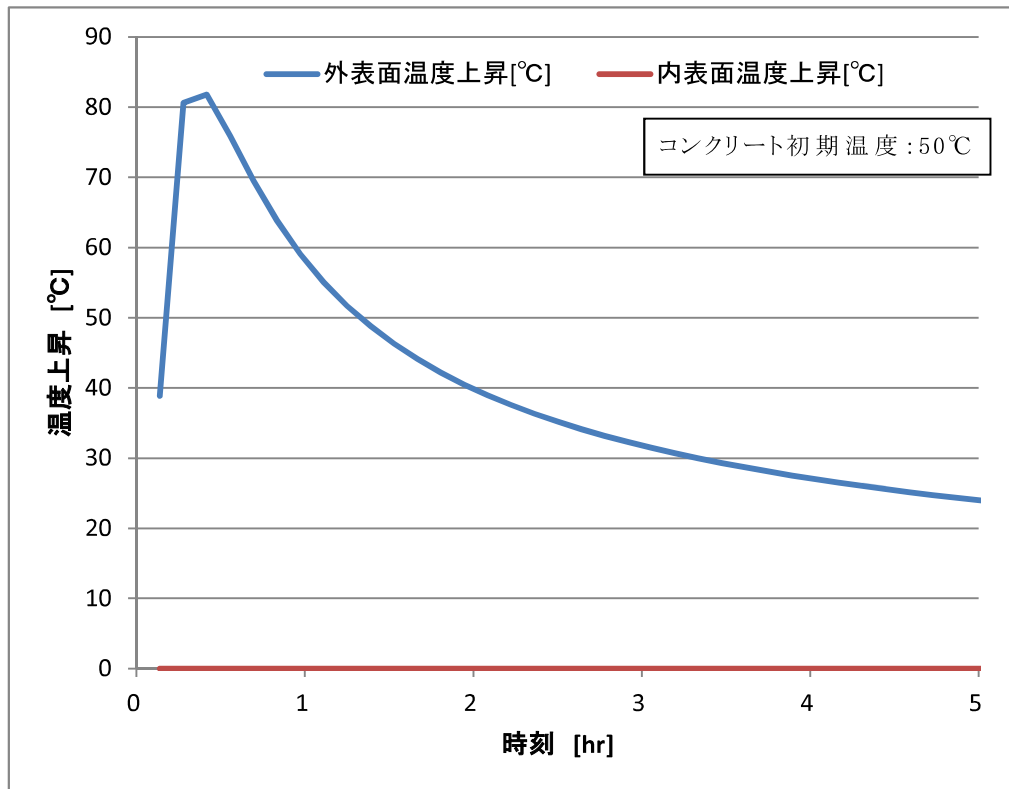
第 36 図 (1) 建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化  
(発火点 1 (発火時刻 7:56))



第 36 図 (2) 建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化  
(発火点 1 (発火時刻 7:56))

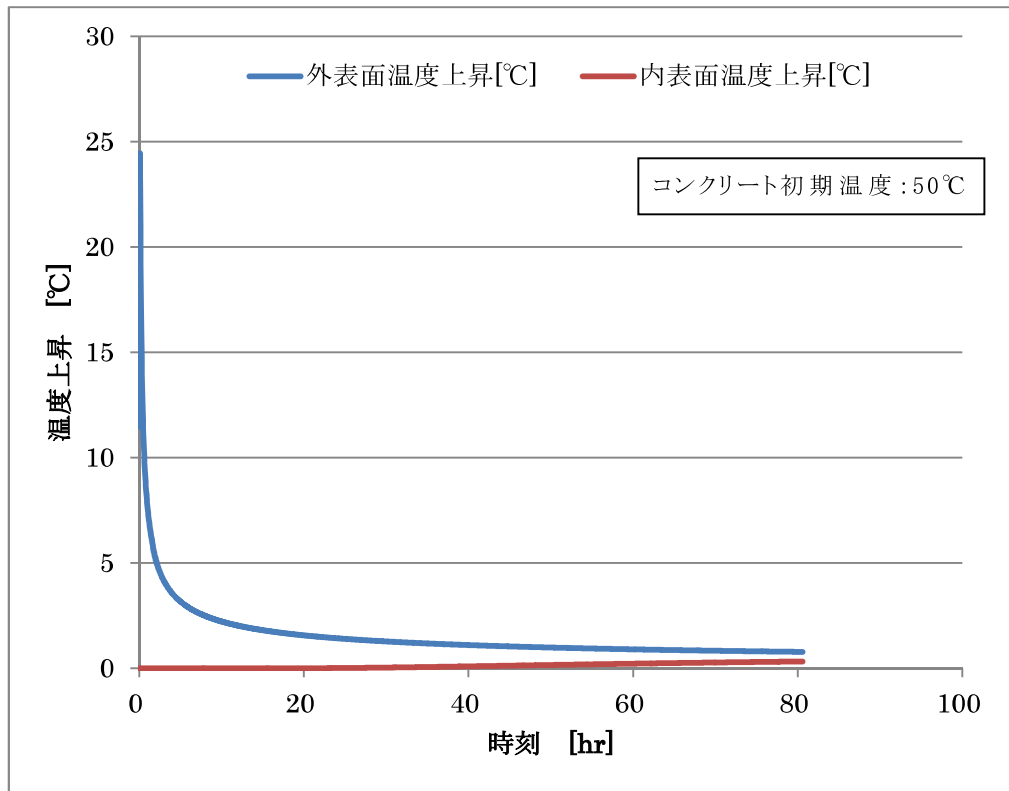


第 37 図 (1) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 2（発火時刻 10:00））

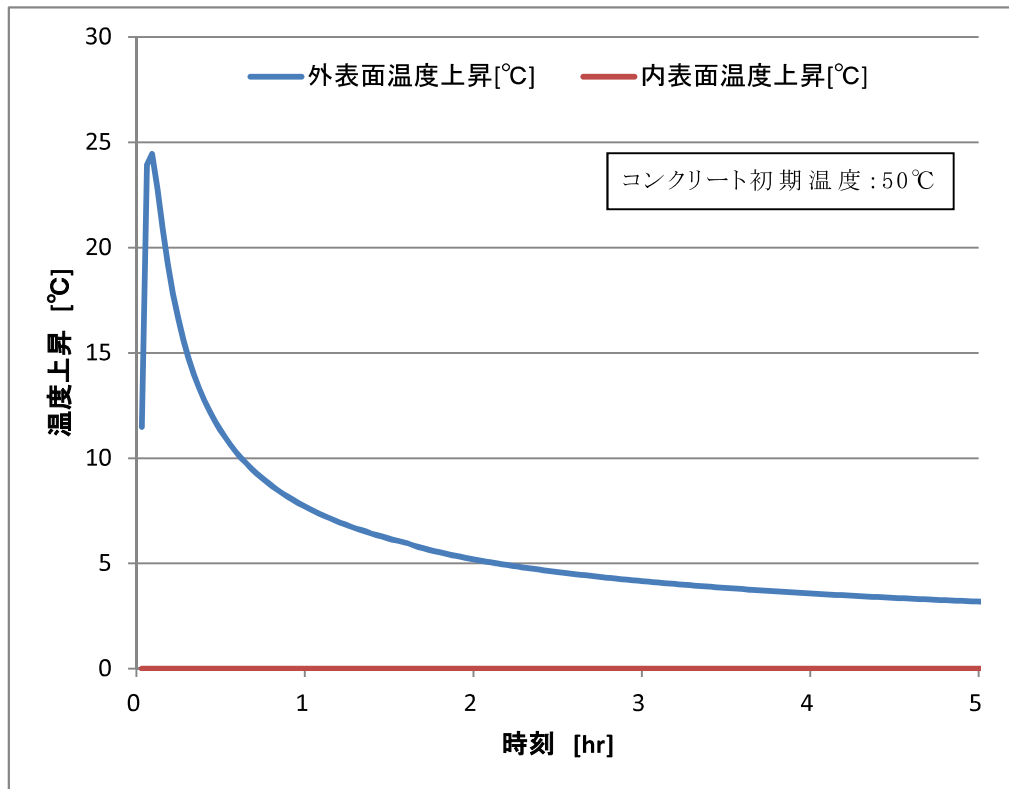


第 37 図 (2) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 2（発火時刻 10:00））





第 38 図 (1) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 3（発火時刻 11:00））



第 38 図 (2) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 3（発火時刻 11:00））

#### 4. 近隣の産業施設等の火災・爆発に対する影響評価について

##### 4.1 近隣の産業施設の火災・爆発評価

###### 4.1.1 石油コンビナート等に関する評価

青森県内において、石油コンビナート等災害防止法第二条第二項に基づく「青森県石油コンビナート等防災計画（青森県石油コンビナート等防災本部 策定：昭和 52 年 3 月 3 日 最終修正：平成 23 年 3 月 24 日）第 1 章総則，第 4 節特別防災区域の範囲 4 頁から 11 頁」によれば、石油コンビナート等特別防災区域を指定する政令（昭和 51 年政令第 192 号）及び石油コンビナート等特別防災区域に係る区域の指定（昭和 51 年通商産業省・自治省告示第 1 号）で指定されている青森県の区域は次のとおりである。（第 39 図）



第 39 図 青森県石油コンビナート等特別防災区域  
(Google Map をもとに作成)

ガイドにおける石油コンビナート等の評価対象範囲は、貯蔵施設より火災評価で半径 10km 以内，ガス爆発で南北及び東西 10km としてお

り、最も至近のむつ小川原地区についても 40km 以上隔離していることから、貯蔵施設から 10km 以内に石油コンビナート等の施設はないことを確認した。

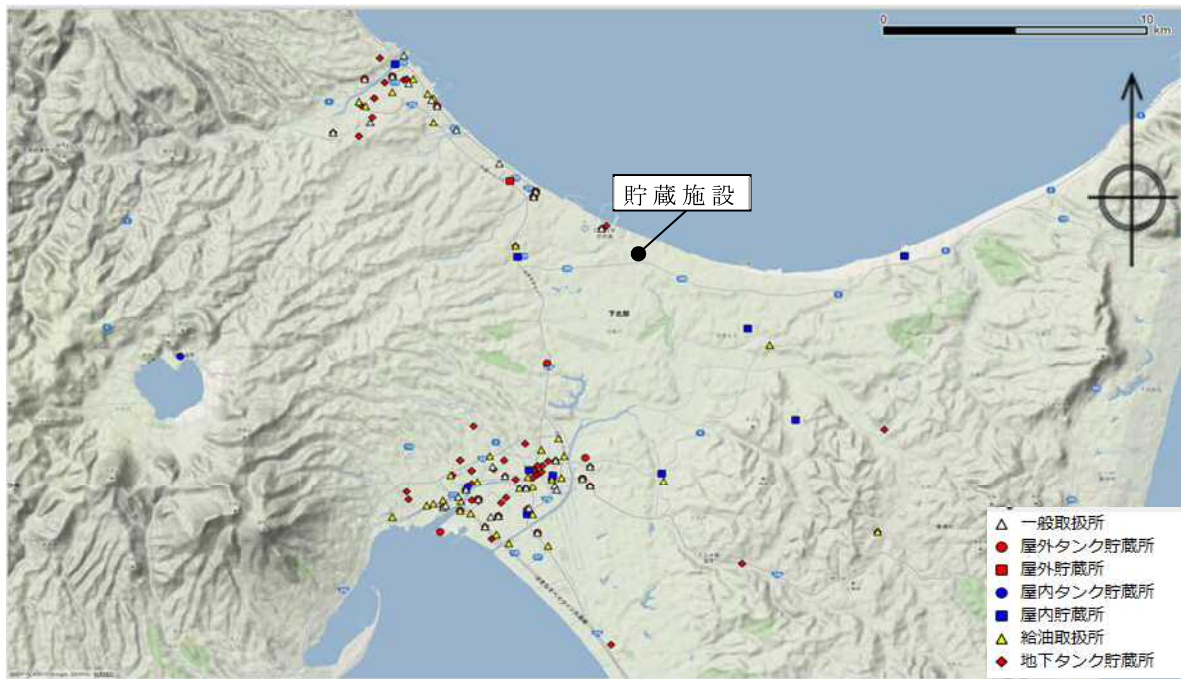
#### 4.1.2 石油コンビナート以外の危険物貯蔵施設の火災・爆発による影響評価

##### 4.1.2.1 評価対象施設の選定

石油コンビナート以外の危険物貯蔵施設については、青森県防災消防課、及びむつ市消防本部に届出がされている当該施設について調査を行い、ガイドを参考として貯蔵施設から 10km 圏内に位置する危険物貯蔵施設に対して、貯蔵施設に最も近い施設を抽出した。その結果、貯蔵施設から最短距離にある危険物貯蔵施設は、約 1 km 離れた地点にある貯蔵施設（地下タンク貯蔵所）であり、貯蔵物は第三石油類（重油）27kℓであった。また、同評価対象範囲において最も貯蔵量の大きい危険物貯蔵施設は、約 3 km 離れた地点にある貯蔵施設（屋外タンク貯蔵所）であり、その貯蔵物は第二石油類（灯油）924kℓであった。

これより、本評価においては、貯蔵施設から 10km 圏内における最大貯蔵量となる危険物貯蔵施設と同等のタンクが貯蔵施設から最も近い距離 1 km の位置に存在するもの（貯蔵施設から 1 km の距離に貯蔵量 924 kℓの危険物貯蔵施設が存在するもの）と仮定し、これに火災が発生した場合の貯蔵施設への影響評価を実施した。

貯蔵施設からの上記危険物貯蔵施設の位置関係について第 40 図に示す。評価対象範囲において最も貯蔵量の多い危険物貯蔵施設が貯蔵施設に最も近い距離の位置に存在するものと仮定して評価を実施することは、条件的に最も厳しい評価となり、十分に保守的な評価である。



(a) 10km 圏内全体図

第 40 図(1) 貯蔵施設から 10km 圏内の危険物貯蔵施設の位置



(b) 施設周辺部拡大図



(c) 最大量石油類貯蔵施設付近拡大図 (図(b)点線枠部)

第 40 図(2) 貯蔵施設から 10km 圏内の危険物貯蔵施設の位置

#### 4.1.2.2 評価方法及び評価結果

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：灯油

燃料量：924 (kl)

火炎輻射強度：50000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.039 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805\*の Kerosene の値

燃料密度：820 (kg/m<sup>3</sup>) ※NUREG-1805 の Kerosene の値

防油堤面積：900 (m<sup>2</sup>) ※航空写真に基づき概算  
(第 40 図(c)赤枠内)

\*：米国 NRC における定量的な火災防護に関する危険分析方法

##### (2) 評価対象設備に関する入力データ

建屋からの離隔距離：1000 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料 第 5 版の石灰岩コンクリートの値

##### (3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

###### (a) 燃焼半径の算出

防油堤面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して下記の式に基づき算出したところ、16.926 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{900/\pi} = 16.9257 \Rightarrow 16.926 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：防油堤面積(=燃焼面積)(m<sup>2</sup>)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき，円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ，0.0005536 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$  : 形態係数，H : 火炎長 (m)，L : 離隔距離 (=1000 m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ，27.7 W/m<sup>2</sup> となった。

$$E = R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.0005536 = 27.68 \Rightarrow 27.7 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)，R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ，21615 s となった。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 924 / (900 \times 0.0000475) = 21614.1 \Rightarrow 21615 \text{ (s)}$$

ここで， $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.039}{820} = 0.000047561 \Rightarrow 0.0000475$ ，

$$\pi R^2 = 900.0332 \Rightarrow 900$$

t : 燃焼継続時間 (s)，V : 燃料量 (m<sup>3</sup>)，v : 燃焼速度 (m/s)，

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s)， $\rho$  : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a) 貯蔵建屋外壁温度の評価

(3)にて求めたパラメータにより，伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて，貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$T(x)$ : 表面から  $x$  (m) の位置の温度 (°C),  $T_0$ : 初期温度 (=50 °C),  
 $k$ : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$ : 温度拡散率 ( $\kappa = k / \rho C_p$ ) (m<sup>2</sup>/s),  
 $\rho$ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$ : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C とし、上式により外壁外表面温度上昇量を評価したところ、約 3°C となり、外壁外表面温度の評価結果は約 53°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°C を下回っており、これにより近隣の危険物貯蔵施設の火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

#### (b) 危険距離の評価

火災による貯蔵建屋外壁温度が許容温度である 200°C となる際の貯蔵建屋からの離隔距離を危険距離として評価した。外壁初期温度 50°C を考慮すると、このときの外壁外表面温度上昇量は  $200 - 50 = 150$ °C となり、この時点での危険輻射強度は 1440.6 W/m<sup>2</sup> と算出される。この値より危険距離は約 138m と算出された。

評価した敷地外危険物貯蔵施設から貯蔵建屋までの離隔距離は 1000m であることから、想定される敷地外危険物貯蔵施設からの火災に対して評価上必要とされる危険距離以上であることを確認した。



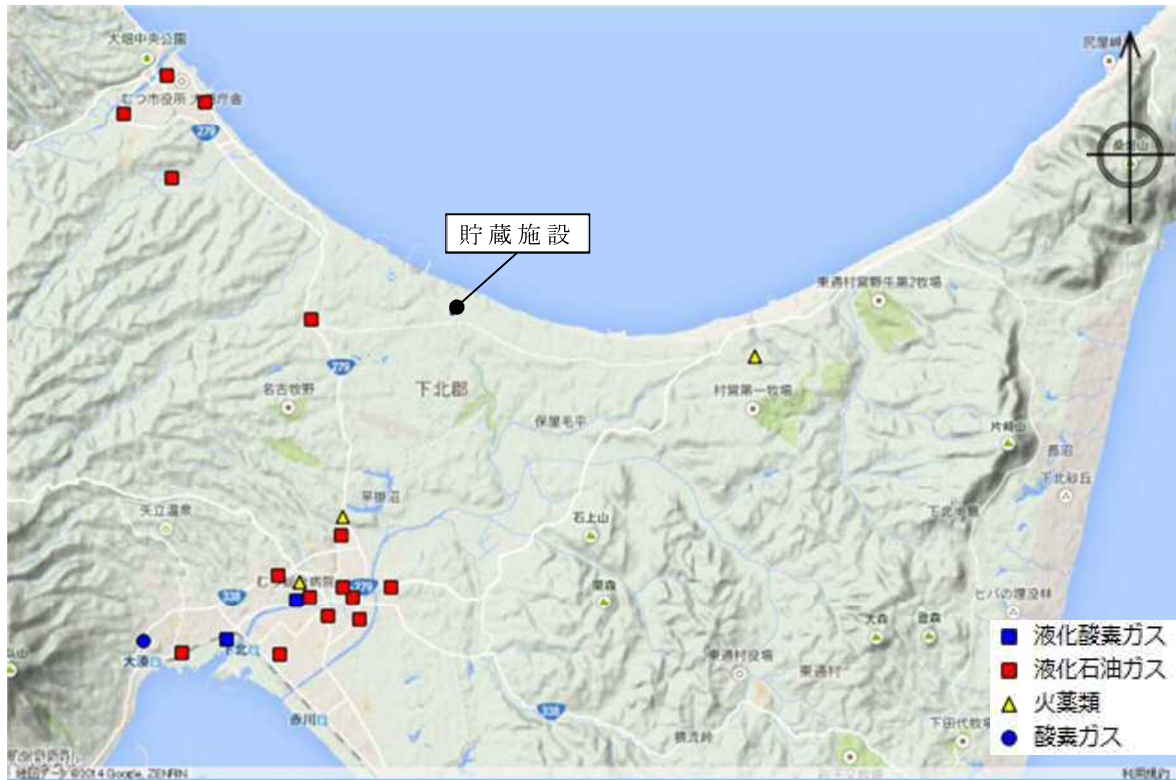
#### 4.1.3 石油コンビナート以外の高圧ガス類貯蔵施設の火災・爆発による影響評価

##### 4.1.3.1 評価対象施設の選定

石油コンビナート以外の高圧ガス類貯蔵施設に関して、前項と同様、青森県防災消防課、及びむつ市消防本部に届出がされている当該施設について、ガイドを参考として貯蔵施設から10km圏内に位置する高圧ガス類貯蔵施設に対して、貯蔵施設に最も近い施設を抽出した。その結果、貯蔵施設から最短距離にある高圧ガス類貯蔵施設は、約3km離れた地点にある貯蔵施設であり、貯蔵量は液化石油ガス400kgであった。また、同評価対象範囲において最も貯蔵量の大きい貯蔵施設は、約7km離れた地点にある貯蔵施設であり、貯蔵量は液化石油ガス22658kgであった。

これより、本評価においては、貯蔵施設から10km圏内における最大貯蔵量となる高圧ガス類貯蔵施設と同等の貯蔵量をもつタンクが、貯蔵施設から最も近い距離3kmの位置に存在するもの（貯蔵施設から3kmの距離に貯蔵量22658kgの高圧ガス類貯蔵施設が存在するもの）と仮定し、これがガス爆発を起こした場合の貯蔵施設への影響評価を実施した。

貯蔵施設からの上記高圧ガス類貯蔵施設の位置関係について第41図に示す。評価対象範囲において最も貯蔵量の多い高圧ガス類貯蔵施設が貯蔵施設に最も近い距離の位置に存在するものと仮定して評価を実施することは、条件的に最も厳しい評価となり、十分に保守的な評価である。



(a) 10km 圏内全体図



(b) 施設周辺部拡大図

第 41 図 貯蔵施設から 10km 圏内の高圧ガス類貯蔵施設の位置

#### 4.1.3.2 評価方法及び評価結果

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

気象条件：無風状態

貯蔵ガス：液化石油ガス（プロパン）

貯蔵ガス K 値<sup>\*1</sup>：888 ×1000（ガイドより引用）

貯蔵量：22658（kg）

貯蔵設備 W 値<sup>\*2</sup>：4.76（貯蔵量(t)の平方根）

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

※1:K 値はコンビナート等保安規定第 5 条別表第二に掲げる数値

※2:W 値は重量 1 t 以上のガスが貯蔵されているタンクであれば(貯蔵量)<sup>1/2</sup>を，1 t 未満のタンクであれば貯蔵量(t)とする。

##### (2) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし，以下の手順で実施した。

##### (a) 危険限界距離の算出

下記の式に基づき，危険限界距離を算出した。

$$X=0.04\lambda\sqrt[3]{K\times W}$$

X：危険限界距離

λ：換算距離：14.4（m・kg<sup>-1/3</sup>）（ガイドより引用）

K：石油類の定数

W：設備定数

この式に，対象となる高圧ガス類貯蔵施設に係る数値を代入して算出すると

$$X=0.04\times 14.4\times\sqrt[3]{888\times 1000\times 4.76}=93.2\text{ (m)}$$

となり，危険限界距離は約 90m となった。

### (3) 貯蔵施設への影響評価結果

ガイドに基づき，想定される高圧ガス類貯蔵施設のガス爆発に対して，当該施設から貯蔵施設までの離隔距離が，評価上必要とされる危険限界距離以上であることを確認する。

貯蔵施設から当該高圧ガス類貯蔵施設までの離隔距離は約 3000m であり，算出した危険限界距離は約 90m であることから，離隔距離は，想定される敷地外危険物貯蔵設備からのガス爆発に対して評価上必要とされる危険限界距離以上であることを確認した。

## 4.2 敷地内の危険物貯蔵設備に対する火災評価

### 4.2.1 評価の考え方

貯蔵施設敷地内には、第 27 表に示す設備を設置する。また、敷地内での危険物貯蔵設備の配置を第 42 図に示す。これらの設備は危険物を内包することから、火災を想定した貯蔵建屋外壁への熱影響評価を実施する。評価方法については、4.1.2.2 と同様に行う。

第 27 表 貯蔵施設敷地内の危険物貯蔵設備

設備名	燃料種別	容量(kℓ)	離隔距離 (m)
エンジン発電機	軽油 (注 2)	1.031	27
電源車・据置型発電機 (注 1)	軽油 (注 2)	0.8375 (注 3)	70
キャスク搬送用特殊車両	軽油 (注 2)	1.08 (注 4)	107
モニタリング ポスト用 発電機	敷地東側 軽油 (注 2)	0.0696	138
	敷地南側 軽油 (注 2)	0.0696	164
電源車	軽油 (注 2)	0.2865	100 (注 5)
軽油貯蔵タンク(地下式)	軽油	12	－(注 6)

(注 1) 電源車については通常敷地南側の予備緊急時対策所付近に配備するが、外部電源喪失時は据置型発電機の位置に移動し使用するため合わせて評価した。

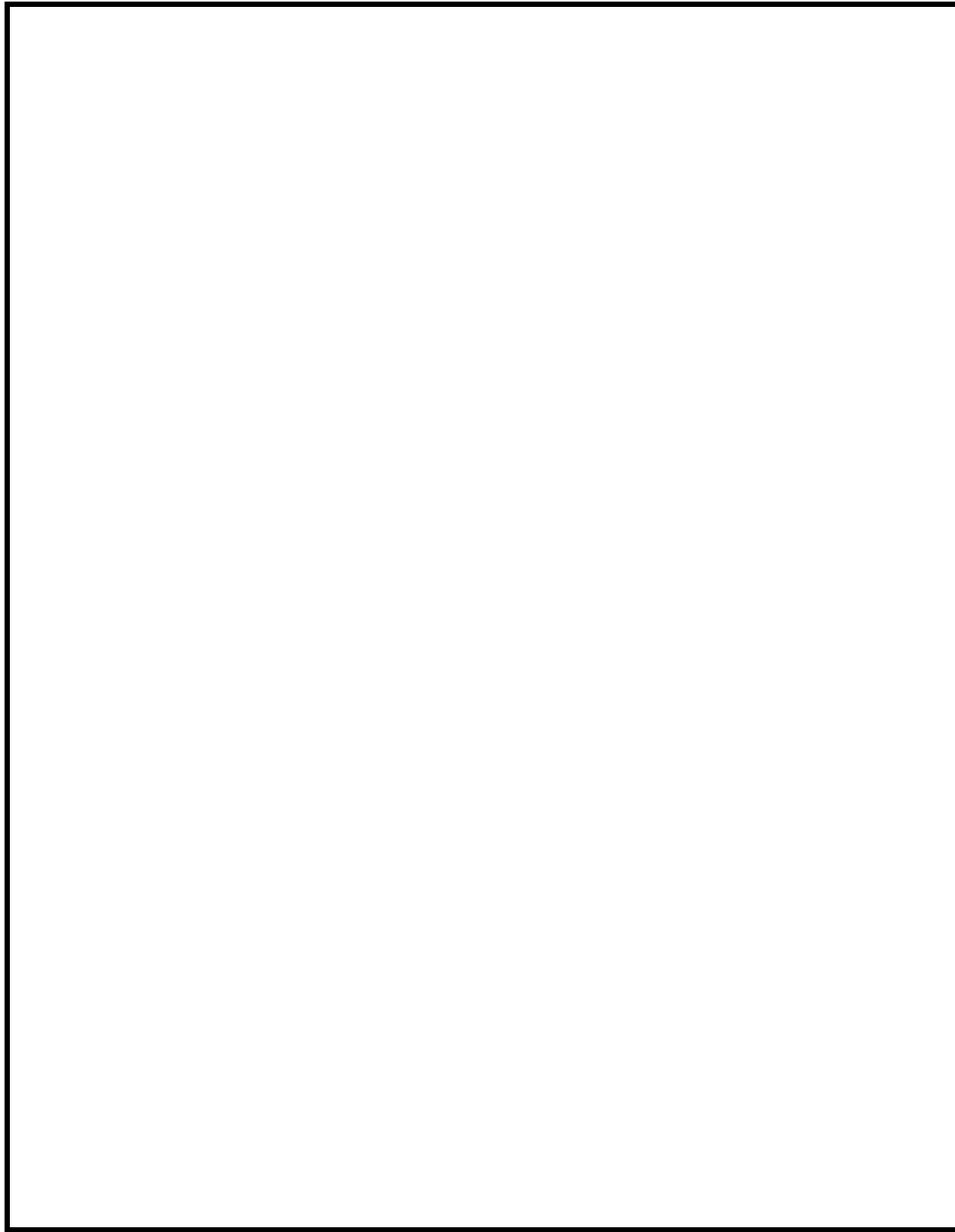
(注 2) 保守的に軽油と潤滑油を合わせて全て軽油とみなした。

(注 3) 設置場所が至近であるため一体とみなし、容量は電源車と据置型発電機の合算値

(注 4) キャスク搬送用特殊車両 2 両分の合算値

(注 5) 予備緊急時対策所を設置する高台のレイアウト上最も貯蔵建屋に近接する距離を保守的に設定した。

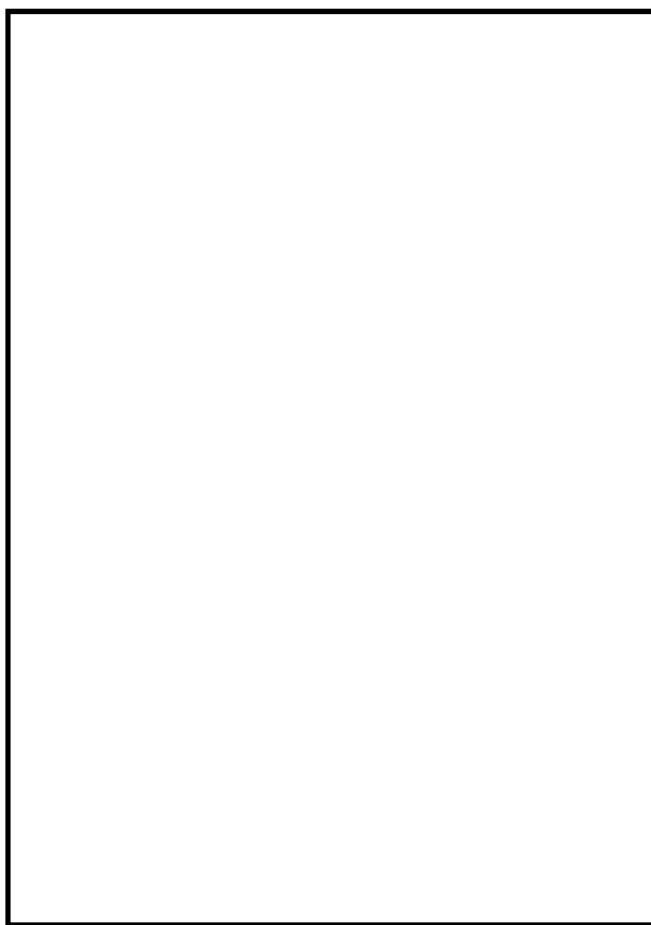
(注 6) 軽油貯蔵タンク(地下式)は外部火災評価の対象外とする(別添 2 参照)。



第 42 図 敷地内の危険物貯蔵設備の設置場所

#### 4.2.2 エンジン発電機の火災評価

貯蔵施設においては、核物質防護設備用として施設の長時間停電に対応する設備である非常用発電機としてエンジン発電機1基を設けている（第43図）。この発電機には、発電機本体に燃料用としての軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクが内蔵されており、本設備から火災が発生した際の影響評価を行った。



第43図 エンジン発電機設置位置

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：軽油 0.99 (kℓ) + 潤滑油 0.041 (kℓ) = 1.031 (kℓ)

火災輻射強度：42000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書Bの軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m<sup>3</sup>) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：4.97 (m<sup>2</sup>) ※エンジン発電機の全長×全幅

(2) 評価対象設備に関する入力データ

建屋からの離隔距離：27.3 → 27 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、1.258 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{4.97/\pi} = 1.258 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m<sup>2</sup>)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.004247 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$



$$n=L/R$$

$\phi$  : 形態係数,  $H$  : 火炎長 (m),  $L$  : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ 178.374 W/m<sup>2</sup> となり, 切り上げて約 178.4 W/m<sup>2</sup> とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.004247 = 178.374 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$E$  : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>),  $R_f$  : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 4059.6 s となり, 切り上げて約 4060 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 1.031 / (4.97 \times 0.0000511) = 4059.6 \Rightarrow 4060 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511, \pi R^2 \doteq S = 4.97$$

$t$  : 燃焼継続時間 (s),  $V$  : 燃料量 (m<sup>3</sup>),  $v$  : 燃焼速度 (m/s),

$m$  : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s),  $\rho$  : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a)～(d)にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$T(x)$  : 表面から  $x$  (m) の位置の温度 (°C),  $T_0$  : 初期温度 (=50 °C),

$k$  : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$  : 温度拡散率 ( $\kappa = k / \rho C_p$ ) (m<sup>2</sup>/s),

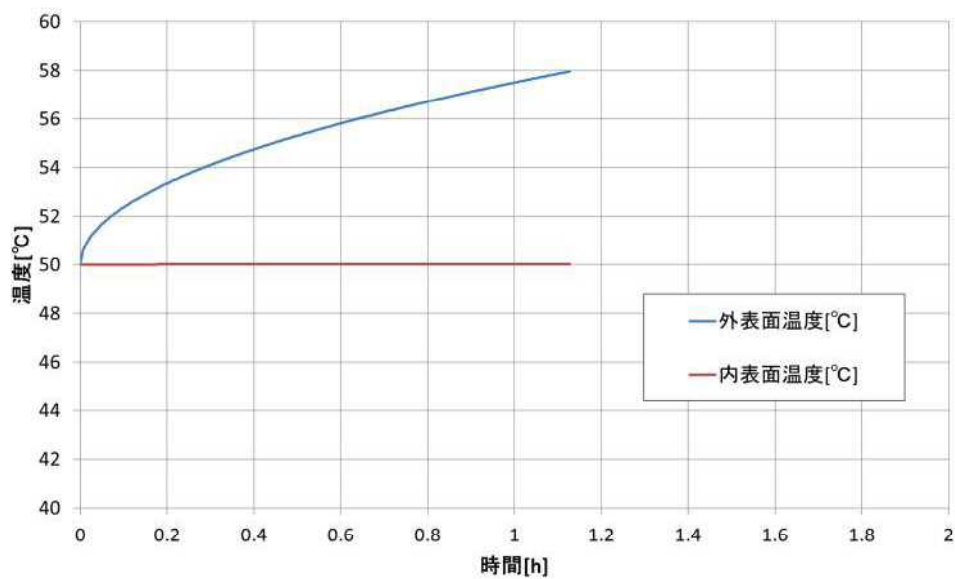
$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C とし, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 8°C となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 58°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°C を下回っており,

これによりエンジン発電機からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

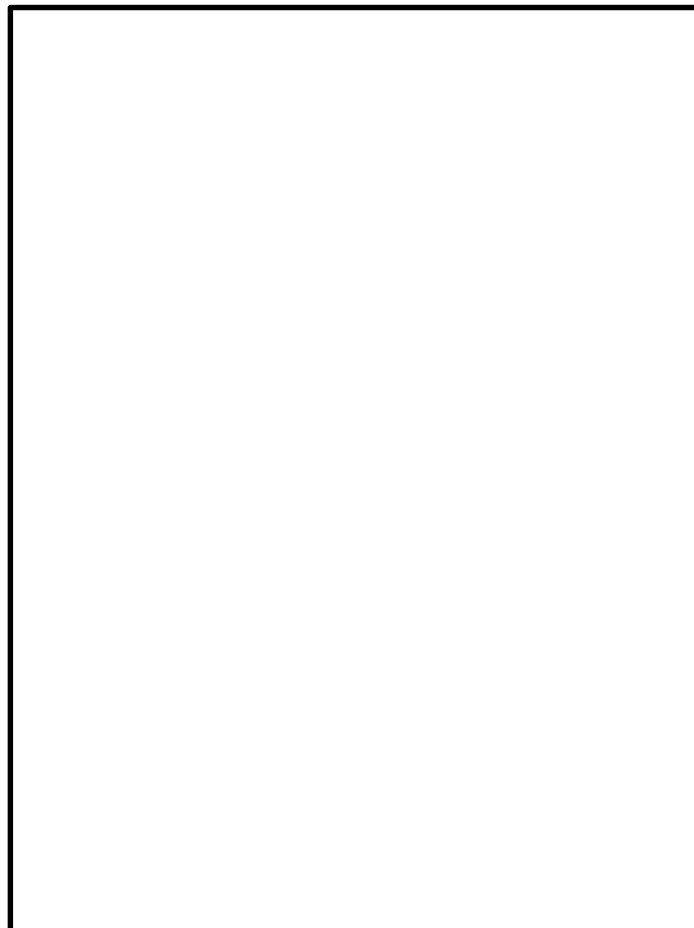
第 44 図に時間に対する温度変化を示す。



第 44 図 貯蔵建屋外壁温度変化（エンジン発電機）

#### 4.2.3 電源車及び据置型発電機の火災評価

貯蔵施設においては、事業者の自主的な取組みとして電気設備に電源車を接続することが可能な設計とし、無停電電源装置等の給電可能時間を超える長時間の停電が発生した場合におけるバックアップとして電源車1台及び据置型発電機を設置することとしている(第45図)。この電源車及び据置型発電機に付随している燃料用の軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクから火災が発生した際の影響評価を行った。電源車は法面の上部に設置されているが、本評価では建屋と同標高に設置されているものと仮定して評価を実施した。



第45図 電源車及び据置型発電機設置位置

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：電源車：軽油 + 潤滑油(車 + 発電機)

$$= 0.25 + 0.03 + 0.0065 = 0.2865 \text{ (k}\ell\text{)}$$

据置型発電機：軽油 0.49 (kℓ) + 潤滑油 0.061 (kℓ)

$$= 0.551 \text{ (k}\ell\text{)}$$

$$\rightarrow \text{合計} : 0.2865 + 0.551 = 0.8375 \text{ (k}\ell\text{)}$$

火炎輻射強度：42000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書 B の軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m<sup>3</sup>) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：20.754 (m<sup>2</sup>) ※電源車及び据置型発電機の寸法  
合計より算出

## (2) 評価対象設備に関する入力データ

建屋からの離隔距離：70 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

## (3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

### (a) 燃焼半径の算出

電源車及び据置型発電機の面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、2.571 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{20.754/\pi} = 2.571 \text{ (m)}$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m<sup>2</sup>)

### (b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従っ

て算出したところ，0.002632 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$  : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ 110.544 W/m<sup>2</sup> となり，切り上げて約 110.6 W/m<sup>2</sup> とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.002632 = 110.544 \Rightarrow 110.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

#### (d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 789.7 s となり，切り上げて約 790 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 0.8375 / (20.754 \times 0.0000511) = 789.7 \Rightarrow 790 \text{ (s)}$$

ここで,  $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511$ ,  $\pi R^2 \doteq S = 20.754$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s),  $\rho$  : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

#### (4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a) ~ (d) にて求めたパラメータにより，伝熱工学資料第 5 版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて，貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

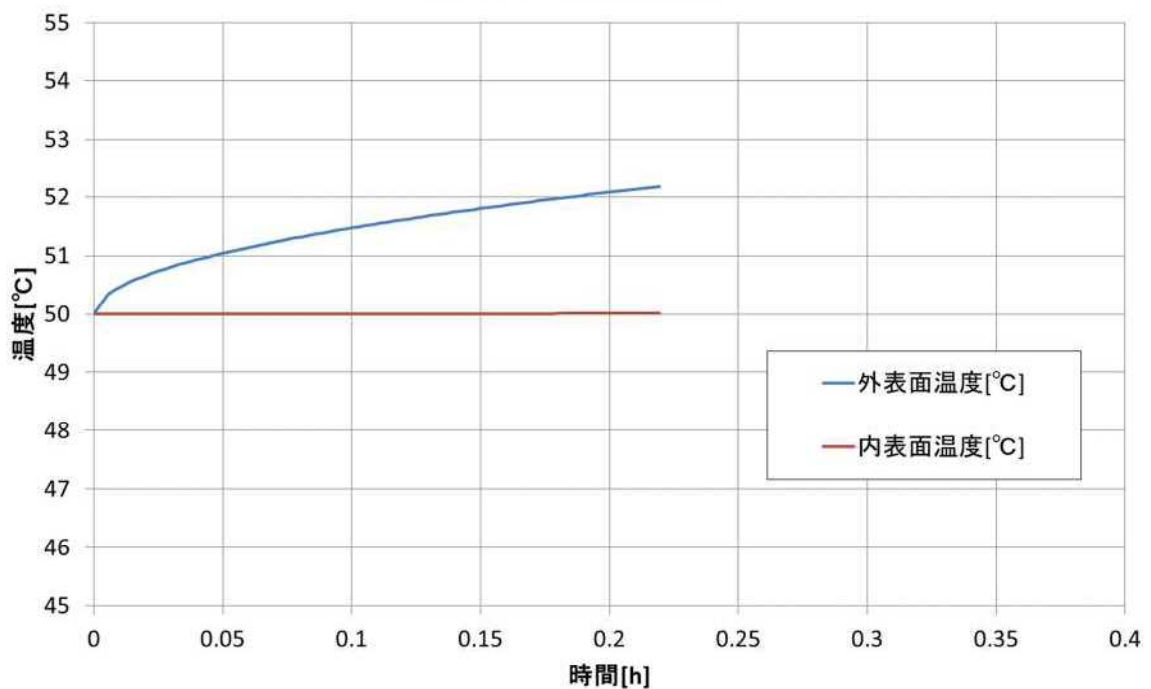
T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (=50 °C),

$k$  : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$  : 温度拡散率 ( $\kappa = k / \rho C_p$ ) ( $m^2/s$ ),  
 $\rho$  : 密度 ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を  $50^{\circ}C$  として, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約  $3^{\circ}C$  となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約  $53^{\circ}C$  となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である  $200^{\circ}C$  を下回っており, これにより電源車及び据置型発電機からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 46 図に時間に対する温度変化を示す。



第 46 図 貯蔵建屋外壁温度変化 (電源車及び据置型発電機)

#### 4.2.4 キャスク搬送用特殊車両の火災評価

貯蔵施設敷地内の特殊車両庫には、キャスク搬送用の特殊車両（トレーラトラック、6軸48輪式自走式ディーゼルエンジン車）2基が常時特殊車両庫に配備される予定となっている（第47図）。この車両に付随している燃料用の軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクから火災が発生した際の影響評価を行った。



第47図 特殊車両庫設置位置

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び作動油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：1.08 (kℓ)

(燃料タンク 0.3 (kℓ) + 作動油タンク 0.24 (kℓ)) × 2

火炎輻射強度：42000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書Bの軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805のDiesel Oilの値

燃料密度：860 (kg/m<sup>3</sup>)

※JIS K 2204-2007

燃焼面積：60.5 (m<sup>2</sup>)

※車両の寸法より算出

(全長 9.48m, 全幅 3.19m) × 2 台)

## (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：107 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

## (3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

### (a) 燃焼半径の算出

車両 2 台の面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、4.389 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{60.5/\pi} = 4.389 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m<sup>2</sup>)

### (b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.003287 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$



$$n=L/R$$

$\phi$  : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ 138.054 W/m<sup>2</sup> となり, 切り上げて約 138.1 W/m<sup>2</sup> とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.003287 = 138.054 \Rightarrow 138.1 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 349.3 s となり, 切り上げて約 350 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 1.08 / (60.5 \times 0.0000511) = 349.3 \Rightarrow 350 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511, \pi R^2 \doteq S = 60.5$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s),  $\rho$  : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a)～(d)にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (=50 °C),

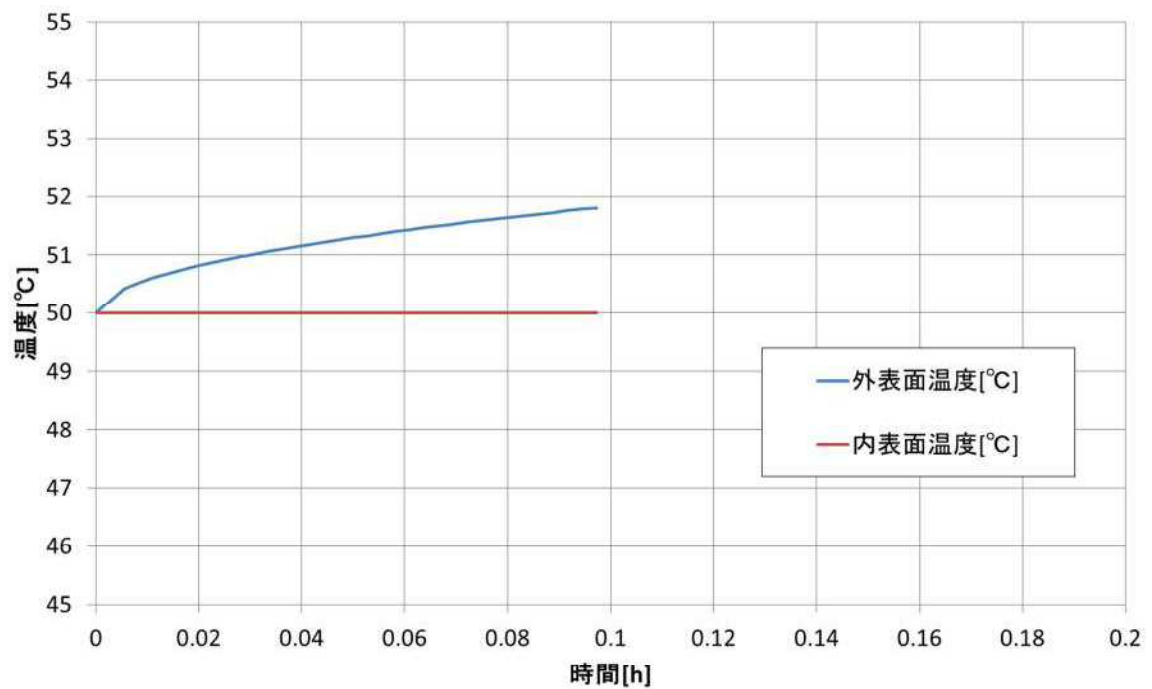
k : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$  : 温度拡散率 ( $\kappa = k / \rho C_p$ ) (m<sup>2</sup>/s),

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C として, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 2°C となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 52°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°Cを下回っており、これにより敷地内キャスク運搬車両からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

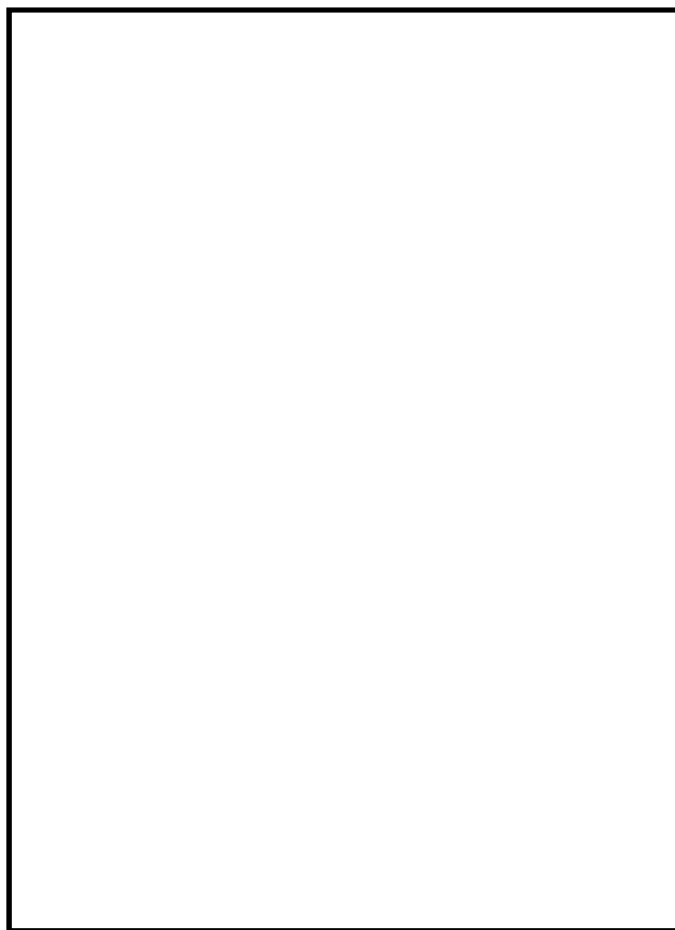
第 48 図に、時間に対する温度変化を示す。



第 48 図 貯蔵建屋外壁温度変化（キャスク搬送用特殊車両）

#### 4.2.5 モニタリングポスト用発電機の火災評価

貯蔵施設においては，周辺監視区域境界に外部放射線監視のためのモニタリングポスト（MP）が2箇所（建屋東側及び南側）設置されており，常時監視のため発電機（据置型ディーゼル発電機）がそれぞれ備え付けられている（第49図）。この発電機に付随している燃料用の軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクから火災が発生した際の影響評価を行った。なお，設置されている発電機は同型式のものである。いずれのMPも法面の上部に設置されているが，本評価では建屋と同標高に設置されているものと仮定して評価を実施した。



第49図 モニタリングポスト用発電機設置位置

##### (1) 火災発生源に関する入力データ（東側，南側とも同じ）

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが，保守性を考慮してすべて

軽油とみなした。

燃料量：0.0696 (kℓ)

(燃料タンク 0.062 (kℓ) + 潤滑油タンク 0.0076 (kℓ))

火炎輻射強度：42000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書 B の軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m<sup>3</sup>) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：1.001 (m<sup>2</sup>) ※発電機の寸法より算出

## (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：東側 138 (m)

南側 164 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

## (3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

### (a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、東側、南側とも 0.565 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{1.001/\pi} = 0.565 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)， S：燃焼面積(m<sup>2</sup>)

### (b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、東側： $3.212 \times 10^{-5}$ 、南側： $2.273 \times 10^{-5}$ と

なった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$  : 形態係数,  $H$  : 火炎長 (m),  $L$  : 離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ,

東側 :  $E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 3.212 \times 10^{-5} = 1.3490 \text{ W/m}^2$  となり,  
切り上げて約  $1.4 \text{ W/m}^2$  とした。

南側 :  $E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 2.273 \times 10^{-5} = 0.9547 \text{ W/m}^2$  となり,  
切り上げて約  $1.0 \text{ W/m}^2$  とした。

$E$  : 輻射強度 ( $\text{W/m}^2$ ),  $R_f$  : 火炎輻射強度 ( $\text{W/m}^2$ )

#### (d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ  $1360.7 \text{ s}$  となり, 切り上げて約  $1361 \text{ s}$  とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 0.0696 / (1.001 \times 0.0000511) = 1360.7 \Rightarrow 1361 \text{ (s)}$$

ここで,  $v = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511$ ,  $\pi R^2 \doteq S = 1.001$

$t$  : 燃焼継続時間 (s),  $V$  : 燃料量 ( $\text{m}^3$ ),  $v$  : 燃焼速度 (m/s),

$m$  : 質量低下速度 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ),  $\rho$  : 燃料密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

#### (4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a) ~ (d) にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

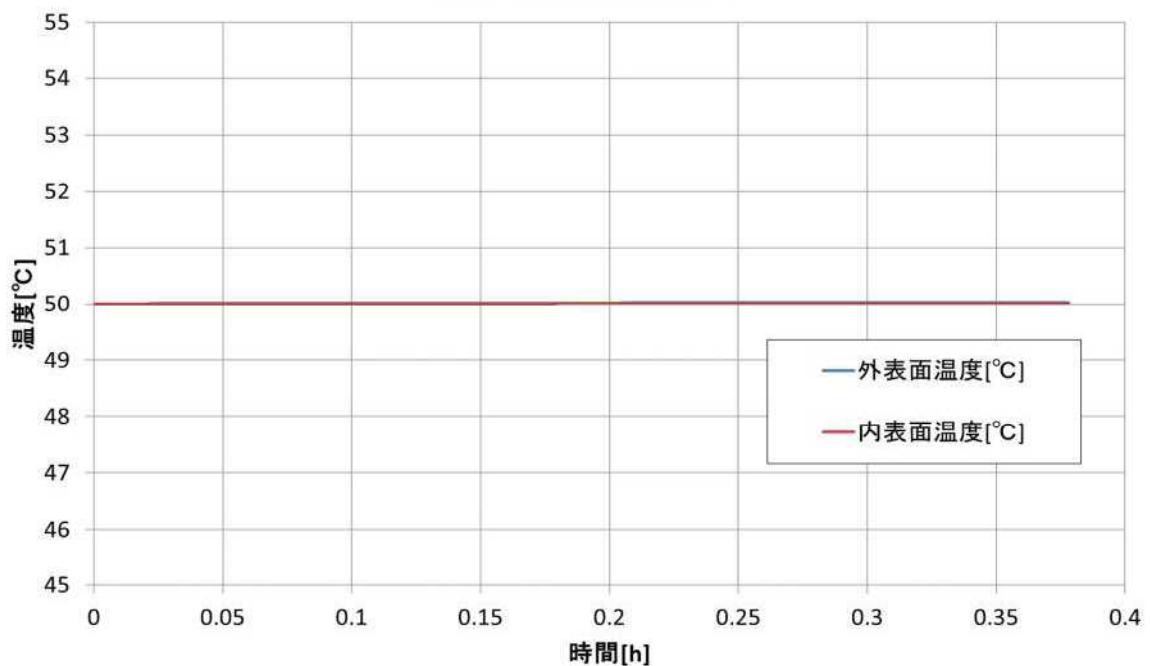
$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$T(x)$ : 表面から  $x$  (m) の位置の温度 (°C),  $T_0$ : 初期温度 (=50 °C),  
 $k$ : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$ : 温度拡散率 ( $\kappa = k / \rho C_p$ ) (m<sup>2</sup>/s),  
 $\rho$ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$ : 比熱 (J/kg/K)

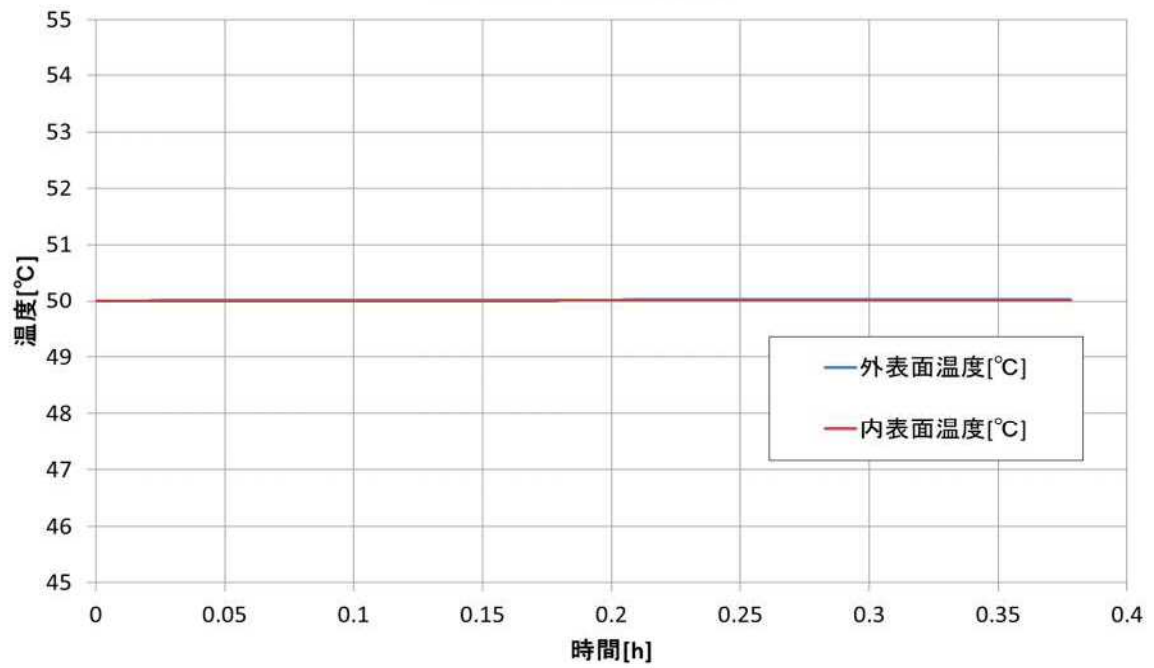
貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C とし、上式により外壁温度上昇量を評価したところ、東側、南側とも約 1°C となり、貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 51°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°C を下回っており、これによりモニタリングポスト用発電機からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 50 図、第 51 図に、時間に対する温度変化を示す。



第 50 図 貯蔵建屋外壁温度変化  
(モニタリングポスト用発電機 東側)

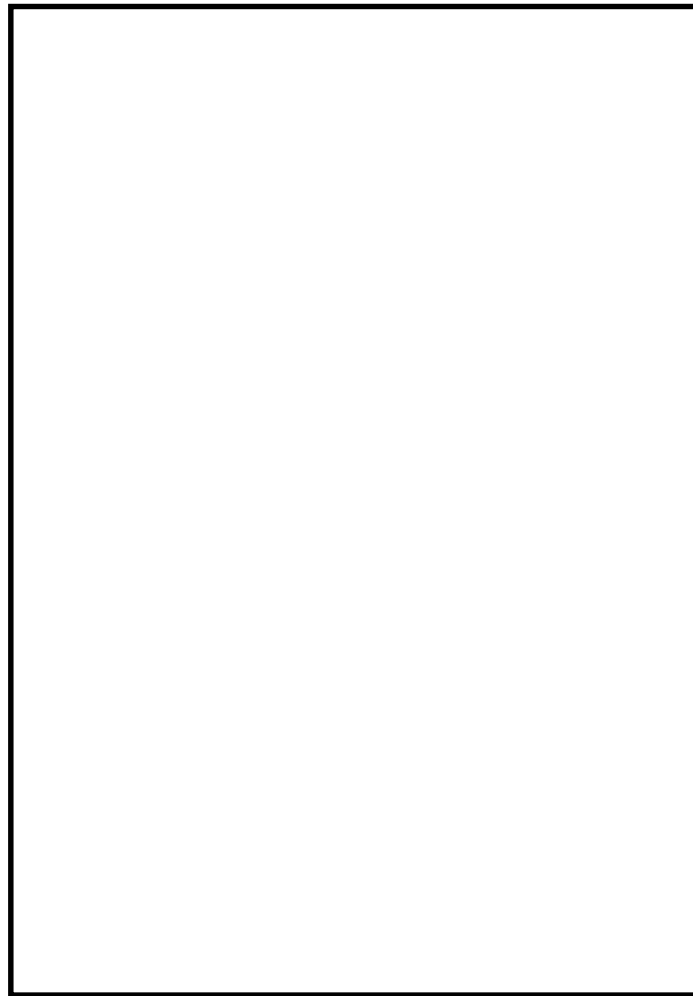


第 51 図 貯蔵建屋外壁温度変化  
 (モニタリングポスト用発電機 南側)

#### 4.2.6 電源車の火災評価

貯蔵建屋南側の敷地高台に予備緊急時対策所を設置する。4.2.3で評価した電源車及び据置発電機の電源車を、通常時には予備緊急時対策所の設置場所に配備する予定である。第52図に示すとおり貯蔵建屋と電源車の距離は少なくとも100m以上離れた位置になるため、離隔距離を100mとして影響評価を行った。

また、設置位置は建屋より標高の高い地点であるが、本評価ではいずれも建屋と同標高に設置されているものと仮定して評価を実施した。



第52図 電源車配備予定位置



(1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：0.2865 (kℓ) (0.25+0.03+0.0065=0.2865)

火炎輻射強度：42000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書 B の軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m<sup>3</sup>) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：14.874 (m<sup>2</sup>) ※電源車の寸法より算出

(2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：100 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、2.176 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{14.874/\pi} = 2.176 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m<sup>2</sup>)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.0009175 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$  : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ, 38.535 W/m<sup>2</sup>となり, 切り上げて 38.6 W/m<sup>2</sup>とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.0009175 = 38.535 \Rightarrow 38.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

#### (d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 376.9 s となり, 切り上げて約 377 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 0.2865 / (14.874 \times 0.0000511) = 376.9 \Rightarrow 377 \text{ (s)}$$

ここで,  $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511$ ,  $\pi R^2 \doteq S = 14.874$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s),  $\rho$  : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

#### (4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a)～(d)にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (=50 °C),

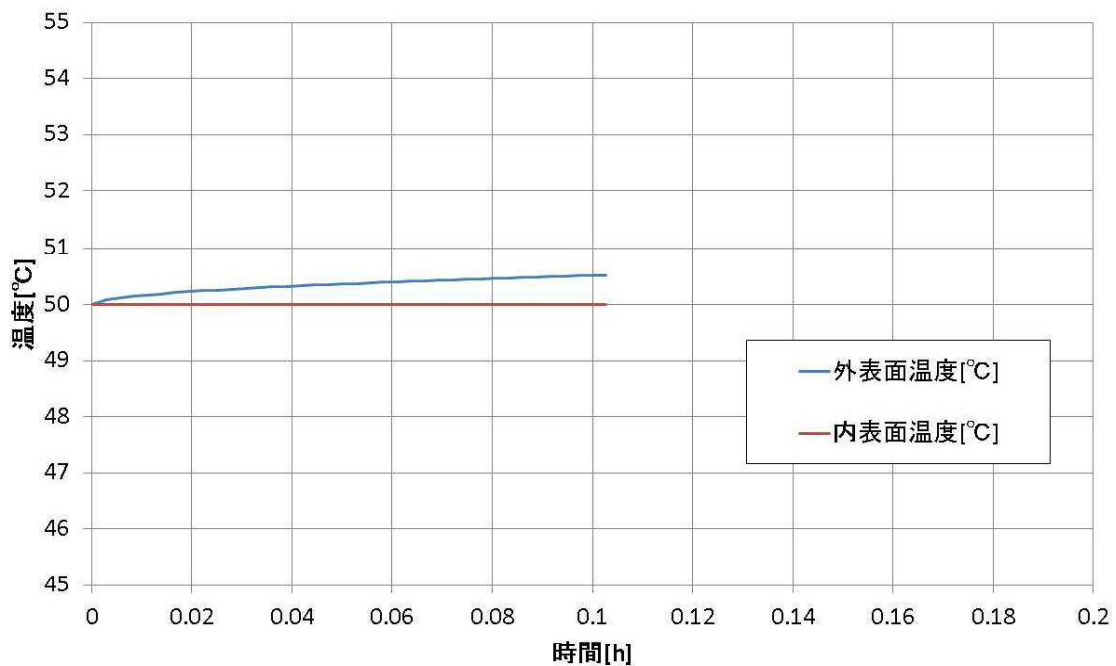
k : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$  : 温度拡散率 ( $\kappa = k / \rho C_p$ ) (m<sup>2</sup>/s),

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50℃として, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 1℃となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 51℃となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200℃を下回っており, 電源車からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 53 図に, 時間に対する温度変化を示す。



第 53 図 貯蔵建屋外壁温度変化 (電源車)

#### 4.2.7 評価結果まとめ

前項までに評価した, 敷地内の各危険物貯蔵設備における火災に対する評価結果について, まとめて第 28 表に示す。

第 28 表 敷地内危険物貯蔵設備における火災評価結果

対象設備 パラメータ	エンジン 発電機	電源車及び 据置型発電機	キャスク搬送 用特殊車両 (2基)	MP用 発電機		電源車
				東側	南側	
建屋からの 離隔距離 (m)	27	70	107	138	164	100
燃焼半径 (m)	1.258	2.571	4.389	0.565		2.176
形態係数	0.004247	0.002632	0.003287	$3.212 \times 10^{-5}$	$2.273 \times 10^{-5}$	0.0009175
輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )	178.4	110.6	138.1	1.4	1.0	38.6
燃焼継続時間 (s)	4060	790	350	1361		377
外壁温度 (°C)	58	53	52	51	51	51

評価結果より、敷地内危険物貯蔵設備の火災においては建屋から最も近い離隔距離であるエンジン発電機からの火災が最も厳しい評価結果となったが、建屋外壁の許容温度をいずれも下回っていることを確認した。

## 5. 航空機墜落による火災の影響評価について

### 5.1 評価の考え方

航空機墜落による火災の貯蔵建屋への影響評価については、ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に基づき評価を実施した。

評価対象とする航空機の選定については、「航空機落下事故に関するデータの整備」（独立行政法人 原子力安全基盤機構，JNES/SAE08-01208 解部報-0012，平成20年3月）のデータをもとに，過去の国内における墜落事故の実績を，航空機の種類，飛行形態等に応じてカテゴリ別に分類する。具体的には，民間航空機については計器飛行方式（大型固定翼機）と有視界飛行方式（大型固定翼機，小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機），軍用機（自衛隊機，米軍機）については大型／小型固定翼機，大型／小型回転翼機を訓練空域内／外及び基地から訓練空域への往復時のカテゴリに分けて，それぞれS62～H18の20年間における事故件数を調査した。事故件数が0の場合は，保守的に件数を0.5とした。ただし，民間航空機と軍用機では訓練中の事故等，その発生状況が必ずしも同一ではないこと，また軍用機の中においても機種により飛行形態が同一でないと考えられることから，これらの状況も踏まえて軍用機については攻撃性の少ない高高度飛行を行う大型固定翼機とそれ以外の機種を分けてカテゴリ分けを実施した。

これらカテゴリ別の事故件数から，それぞれの墜落確率を求めた結果について第29表に示す。計器飛行方式の民間航空機の墜落確率の算出にあたっては貯蔵施設上空にかかる航空路の延べ飛行距離が必要であるため，国土交通省の航空輸送統計年報（S63～H19分）のデータをもとに積算を行った。また，貯蔵施設上空には軍用機の訓練空域はないことから，訓練空域内の墜落事故については除外した。

第 29 表 カテゴリ別の航空機墜落確率の一覧

カテゴリ		墜落確率 (回／施設・年)	
民間航空機	①計器飛行方式（大型固定翼機）	$9.20 \times 10^{-10}$	
	有視界方式	②大型固定翼機	$1.09 \times 10^{-9}$
		③その他機種*1	$1.11 \times 10^{-8}$
軍用機（自衛隊機， 米軍機）	訓練空域外 の墜落事故*2	④高高度飛行*3を 行う大型固定翼機	$1.79 \times 10^{-9}$
		⑤その他の機種*1	$1.52 \times 10^{-8}$
	⑥基地－訓練空域往復時の墜落 事故	$2.13 \times 10^{-8}$	

\*1:小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機

\*2:貯蔵施設上空には自衛隊機，米軍機の訓練空域はない

\*3:高度 5 万フィート以上の飛行（空中給油機，哨戒機等）

墜落のカテゴリについては上記のとおり①～⑥の 6 つに分類したが，このうち有視界方式民間航空機における②大型固定翼機，及び③その他の機種（小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機）については，いずれも軍用機の訓練空域外墜落事故における機種④及び⑤と同等あるいは燃料量の小さい機種であり，墜落確率もそれぞれ軍用機の確率より小さいことから，有視界方式民間航空機の各カテゴリについては，より墜落確率の高い軍用機の訓練空域外墜落事故の同機種のカテゴリに包絡されるものとした。（②は④に包絡，③は⑤に包絡）

したがって，航空機墜落確率におけるカテゴリについてはさらに以下の 4 つに分類した。

- ① 民間航空機（計器飛行方式）の墜落事故
- ④ 軍用機（訓練空域外のうち高高度飛行を行う大型固定翼機）の墜落事故（民間航空機（有視界方式）のうち大型固定翼機を包絡）
- ⑤ 軍用機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故（民間航空機（有視界方式）のうちその他機種を包絡）
- ⑥ 軍用機（基地－訓練空域間往復時）の墜落事故

分類した 4 つのカテゴリにおいて，燃料積載量が最大となる機種をそれぞれ選定した。評価対象とする航空機の選定結果について第 30 表に示す。

第 30 表 評価対象航空機の選定結果

評価項目	民間航空機 (計器飛行方式)	軍用機 (訓練空域外 高高度飛行)	軍用機 (訓練空域外そ の他の機種)	軍用機 (基地－訓練 空域間往復時)
対象航空機	B747-400	KC-767(注1)	F-15(注2)	UH-60J(注3)

(注1) ボーイング767型機を母機とした空中給油・輸送機(航空自衛隊に配備)

(注2) 制空戦闘機(米空軍, 航空自衛隊に配備)

(注3) 海上自衛隊大湊飛行場に現状配備されている機種で最大の燃料搭載量となる救難ヘリコプター

## 5.2 評価方法及び評価結果

### 5.2.1 民間航空機(計器飛行方式)の墜落事故の火災評価

#### 5.2.1.1 墜落地点の想定

##### (1) 標的面積

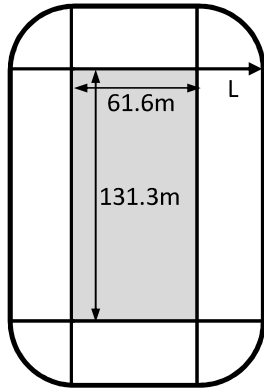
「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率  $10^{-7}$  (回/炉・年) に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は  $0.0081 \text{ km}^2$  であることから、航空機の墜落確率が  $10^{-7}$  (回/炉・年) となる標的面積  $S$  を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (9.20 \times 10^{-10}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 880434.79 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

##### (2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 469 \text{ m}$  となった。



$$\pi L^2 + 2(131.3 + 61.6)L + 131.3 \times 61.6 = S$$

これをLについて解くと

$$L = \frac{-(131.3 + 61.6) + \sqrt{(131.3 + 61.6)^2 - \pi(131.3 \times 61.6 - S)}}{\pi}$$

となる。

第 54 図 離隔距離算出のイメージ

### 5.2.1.2 火災影響評価

#### (1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：ボーイング 747-400

燃料の種類：JET A-1

燃料量：216.84 (kℓ) ※ボーイングジャパン web サイト記載値

火災輻射強度：50000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.039 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の灯油の値

燃料密度：840 (kg/m<sup>3</sup>) ※JIS K 2209-1991 の JET A-1 の値

燃焼面積：700 (m<sup>2</sup>) ※ボーイング社ホームページ資料「747-400 Airplane Characteristics for Airport Planning」記載の同型機の機体図面より主翼底面積及び主翼部分の胴体下部及び水平尾翼部分を足したものを燃焼面積とした。

#### (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離 469 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第 5 版の石灰岩コンクリートの値



### (3) 評価方法

ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

#### (a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、14.928 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{700/\pi} = 14.928 \text{ (m)}$$

R : 燃焼半径 (m), S : 燃焼面積 (m<sup>2</sup>)

#### (b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.001973 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$  : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、98.65 W/m<sup>2</sup> となり、切り上げて 約 98.7 W/m<sup>2</sup> とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.001973 = 98.65 \Rightarrow 98.7 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

#### (d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、6676.1 s となり、切り上げて 約 6677s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 216.84 / (700 \times 0.0000464) = 6676.1 \Rightarrow 6677 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.039}{840} = 0.000046429 \Rightarrow 0.0000464, \quad \pi R^2 \doteq S = 700$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s), ρ : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

#### (e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (°C),

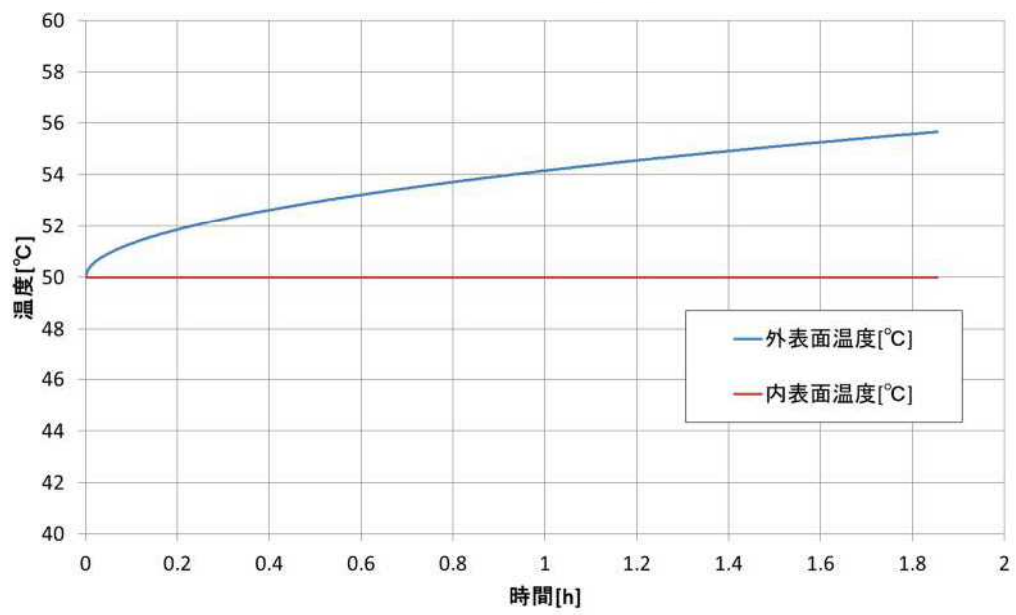
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C<sub>p</sub>) (m<sup>2</sup>/s),

ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

#### (4) 貯蔵建屋への影響評価

計器飛行方式民間航空機の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ、建屋外壁の最高温度は約 56°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 55 図に時間に対する温度変化を示す。



第 55 図 貯蔵建屋外壁温度変化（計器飛行方式民間航空機）

## 5.2.2 軍用機（訓練空域外のうち高高度飛行を行う機種）の墜落事故の火災評価

### 5.2.2.1 墜落地点の想定

#### (1) 標的面積

「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」に基づき、墜落確率  $10^{-7}$ （回／炉・年）に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は  $0.0081 \text{ km}^2$  であることから、航空機の墜落確率が  $10^{-7}$ （回／炉・年）となる標的面積  $S$  を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (1.79 \times 10^{-9}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 452513.97 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

#### (2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すとおり離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 319\text{m}$  となった。

### 5.2.2.2 火災影響評価

#### (1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：KC-767

燃料の種類：JP-4

燃料量：145.04 (kℓ) ※世界航空機年鑑 2012-2013 記載値

火炎輻射強度：58000 ( $\text{W/m}^2$ ) ※ガイド付属書 B のガソリンの値

質量低下速度：0.051 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ) ※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃料密度：760 ( $\text{kg/m}^3$ ) ※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃焼面積：405.2 ( $\text{m}^2$ ) ※ボーイング社ホームページ資料「767 Airplane Characteristics for Airport Planning」記載の同型機の機体図面より主翼底面積及び胴体下部を燃焼面積と想定し面積を算出した

#### (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：319 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

### (3) 評価方法

ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

#### (a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、11.357 mとなった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{405.2/\pi} = 11.357 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積 (m<sup>2</sup>)

#### (b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.002472となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$ ：形態係数，H：火炎長 (m)，L：離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、143.376 W/m<sup>2</sup>となり、切り上げて約143.4 W/m<sup>2</sup>とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.002472 = 143.376 \Rightarrow 143.4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い, 次式により算出したところ, 5334.5 s となり, 切り上げて約 5335 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 145.04 / (405.2 \times 0.0000671) = 5334.5 \Rightarrow 5335 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671, \pi R^2 \doteq S = 405.2$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s), ρ : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (°C),

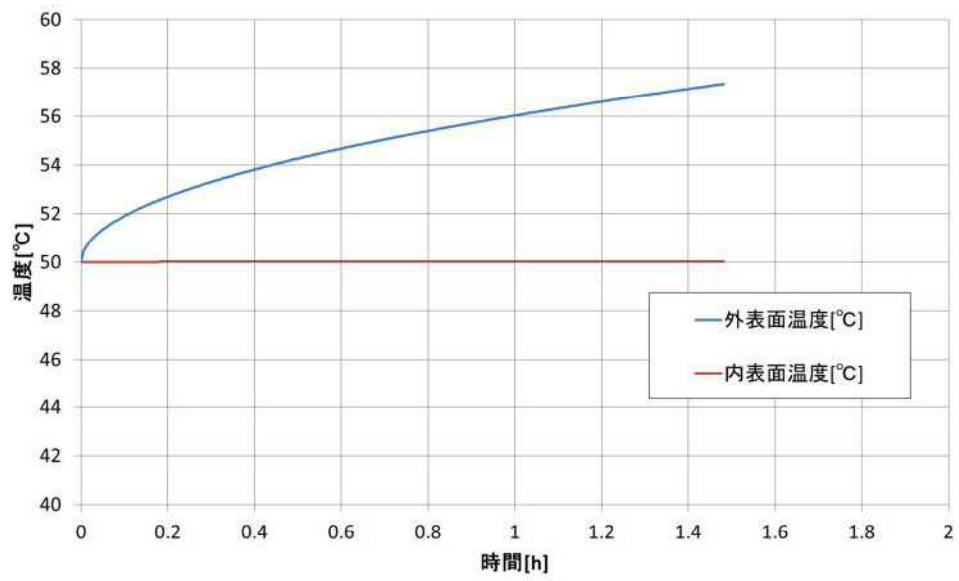
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C<sub>p</sub>) (m<sup>2</sup>/s),

ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

軍用機 (訓練空域外のうち高高度飛行を行う機種) の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ, 建屋外壁の最高温度は約 58°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 56 図に時間に対する温度変化を示す。



第 56 図 貯蔵建屋外壁温度変化（訓練空域外(高高度飛行)）

### 5.2.3 軍用機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故の火災評価

#### 5.2.3.1 墜落地点の想定

##### (1) 標的面積

「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」に基づき、墜落確率  $10^{-7}$ （回／炉・年）に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は  $0.0081 \text{ km}^2$  であることから、航空機の墜落確率が  $10^{-7}$ （回／炉・年）となる標的面積  $S$  を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (1.52 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 53289.47 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

##### (2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 73 \text{ m}$  となった。

#### 5.2.3.2 火災影響評価

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：F-15

燃料の種類：JP-4

燃料量：14.87 (kℓ) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イーグル  
(航空ジャーナル社 昭和 55 年 2 月 5 日発行) 記載値

火炎輻射強度：58000 ( $\text{W/m}^2$ ) ※ガイド付属書 B のガソリンの値

質量低下速度：0.051 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ) ※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃料密度：760 ( $\text{kg/m}^3$ ) ※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃焼面積：44.6 ( $\text{m}^2$ ) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イーグル記載の図面より算出した。

##### (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：73 (m)

外壁の熱的物性：



密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

### (3) 評価方法

ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

#### (a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、3.768 mとなった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{44.6/\pi} = 3.768 \text{ (m)}$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積 (m<sup>2</sup>)

#### (b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.005217となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$ ：形態係数，H：火炎長 (m)，L：離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、302.586 W/m<sup>2</sup>となり、切り上げて約302.6 W/m<sup>2</sup>とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.005217 = 302.586 \Rightarrow 302.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、4968.8 s となり、切り上げて約 4969 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 14.87 / (44.6 \times 0.0000671) = 4968.8 \Rightarrow 4969 \text{ (s)}$$

ここで、 $v = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671$ ,  $\pi R^2 \doteq S = 44.6$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s), ρ : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (°C),

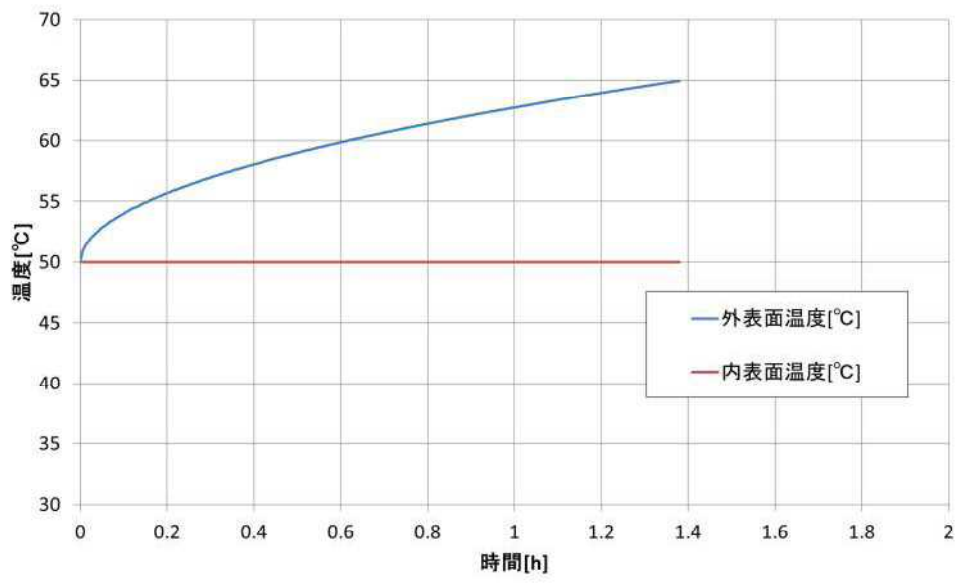
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C<sub>p</sub>) (m<sup>2</sup>/s),

ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

軍用機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ、建屋外壁の最高温度は約 65°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 57 図に、時間に対する温度変化を示す。



第 57 図 貯蔵建屋外壁温度変化（訓練空域外（その他機種））

## 5.2.4 軍用機（基地-訓練空域間往復時）の墜落事故の火災評価

### 5.2.4.1 墜落地点の想定

#### (1) 標的面積

「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」に基づき、墜落確率  $10^{-7}$  (回/炉・年) に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は  $0.0081 \text{ km}^2$  であることから、航空機の墜落確率が  $10^{-7}$  (回/炉・年) となる標的面積  $S$  を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (2.13 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 38028.17 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

#### (2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 53 \text{ m}$  となった。

### 5.2.4.2 火災影響評価

#### (1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：UH-60J

燃料の種類：JP-5

燃料量：7.21 (kℓ) ※(最大離陸重量-空虚重量)/燃料密度  
= 燃料量とした

火炎輻射強度：50000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.054 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃料密度：810 (kg/m<sup>3</sup>) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃焼面積：46.6 (m<sup>2</sup>) ※保守的に全長×全幅＝燃焼面積とした

#### (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：53 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料 第5版の石灰岩コンクリートの値

### (3) 評価方法

ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

#### (a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、3.852 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{46.6/\pi} = 3.852 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径 (m)，S：燃焼面積 (m<sup>2</sup>)

#### (b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.01035 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$ ：形態係数，H：火炎長 (m)，L：離隔距離 (m)

#### (c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、約 517.5 W/m<sup>2</sup> とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.01035 = 517.5 \quad (\text{W/m}^2)$$

E：輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)，R<sub>f</sub>：火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、2323.1 s となり、切り上げて約 2324 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 7.21 / (46.6 \times 0.0000666) = 2323.1 \Rightarrow 2324 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで、} v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.054}{810} = 0.000066667 \Rightarrow 0.0000666, \quad \pi R^2 \doteq S = 46.6$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s),  
m : 質量低下速度 (kg/m<sup>2</sup>/s), ρ : 燃料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

(e) 外壁温度の算出

「伝熱工学資料 第5版」に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

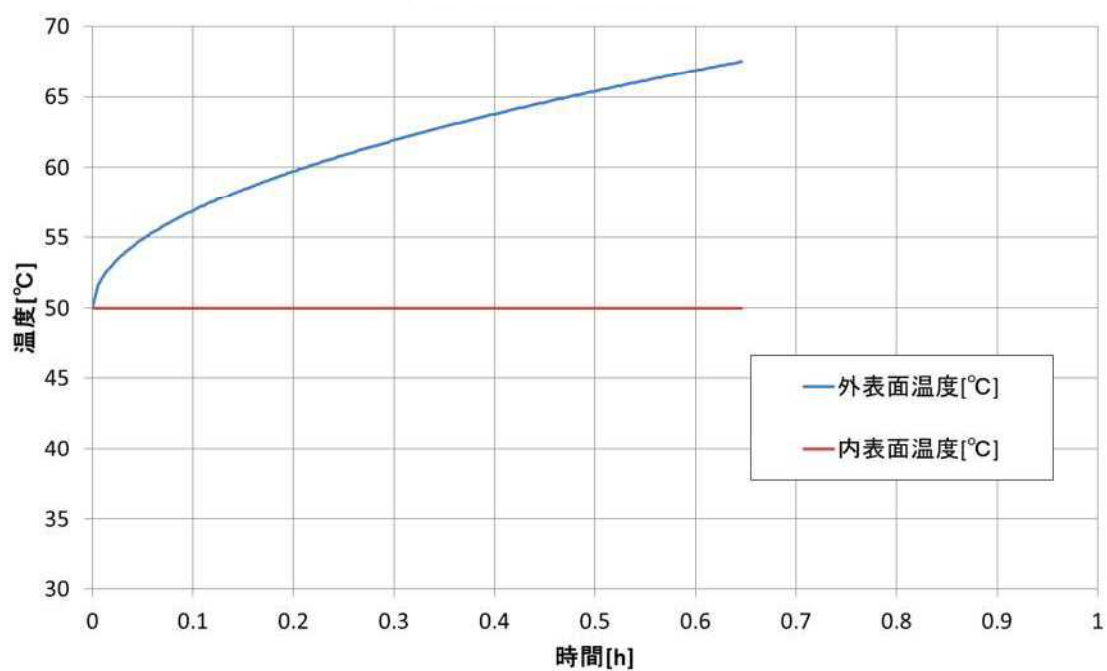
$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (°C),  
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C<sub>p</sub>) (m<sup>2</sup>/s),  
ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

軍用機（基地-訓練空域間往復時）の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ、建屋外壁の最高温度は約 68°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 58 図に時間に対する温度変化を示す。



第 58 図 貯蔵建屋外壁温度変化（基地－訓練空域間往復時）

### 5.2.5 評価結果まとめ

以上，4つのカテゴリ別の評価結果一覧について，第31表に示す。

第31表 評価結果まとめ

評価項目	①民間機 (計器飛行方式)	②軍用機 (訓練空域外高高度飛行)	③軍用機 (訓練空域外その他の機種)	④軍用機 (基地－訓練空域間往復時)
離隔距離(m)	469	319	73	53
燃焼半径(m)	14.928	11.357	3.768	3.852
形態係数	0.001973	0.002472	0.005217	0.01035
輻射強度(W/m <sup>2</sup> )	98.7	143.4	302.6	517.5
燃焼継続時間(s)	6677	5335	4969	2324
外壁温度(℃)	56	58	65	68

火災影響評価結果より，建屋外壁の表面温度が最高値となるものは，「④軍用機(基地－訓練空域間往復時)」における68℃であり，当該最高値においてもコンクリートの許容温度である200℃以下であることを確認した。

なお，この時の離隔距離は約53mとなったが，保守的に50m(事業変更許可申請書(平成26年1月15日申請)記載値)とした場合の外壁温度について評価した結果，輻射強度は581kW/m<sup>2</sup>，外壁温度は約70℃となり許容温度200℃以下であることを併せて確認した。



## 6. 火災による金属キャスクへの影響について

### 6.1 評価の考え方

外部火災に関して、森林、敷地外危険物貯蔵設備、敷地内危険物貯蔵設備及び航空機墜落のそれぞれの要因に対して個別に評価を実施し、いずれも貯蔵建屋に影響のないことを確認したが、貯蔵建屋は自然換気構造であり、火災の影響によって建屋内の空気温度や流れの状態の変化が金属キャスクに影響を及ぼすことが考えられる。

輻射熱による建屋外壁温度評価以外に、各外部火災（森林、敷地外、敷地内危険物及び航空機墜落）による建屋内空気温度の上昇量や金属キャスクの温度上昇量を算出し、金属キャスクの各部の温度と比較することで基本的安全機能に影響を及ぼすことのないことを確認する。評価対象とする各火災の評価結果については、それぞれ最も厳しい評価結果を用いる。また、森林と敷地外危険物貯蔵施設、敷地内危険物貯蔵設備と航空機墜落による火災の重畳についても併せて評価した。

火災により貯蔵建屋内の空気が加熱される過程及び温度や空気の流れの変化による金属キャスクの温度が上昇する過程については、以下が考えられる。

- ・ 輻射熱を受けた貯蔵建屋外壁からの熱伝達による加熱
- ・ 貯蔵建屋の給気口から侵入した熱気流による加熱
- ・ 貯蔵建屋内の空気循環状態の変化による金属キャスクの除熱機能低下

これらの過程についてそれぞれ建屋内空気温度の上昇量の評価を行い、上昇後の空気温度が金属キャスクに与える影響について評価を実施した。

また、金属キャスク各部材の評価基準について、第 32 表に示す。

第 32 表 金属キャスク各部の評価基準

評価部位	評価基準値 (℃)	設定根拠
胴，外筒，蓋	350	日本機械学会(JSME)設計・建設規格で定めている温度範囲の上限値を評価基準値として設定。
中性子遮蔽材	150	樹脂開発メーカーの技術資料，文献等を参考にしゃへい性能の健全性が維持される評価基準値として設定。
金属ガスケット	130	金属ガスケットの長期健全性に関する文献等から，長期間の閉じ込め機能が維持できる値として設定。
燃料被覆管	300	機械的特性の低下を防止する観点から，水素化物再配向及び照射硬化回復による機械的特性の低下が見られない制限温度として設定。

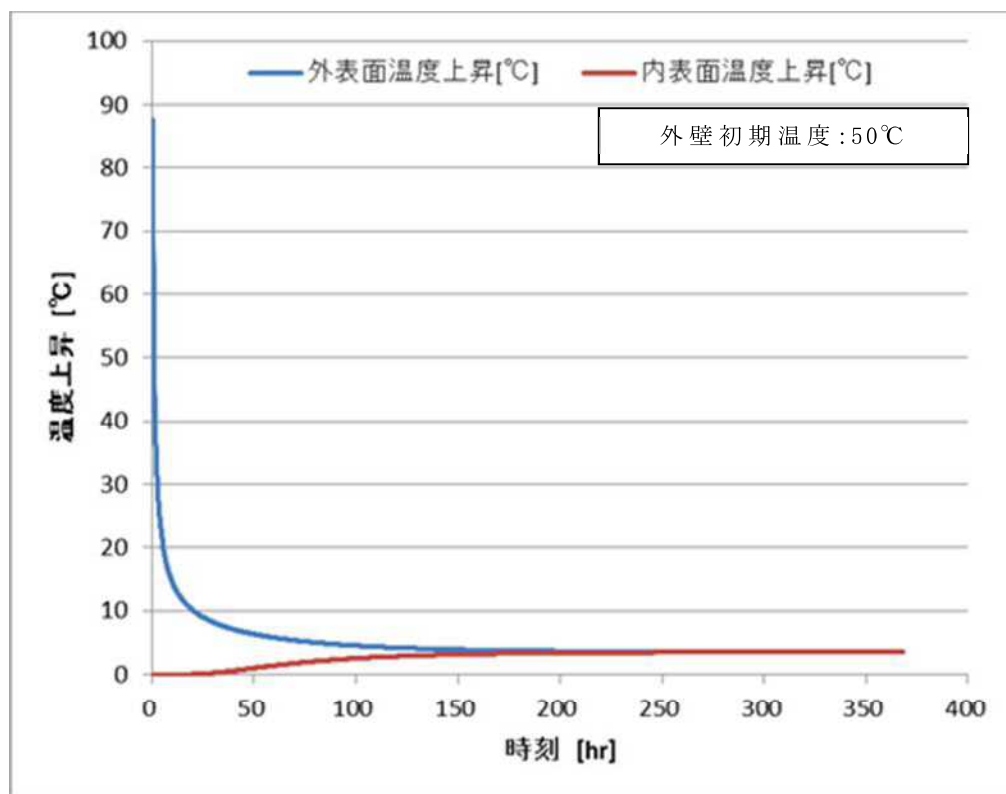
## 6.2 森林火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

### 6.2.1 輻射熱を受けた貯蔵建屋外壁からの熱伝達による加熱

森林火災による火炎からの輻射熱により貯蔵建屋外壁温度が上昇し、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇を考える。

貯蔵建屋外壁は大きな熱容量を持っているため、貯蔵建屋外壁の外表面での温度上昇が内表面の温度に変化をもたらすまでには大きな時間遅れが伴う。外部火災による貯蔵建屋外壁への熱影響評価において、外壁温度が最も厳しい結果となった森林火災評価の発火点1（発火時刻 7:56）における外壁の温度変化を第 59 図に示す。建屋外壁の内表面の温度上昇は極めて緩やかであり、火災収束後の建屋外壁からの放熱を無視した評価でも、100 時間以上の時間を経て最大でも 5℃未満程度の上昇に留まっている。

このため、外部火災の影響による外壁内表面温度上昇はわずかであることから、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇はほとんど無視できると考えられる。



第 59 図 森林火災による建屋外壁（外表面，内表面）温度上昇の時間変化（発火点 1（発火時刻 7:56））

### 6.2.2 貯蔵建屋の給気口から侵入した熱気流による加熱

貯蔵建屋は自然換気構造であるため，森林火災により発生する熱気流が周囲の風況の影響により貯蔵建屋に向かうことが想定される。その場合，熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内空気温度が上昇することが考えられるため，熱気流の影響による空気温度上昇についても評価を実施した。

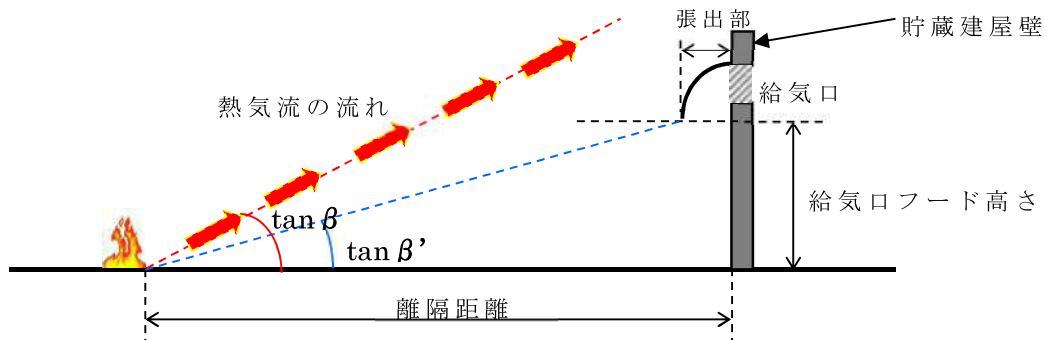
#### (1) 評価方針

火災源から発生した熱気流が風により直接給気口から侵入することで冷却空気入口温度が上昇する事象を想定する。

第 60 図に評価の概念図を示す。森林火災からの火災による熱気流の主軸傾き角 ( $\tan \beta$ ) が，火災発生源と給気口フード下端とを結ぶ直線の傾き角 ( $\tan \beta'$ ) より大きい場合は，熱気流は建屋上方へ拡散し建屋内空気温度への影響はないが，本評価においては保守的に熱気流が直接給気口に当たる ( $\tan \beta = \tan \beta'$ ) 場合を想定し，その際の

風速を設定する。

現実的には発火点の位置や上昇気流，また気象条件の影響も考慮すれば火災からの熱気流が全て給気口に到達し侵入することは考えられないが，本評価においては保守的に評価結果より得られた離隔距離に最大火線強度となる火災源を置き，発生する熱気流が直接給気口に侵入するような風速を設定して評価した。



第 60 図 評価概念図

## (2) 評価条件

### (a) 物性値

森林火災評価において作成した気象データの最高気温での空気の物性値（35℃，1気圧）の値とする。

比熱：1.007 (kJ/kg/K)

密度：1.1463 (kg/m<sup>3</sup>)

### (b) 貯蔵建屋に関するデータ

- ・ 給気フード高さ

6.7 (m)

- ・ 火炎から給気フードまでの水平距離

給気口フードの張出しは 2 m であるため，火災影響評価による離隔距離より 2 m 減じた値となる。

22 - 2 = 20 (m)

- ・ 火災発生源と給気フード位置を結ぶ直線の傾き ( $\tan \beta'$ )

$\tan \beta' = 6.7/20 = 0.335$

(c) 熱気流の主軸傾き角及び温度評価に係るパラメータ

・ 周囲空気温度 ( $T_0$ )

森林火災評価において作成した気象データの内最高気温を周囲空気温度とする。

$$T_0 = 34.7 \approx 35 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

・ 風速 ( $U$ )

森林火災評価における最大火線強度の発生位置については、貯蔵建屋を取り囲む防火帯を含む非燃焼領域の外縁であり、建屋から 22 m 以上離隔している位置であるが、保守的に必要防火帯幅として算出した離隔距離 22 m を採用し、貯蔵建屋から 22 m 離れた地点で最大火線強度をもつ火災が発生したと想定し、この位置における火災による熱気流が給気口に直接当たるような風速を求めた。(第 60 図において  $\tan \beta = \tan \beta'$  となるときの風速) その結果、 $U = 3.72 \text{ (m/s)}$  となった。

(d) 熱源寸法 (D)

外壁温度が最大となった森林火災評価結果 (発火点 1 (発火時刻 7:56)) における燃焼面積から等価直径を算定する。

$$D = \sqrt{F' \cdot \pi \cdot R^2} = \sqrt{11.2782 \times \pi \times 0.4433333^2} = 2.64 \text{ (m)}$$

$$\text{円筒火炎個数}^{*1} : F' \text{ (個)} \quad (F' = 10/2R)$$

$$\text{燃焼半径}^{*2} : R \text{ (m)}$$

※1: 10m メッシュ内に燃焼半径から算出した  $F'$  個の火炎が存在するものとして算定

※2: FARSITE 評価で得られた火炎長に 1/3 を乗じて算出した値

(e) 熱気流の主軸傾き角

佐賀の有風時の火災による熱気流の主軸傾き角式<sup>(7)</sup>を用いる。

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o}$$

$$Fr = U/\sqrt{D \cdot g}$$

ここで、

実験定数<sup>(7)</sup> :  $C_t (= 0.37)$  (-)

風速の無次元パラメータ :  $\Lambda = (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3}$

フルード数 :  $Fr = U / \sqrt{D \cdot g}$  ( $D = 2.64$  (m))

重力加速度 :  $g (= 9.80665 \text{ m/s}^2)$

周囲空気温度 :  $T_0 (= 308.15 \text{ K})$

風速 :  $U \Rightarrow \tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = \tan \beta'$  となる  $U$

密度 :  $\rho (= 1.1463 \text{ kg/m}^3)$

比熱 :  $C_p (= 1.007 \text{ kJ/kg/K})$

発生熱量 :  $Q$  (kW)

実験定数<sup>(7)</sup> :  $k (= 9/8)$

実験定数<sup>(7)</sup> :  $o (= -0.0975)$

### (f) 熱気流の主軸温度分布式

佐賀の有風時の火災による熱気流の主軸温度分布式<sup>(7)</sup>を用いる。

$$\Psi_{xm} \cdot \Lambda^s \cdot Fr^t = C_0 \quad \therefore \Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t$$

$$\Psi_{xm} = \frac{\Delta \theta_m \cdot D^{1/3} \cdot X^{4/3}}{\left( \frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}} \quad \therefore \Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left( \frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \quad (\text{K})$$

ここで,

温度上昇量 :  $\Delta \theta_m$  (K)

温度に関する無次元数 :  $\Psi_{xm}$

風下方向位置 :  $X (= 20 \text{ m})$

実験定数<sup>(7)</sup> :  $C_0 (= 1.32)$

実験定数<sup>(7)</sup> :  $s (= 1/2)$

実験定数<sup>(7)</sup> :  $t (= -0.8833)$

## (3) 評価結果

### (a) 発生熱量

FARSITE で得られた火炎輻射強度  $R_f^{*3}$  より火炎対流発散度を算出する。

火炎対流発散度 ( $I_{conv}$ ) = 反応強度 ( $I_R$ ) - 火炎輻射強度 ( $R_f$ )

得られた火炎対流発散度に燃焼面積を乗じて発生熱量を算出する。

$$Q = I_{conv} \cdot F' \cdot \pi \cdot R^2 \quad (\text{kW})$$

$$I_R = R_f / 0.377 \quad (0.377 : \text{米国 NFPA の係数(火炎輻射強度算出に用いた係数)})$$

$$\therefore I_{conv} = R_f \times (1 - 0.377) / 0.377 = 590.573 \quad (\text{kW/m}^2)$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= I_{conv} \cdot F' \cdot \pi \cdot R^2 = 590.573 \times 11.2782 \times \pi \times 0.4433333^2 \\ &= 4112.671 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

※3: FARSITE 評価で得られた反応強度  $I_R$  に 0.377 を乗じて算出した値

(b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 3.72 / \sqrt{2.64 \cdot 9.80665} = 0.731$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3} \\ &= (3.72 \cdot 2.64^{1/3}) / (4112.671 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 1.062 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 1.062^{-(9/8)} \times 0.731^{-(0.0975)} = 0.335$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 1.062^{0.5} \cdot 0.731^{-0.8833} = 0.971$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left( \frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{0.971 \cdot \left( \frac{4112.671^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{2.64^{1/3} \cdot 20^{4/3}} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 10 \text{ K} = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$$



以上より，森林火災による熱気流の温度上昇は約 10℃と評価された。

現実には，火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと，また，貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内空気の温度上昇までには一定の時間遅れがあることから，森林火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内空気の温度上昇に繋がることは考えられないが，森林火災の熱気流による温度上昇量が約 10℃であることから，熱気流の侵入による貯蔵建屋内の空気温度の上昇がこれを上回ることはない。

### 6.2.3 貯蔵建屋内空気温度の上昇による金属キャスクへの熱影響評価

貯蔵建屋内の空気温度が外部火災により上昇した場合，金属キャスクへの熱影響として，①金属キャスクが高温に晒されることにより金属キャスクの温度が上昇する，②貯蔵建屋内の空気の流れが変化することにより金属キャスクの除熱状態が変化し，金属キャスクの温度が上昇する，の2つの影響が考えられる。

金属キャスクの除熱は，金属キャスク表面からの輻射，及び金属キャスク表面における貯蔵建屋内空気の対流により行われているが，建屋外壁からの熱伝達による外壁内表面からの輻射や熱気流の侵入により貯蔵建屋内の空気温度が極端に上昇した場合，熱の流れが逆転し金属キャスクが加熱される可能性が考えられる。

前項で評価したとおり，森林火災に伴う貯蔵建屋内空気の温度上昇量は最大でも 10℃程度である。第 33 表に定常状態（周囲空気温度 45℃）における金属キャスク各部の最大温度評価結果を示す。ここで，周囲空気温度が 10℃上昇したと仮定した場合 55℃となるが，定常状態における金属キャスク各部の温度（第 33 表の①）の値を上回らないことから，この値を超えて金属キャスクが周囲空気により熱

せられることはなく，基本的安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはない。

第 33 表 金属キャスク各部の温度評価結果（最大値(°C)）

評価条件	一次蓋 金属ガス ケット	二次蓋 金属ガス ケット	一次 蓋	二次 蓋	外筒	胴	側部 レジン	燃料 被覆 管
①周囲空気温度 45°Cの定常状 態(通常貯蔵 時)	89	85	96	85	113	142	128	259
②設計基準値	130	130	350	350	350	350	150	300
設計余裕(②-①)	41	45	254	265	237	208	22	41

また，貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として，現実には考えにくい金属キャスクの温度と周囲空気温度が同じとなり，建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われ断熱状態となることを仮定する。この場合、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして，金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を，森林火災評価において最も長い燃焼継続時間となった発火点 2（発火時刻 11:00）における 540 秒間を保守的に 3 倍程度考慮して 1700 秒間と仮定すると，この間の金属キャスクの温度上昇  $\Delta T$  は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{キャスクの熱容量})$$

$Q$  : 12.1 kW,  $t$  : 1700 s,  $C$  : 41850 kJ/K (中性子遮へい材及び内部収納物を除く)

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 1700 \div 41850 = 0.4915 \div 0.5 \text{ K} = 0.5 (^\circ\text{C})$$

この温度上昇は，定常状態における金属キャスク温度の設計余裕（第 33 表）に比べて非常に小さく，基本的安全機能に影響をもたら

すような金属キャスクの温度上昇は考えられない。

## 6.3 敷地内危険物貯蔵設備等の火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

### 6.3.1 輻射熱を受けた貯蔵建屋外壁からの熱伝達による加熱

6.2.1 のとおり，外部火災評価の内，貯蔵建屋外壁温度評価結果が最も厳しい結果となった森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））による熱影響でも貯蔵建屋外壁外表面温度 138℃に対し，外壁内表面温度は 5℃程度の上昇であった。

一方，敷地内危険物貯蔵設備等の火災での貯蔵建屋外壁外表面温度評価で最も厳しい結果となったエンジン発電機の火災の熱影響による貯蔵建屋外壁外表面温度は 58℃で，内表面の温度上昇はほとんどなかった（第 44 図）。

したがって，森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））に包絡されるため，外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇は無視できると考えられる。

### 6.3.2 貯蔵建屋の給気口から侵入した熱気流による加熱

貯蔵建屋は自然換気構造であるため，火災により発生する熱気流が周囲の風況の影響により貯蔵建屋に向かうことが想定される。その場合，熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内空気温度が上昇することが考えられるため，熱気流の影響による空気温度上昇についても評価を実施した。ここでは，熱気流の給気口への侵入の可能性の観点から，貯蔵建屋からの距離が近く，かつ貯蔵建屋と同じ高さに設置されているエンジン発電機からの火災について評価を行った。また評価については，森林火災について評価した方法と同様の考え方にに基づき行った。

#### (1) 評価条件

- ・火炎から給気フードまでの水平距離

給気口フードの張り出し部が 2 m であることから， $27.0 - 2.0 =$

25.0 (m)

- ・ 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ( $\tan \beta'$ )

$$\tan \beta' = 6.7/25 = 0.2680 \Rightarrow 0.268$$

- ・ 燃焼時発熱量 ( $\Delta H_{c, \text{eff}}$ ) : 44400 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 質量低下速度 (m) : 0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 燃焼面積 (S) : 4.97 (m<sup>2</sup>)
- ・ 熱源寸法 (D)

燃焼面積から等価直径を算定する。(有効桁数小数点第3位で切り上げ)

燃焼面積  $S = 4.97$  (m<sup>2</sup>) より

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2.51555 \Rightarrow 2.52 \text{ (m)}$$

- ・ 風速 (U)

熱気流が直接給気口にあたる風速として 6.34(m/s)とした。

## (2) 評価結果

### (a) 発生熱量

燃焼時発熱量及び質量低下速度、燃焼面積より次式を用いて発生熱量を算出する。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m \quad (\text{kW})$$

ここで、 $\chi$  は全発熱量のうち輻射として環境へ放射される熱量比(放射分率)であり、給気温度が保守的に評価されるように実験結果<sup>(8)</sup>から得られている最小値として 0.05 を採用した。算出した発生熱量は以下のとおり。

$$\begin{aligned} Q &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 44400 \times 4.97 \times 0.044 \\ &= 9223.923 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

### (b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 6.34 / \sqrt{2.52 \cdot 9.80665} = 1.275$$

$$\begin{aligned}\Lambda &= (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3} \\ &= (6.34 \cdot 2.52^{1/3}) / (9223.923 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 1.362\end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 1.362^{-(9/8)} \times 1.275^{-(0.0975)} = 0.268$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 1.362^{0.5} \cdot 1.275^{-0.8833} = 1.402$$

$$\begin{aligned}\Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left( \frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{1.402 \cdot \left( \frac{9223.923^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{2.52^{1/3} \cdot 25^{4/3}} \Rightarrow 18 \text{ K} = 18 \text{ (}^\circ\text{C)}\end{aligned}$$

以上より、エンジン発電機からの火災による熱気流の温度上昇は約 18°C と評価された。

現実には、火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと、また、貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内空気の温度上昇までには一定の時間遅れがあることから、火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内空気の温度上昇となることは考えられないが、想定される敷地内危険物貯蔵設備等の火災による熱気流の温度上昇量は最大でも約 18°C であり、熱気流の侵入による貯蔵建屋内の空気温度の上昇がこれを上回ることはない。

### 6.3.3 貯蔵建屋内空気温度の上昇による金属キャスクへの熱影響評価

貯蔵建屋内の空気温度が外部火災により上昇した場合、金属キャスクへの熱影響として、①金属キャスクが高温に晒されることにより金属キャスクの温度が上昇する、②貯蔵建屋内の空気の流れが変化することにより金属キャスクの除熱状態が変化し、金属キャスクの温度が上昇する、の2つの影響が考えられる。

金属キャスクの除熱は、金属キャスク表面からの輻射、及び金属キャスク表面における貯蔵建屋内空気の対流により行われているが、建屋外壁からの熱伝達による外壁内表面からの輻射や熱気流の侵入により貯蔵建屋内の空気温度が極端に上昇した場合、熱の流れが逆転し金属キャスクが加熱される可能性が考えられる。

前項で評価したとおり、敷地内危険物貯蔵設備等の火災に伴う貯蔵建屋内空気の温度上昇量は最大でも18℃程度であり、周囲空気温度が18℃上昇したと仮定した場合63℃となるが、定常状態における金属キャスク各部の温度(第33表の①)の値を上回らないことから、この値を超えて金属キャスクが周囲空気により熱せられることはなく、基本的安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはないと考えられる。

また、貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい金属キャスクの温度と周囲空気温度が同じとなり、建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われ断熱状態となることを仮定する。この場合、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、燃焼継続時間が最大となるエンジン発電機火災の燃焼継続時間4060秒間を保守的に3倍程度考慮して13000秒間と仮定すると、この間の金属キャスクの温度上昇 $\Delta T$ は次式で表される。

$\Delta T = Q$  (最大崩壊熱量)  $\times t$  (断熱時間)  $\div C$  (キャスクの熱容量)

$Q : 12.1 \text{ kW}$ ,  $t : 13000 \text{ s}$ ,  $C : 41850 \text{ kJ/K}$  (中性子遮へい材及び内部収納物を除く)

$\therefore \Delta T = 12.1 \times 13000 \div 41850 = 3.759 \approx 3.8 \text{ K} = 3.8(^{\circ}\text{C})$

この温度上昇は、定常状態における金属キャスク温度の設計余裕(第33表)に比べても小さく、基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇は考えられない。



## 6.4 航空機墜落による火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

### 6.4.1 輻射熱を受けた貯蔵建屋外壁からの熱伝達による加熱

6.2.1 のとおり，外部火災評価の内，貯蔵建屋外壁温度評価結果が最も厳しい結果となった森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））による熱影響でも貯蔵建屋外壁外表面温度 138℃に対し，外壁内表面温度は 5℃程度の上昇であった。

一方，敷地内危険物貯蔵設備等の火災での貯蔵建屋外壁外表面温度評価で最も厳しい結果となった「軍用機（基地－訓練空域往復時）」の火災の熱影響による貯蔵建屋外壁外表面温度は 68℃で，内表面の温度上昇はほとんどなかった（第 58 図）。

したがって，森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））に包絡されるため，外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇は無視できると考えられる。

### 6.4.2 貯蔵建屋の給気口から侵入した熱気流による加熱

貯蔵建屋は自然換気構造であるため，火災により発生する熱気流が周囲の風況の影響により貯蔵建屋に向かうことが想定される。その場合，熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内空気温度が上昇することが考えられるため，熱気流の影響による空気温度上昇についても評価を実施した。ここでは，熱気流の給気口への侵入の可能性の観点から，貯蔵建屋からの距離が近い「④軍用機（基地－訓練空域間往復時）」について評価を行った。また評価については，森林火災について評価した方法と同様の考え方に基き行った。

#### (1) 評価条件

- ・火炎から給気フードまでの水平距離

給気口フードの張り出し部が 2 m であることから，

$$50.0 - 2.0 = 48.0 \text{ (m)}$$

- ・火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ( $\tan \beta'$ )  
 $\tan \beta' = 6.7/48 = 0.1395 \Rightarrow 0.140$
- ・燃焼時発熱量 ( $\Delta H_{c, \text{eff}}$ ) : 43000 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・質量低下速度 (m) : 0.05 (kg/m<sup>2</sup>/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・燃焼面積 (S) : 46.6 (m<sup>2</sup>)
- ・熱源寸法 (D)

燃焼面積から等価直径を算定する。(有効桁数小数点第3位で切り上げ)

燃焼面積  $S = 46.6$  (m<sup>2</sup>) より

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 7.7028 \Rightarrow 7.71 \text{ (m)}$$

- ・風速 (U)

熱気流が直接給気口にあたる風速として 18.08 (m/s) とした。

## (2) 評価結果

### (a) 発生熱量

燃焼時発熱量及び質量低下速度、燃焼面積より次式を用いて発生熱量を算出する。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m \quad (\text{kW})$$

ここで、 $\chi$  は全発熱量のうち輻射として環境へ放射される熱量比 (放射分率) であり、給気温度が保守的に評価されるように実験結果<sup>(8)</sup> から得られている最小値として 0.05 を採用した。算出した発生熱量は以下のとおり。

$$\begin{aligned} Q &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 43000 \times 46.6 \times 0.054 \\ &= 102794.940 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

### (b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 18.08 / \sqrt{7.71 \cdot 9.80665} = 2.079$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3} \\ &= (18.08 \cdot 7.71^{1/3}) / (102794.940 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3} \end{aligned}$$

$$=2.524$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 2.524^{-(9/8)} \times 2.079^{-(0.0975)} = 0.140$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 2.524^{0.5} \cdot 2.079^{-0.8833} = 1.586$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left( \frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{1.586 \cdot \left( \frac{102794.94^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{7.71^{1/3} \cdot 48^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 29 \text{ K} = 29 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上より、航空機墜落に伴う火災による熱気流の温度上昇は約29°Cと評価された。

現実には、火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと、また、貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内空気の温度上昇までには一定の時間遅れがあることから、火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内空気の温度上昇となることは考えられないが、想定される航空機墜落に伴う火災による熱気流の温度上昇量は約29°Cであり、熱気流の侵入による貯蔵建屋内の空気温度の上昇がこれを上回ることはない。

#### 6.4.3 貯蔵建屋内空気温度の上昇による金属キャスクへの熱影響評価

貯蔵建屋内の空気温度が外部火災により上昇した場合、金属キャスクへの熱影響として、①金属キャスクが高温に晒されることにより金属キャスクの温度が上昇する、②貯蔵建屋内の空気の流れが変化することにより金属キャスクの除熱状態が変化し、金属キャスクの温度が上昇する、の2つの影響が考えられる。

金属キャスクの除熱は、金属キャスク表面からの輻射、及び金属キャスク表面における貯蔵建屋内空気の対流により行われているが、建屋外壁からの熱伝達による外壁内表面からの輻射や熱気流の侵入により貯蔵建屋内の空気温度が極端に上昇した場合、熱の流れが逆転し金属キャスクが加熱される可能性が考えられる。

前項で評価したとおり、航空機墜落に伴う火災による貯蔵建屋内空気の温度上昇量は最大でも29℃程度であり、周囲空気温度が29℃上昇したと仮定した場合74℃となるが、定常状態における金属キャスク各部の温度（第33表の①）の値を上回らないことから、この値を超えて金属キャスクが周囲空気により熱せられることはなく、基本的安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはないと考えられる。

また、貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい金属キャスクの温度と周囲空気温度が同じとなり、建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われ断熱状態となることを仮定する。この場合、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、燃焼継続時間が最大となる「①民間機（計器飛行方式）」の燃焼継続時間6677秒間を保守的に3倍程度考慮して21000秒間と仮定すると、この間のキャスクの温度上昇 $\Delta T$ は次式で表される。

$\Delta T = Q$  (最大崩壊熱量)  $\times t$  (断熱時間)  $\div C$  (キャスクの熱容量)

$Q : 12.1 \text{ kW}$ ,  $t : 21000 \text{ s}$ ,  $C : 41850 \text{ kJ/K}$  (中性子遮へい材及び内部収納物を除く)

$\therefore \Delta T = 12.1 \times 21000 \div 41850 = 6.072 \approx 6.1 \text{ K} = 6.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$

この温度上昇は、定常状態における金属キャスク温度の設計余裕(第 33 表)に比べても小さく、基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇は考えられない。

## 7. 火災の重畳による影響評価について

### 7.1 評価の考え方

火災の重畳については、貯蔵施設敷地外における火災どうし及び貯蔵施設敷地内における火災どうしがそれぞれ同時に発生した場合を考慮する。このため、敷地外については森林火災と近隣の産業施設等の火災の重畳、敷地内については敷地内危険物貯蔵設備と航空機墜落による火災の重畳についてそれぞれ評価を行った。

### 7.2 森林火災と近隣の敷地外危険物貯蔵施設の火災の重畳による影響評価

森林火災評価における発火点と、近隣の敷地外危険物貯蔵所の立地点は貯蔵施設からの方位が異なるため、森林火災の誘発による近隣の敷地外危険物貯蔵所の火災は考えにくいですが、偶発的にこれらの火災が重畳して発生した場合の影響について考察を行った。

#### 7.2.1 火災による貯蔵建屋外壁への影響及び加熱された貯蔵建屋外壁からの伝熱

森林火災の場合については、最大で外壁外表面温度は138℃となり、温度上昇量は約90℃となったが、外壁内表面温度の上昇は極めて緩やかであり、貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇についてはほとんど無視できる。

一方、敷地外危険物貯蔵施設の火災については、輻射による貯蔵建屋外壁外表面温度の上昇は約3℃程度と、森林火災における評価結果に比べてはるかに小さい。

このことから、森林火災と敷地外危険物貯蔵施設の火災を重畳させた場合でも、その影響については森林火災単独の場合とほぼ同様であり、貯蔵建屋外壁及び金属キャスクの基本的安全機能への影響はほとんどない。

### 7.2.2 火災により生じる熱気流の給気口からの侵入

火災による熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内空気温度が上昇することが考えられるが、森林火災の場合については熱気流による温度上昇量を約 10 °C と評価しており、熱気流の侵入による貯蔵建屋内の空気温度の上昇がこれを上回ることはない。

一方、敷地外危険物貯蔵施設については、評価対象施設の貯蔵建屋からの離隔距離は約 1 km と遠く離れており、この場所から発生した熱気流が直接給気口に当たるような状況は想定しにくく影響はない。

このことから、火災により生じる熱気流の給気口からの侵入について、森林火災と敷地外危険物貯蔵施設の火災を重畳させても、森林火災単独の場合における影響を上回らないと考えられる。

以上より、森林火災と敷地外危険物貯蔵施設の火災を重畳させた場合でも、影響については森林火災単独の場合とほぼ同様であり、金属キャスクのもつ基本的安全機能への影響はない。

### 7.3 敷地内危険物貯蔵設備の火災と航空機墜落による火災の重畳による影響評価

敷地内危険物貯蔵設備の火災と航空機墜落による火災に対する影響評価についても、それぞれ個別の評価においていずれも貯蔵建屋への影響はないことを確認しているが、これらの事象が重畳した場合個別の評価結果より厳しい結果となることが予測されるため、重畳による評価を実施した。評価対象については、航空機墜落、及び敷地内危険物貯蔵設備による火災とも、最も厳しい評価結果となった下記事象を採用した。

- ・敷地内危険物貯蔵設備による火災：エンジン発電機
- ・航空機墜落による火災：④軍用機（基地-訓練空域往復時）（対象機種：UH-60J）

上記において、航空機墜落による火災の評価結果より離隔距離が約53 mであるのに対し、エンジン発電機の設置位置（離隔距離）は約27 mであることから、航空機が直接エンジン発電機上に墜落することは考えにくい。このことから、重畳の状況としては航空機の墜落により発生した火災がエンジン発電機の火災を誘発することにより重畳火災となった場合の影響評価について実施した。航空機墜落による火災における離隔距離については保守的に事業許可申請書記載値である50 mで評価を行った。

#### 7.3.1 貯蔵建屋外壁温度の影響評価

##### (1) 火災発生源に関する入力データ

- ・エンジン発電機による火災

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：軽油 0.99 (kℓ) + 潤滑油 0.041 (kℓ) = 1.031 (kℓ)

火災輻射強度：42000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド付属書Bの軽油の値



質量低下速度：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m<sup>3</sup>) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：4.97 (m<sup>2</sup>) ※エンジン発電機の全長×全幅

・航空機墜落による火災

想定機種：UH-60J

燃料の種類：JP-5

燃料量：7.21 (kℓ) ※(最大離陸重量－空虚重量)／燃料密度

火炎放射強度：50000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド附属書Bの灯油の値

質量低下速度：0.054 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃料密度：810 (kg/m<sup>3</sup>) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃焼面積：46.6 (m<sup>2</sup>) ※全長×全幅

### 7.3.2 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：エンジン発電機による火災 27 (m)

航空機墜落による火災 50 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料 第5版の石灰岩コンクリートの値

### 7.3.3 評価方法

ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」を参考とし、評価を実施した。

- ・建屋外壁温度は、森林火災評価と同様、一次元非定常熱伝導方程式を差分法により解くことで評価した。
- ・航空機が墜落し火災が発生することによって、発電機の燃料タンクの火災が誘発される状況を考慮するにあたり、以下の3ケースについて考察した。

ケース1：航空機とエンジン発電機が同時に燃焼開始する場合

ケース 2 : 航空機の燃料の半分が燃焼後, エンジン発電機が燃焼を開始する場合

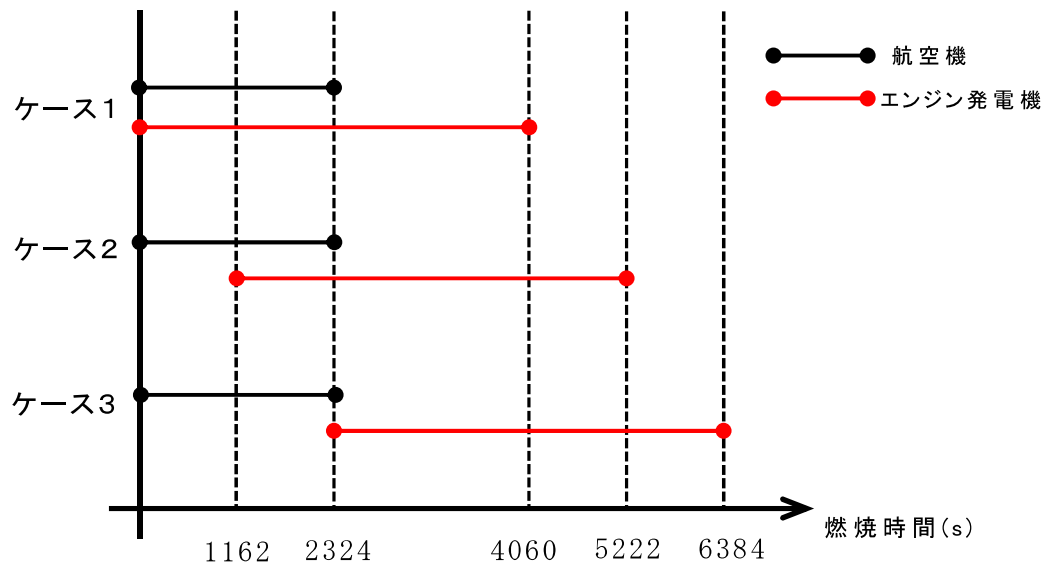
ケース 3 : 航空機の燃料が燃え尽きた後, 同時にエンジン発電機が燃焼を開始する場合

航空機墜落による火災, 及びエンジン発電機による火災評価結果における輻射強度と燃焼継続時間について第 34 表に示す。

第 34 表 エンジン発電機及び航空機墜落による火災評価結果

	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )	燃焼継続時間 (s)
エンジン発電機による火災	178.4	4060
航空機墜落による火災	581.0	2324
エンジン発電機 + 航空機	759.4	—

また, 2つの火災の燃焼時間の関係を表した模式図について第 61 図に示す。



第 61 図 エンジン発電機及び航空機墜落による火災における  
燃焼時間の模式図

各ケースにおける燃焼経過時間と輻射強度の関係については第 35 表のとおりである。各ケースにおける貯蔵建屋外壁温度評価結果は第 62 図のとおりである。

第 35 表 各ケースにおける燃焼経過時間と輻射強度の関係

(ケース 1)

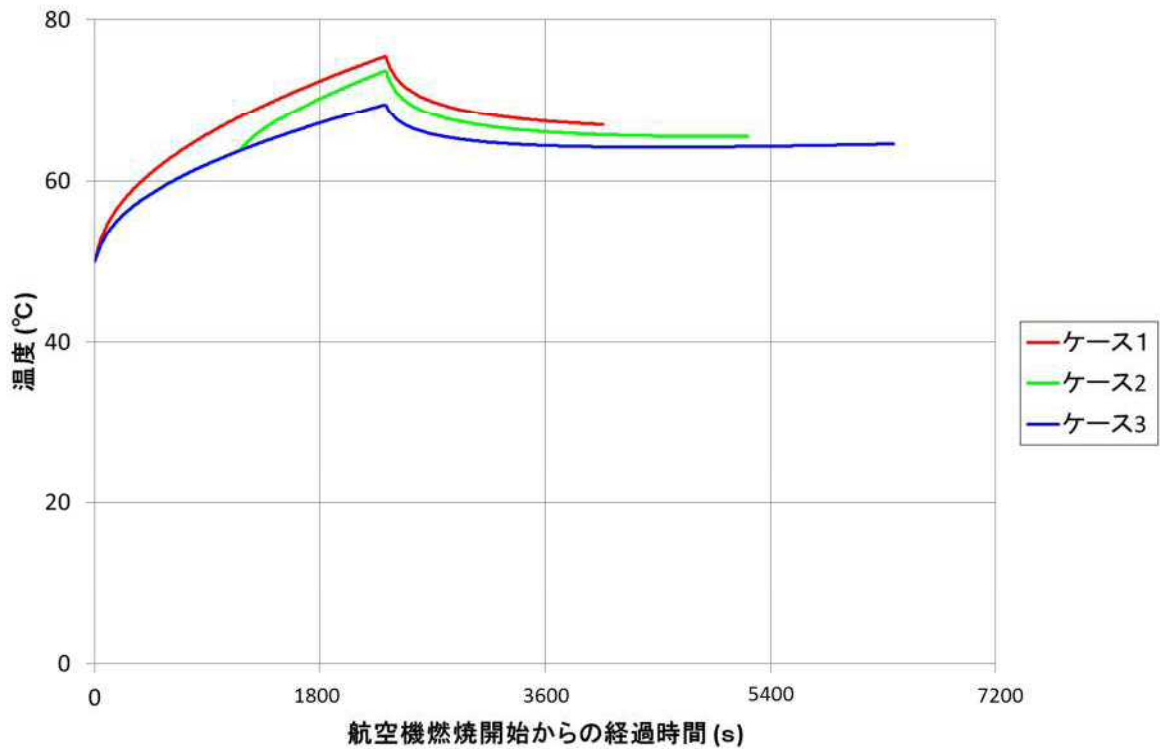
燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )
0～2324	759.4
2324～4060	178.4
4060～	0

(ケース 2)

燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )
0～1162	581.0
1162～2324	759.4
2324～5222	178.4
5222～	0

(ケース 3)

燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )
0～2324	581.0
2324～6384	178.4
6384～	0



第 62 図 火災重畳による建屋外壁の温度変化

第 62 図において、温度は外壁初期温度 50℃を加算した値であり、外壁温度の最大はいずれのケースも航空機墜落による火災の燃焼が終了した時間となっている。これらの最大値について、第 36 表に示す。

第 36 表 各ケースにおける貯蔵建屋外壁面最高温度

	温度 (°C)
ケース 1	76
ケース 2	74
ケース 3	70

以上の結果より、いずれのケースにおいてもコンクリートの許容温度である 200℃以下であることが確認でき、航空機墜落による火災と敷地内危険物貯蔵設備等の火災が重畳した場合においても貯蔵建屋外壁への影響はないことを確認した。

#### 7.3.4 輻射熱を受けた貯蔵建屋外壁からの伝熱

火炎からの輻射熱により貯蔵建屋外壁温度が上昇し、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇については、航空機墜落による火災単独の場合、エンジン発電機の火災単独の場合のいずれの場合も貯蔵建屋外壁の内表面の温度上昇はほとんど生じていない（第44図，第58図）。また、両者の重畳による外壁外表面温度は最大で約76℃であることから、6.2.1のとおり、森林火災（発火点1（発火時刻7:56））に包絡されるため、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の空気温度上昇は無視できる。

#### 7.3.5 貯蔵建屋の給気口から侵入した熱気流による加熱

各火災単独の評価結果よりエンジン発電機による火災の離隔距離は27 m、航空機墜落による火災の離隔距離は50 mであることから、航空機がエンジン発電機上に墜落することは想定できないため、航空機の墜落により発生した火災がエンジン発電機の火災を誘発する場合を想定すると、発生した熱気流は給気口において混合されて流入する。混合された熱気流の温度は重畳することなく凡そ各発火源の熱気温度を平均した温度になると考えられるため、両火災の評価を合算した場合よりも発火源別の評価の方がより保守的な結果になる。

航空機墜落及びエンジン発電機による火災の熱気流が直接給気フードに当たる流速での温度評価を実施したところ、航空機火災の温度上昇のほうが大きかった。そこで、エンジン発電機についても、航空機火災において給気口に直接当たる場合の流速で計算を実施した。

##### (1) 評価条件

##### (a) 火炎から給気フードまでの水平距離

給気口フードの張り出し部が2 mであることから

$$\cdot \text{航空機} : 50.0 - 2.0 = 48.0 \text{ (m)}$$

- ・エンジン発電機：27.0-2.0 = 25.0 (m)
- (b) 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ( $\tan \beta'$ )
  - ・航空機： $\tan \beta' = 6.7/48 = 0.1395 \Rightarrow 0.140$
  - ・エンジン発電機： $\tan \beta' = 6.7/25 = 0.2680 \Rightarrow 0.268$
- (c) 燃焼時発熱量 ( $\Delta H_{c,eff}$ )
  - ・航空機：43000 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
  - ・エンジン発電機：44400 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- (d) 質量低下速度 (m)
  - ・航空機：0.054 (kg/m<sup>2</sup>/s) (NUREG-1805 に記載の値)
  - ・エンジン発電機：0.044 (kg/m<sup>2</sup>/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- (e) 燃焼面積 (S)
  - ・航空機：46.6 (m<sup>2</sup>)
  - ・エンジン発電機：4.97 (m<sup>2</sup>)
- (f) 熱源寸法 (D)

燃焼面積から等価直径を算定する。(有効桁数小数点第3位で切り上げ)

- ・航空機：燃焼面積  $S = 46.6$  (m<sup>2</sup>) より

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 7.7028 \Rightarrow 7.71 \text{ (m)}$$

- ・エンジン発電機：燃焼面積  $S = 4.97$  (m<sup>2</sup>) より

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2.51555 \Rightarrow 2.52 \text{ (m)}$$

- (g) 風速 (U)

評価結果の厳しくなった航空機の主軸が直接給気口にあたる18.08 (m/s)とした。

## (2) 評価結果

- (a) 発生熱量

燃焼時発熱量及び質量低下速度，燃焼面積より次式を用いて発

生熱量を算出する。

$$Q=(1-\chi)\cdot\Delta H_{c,eff}\cdot S\cdot m \quad (\text{kW})$$

ここで、 $\chi$  は全発熱量のうち輻射として環境へ放射される熱量比（放射分率）であり、給気温度が保守的に評価されるように実験結果<sup>(8)</sup>から得られている最小値として0.05を採用した。算出した発生熱量は以下のとおり。

・ 航空機：

$$\begin{aligned} Q_1 &= (1-\chi)\cdot\Delta H_{c,eff}\cdot S\cdot m = (1-0.05)\times 43000\times 46.6\times 0.054 \\ &= 102794.940 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

・ エンジン発電機

$$\begin{aligned} Q_2 &= (1-\chi)\cdot\Delta H_{c,eff}\cdot S\cdot m = (1-0.05)\times 44400\times 4.97\times 0.044 \\ &= 9223.923 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

(b) 熱気流の主軸傾き角

・ 航空機

$$\begin{aligned} Fr &= U/\sqrt{D\cdot g} = 18.08/\sqrt{7.71\cdot 9.80665} = 2.079 \\ \Lambda &= (U\cdot D^{1/3})/(Q_1\cdot g/(C_p\cdot \rho\cdot T_0))^{1/3} \\ &= (18.08\cdot 7.71^{1/3})/(102794.940\cdot 9.80665/(1.007\cdot 1.1463\cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 2.524 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t\cdot \Lambda^{-k}\cdot Fr^{-o} = 0.37\times 2.524^{-(9/8)}\times 2.079^{-(0.0975)} = 0.140$$

・ エンジン発電機

$$\begin{aligned} Fr &= U/\sqrt{D\cdot g} = 18.08/\sqrt{2.52\cdot 9.80665} = 3.637 \\ \Lambda &= (U\cdot D^{1/3})/(Q_2\cdot g/(C_p\cdot \rho\cdot T_0))^{1/3} \\ &= (18.08\cdot 2.52^{1/3})/(9223.923\cdot 9.80665/(1.007\cdot 1.1463\cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 3.883 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t\cdot \Lambda^{-k}\cdot Fr^{-o} = 0.37\times 3.883^{-(9/8)}\times 3.637^{-(0.0975)} = 0.091$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

・ 航空機



$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 2.524^{0.5} \cdot 2.079^{-0.8833} = 1.586$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left( \frac{Q_1^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{1.586 \cdot \left( \frac{102794.94^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{7.71^{1/3} \cdot 48^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 29 \text{ K} = 29 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

・エンジン電機

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 3.883^{0.5} \cdot 3.637^{-0.8833} = 2.096$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left( \frac{Q_2^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{2.096 \cdot \left( \frac{9223.923^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{2.52^{1/3} \cdot 25^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 27 \text{ K} = 27 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上の結果から，エンジン発電機火災と航空機墜落が重畳した場合の熱気流の温度上昇は最大で約 29℃であり，熱気流の侵入による貯蔵建屋内の空気温度の上昇がこれを上回ることはない。

### 7.3.6 貯蔵建屋内空気温度の上昇による金属キャスクへの熱影響評価

貯蔵建屋内の空気温度が外部火災により上昇した場合、金属キャスクへの熱影響として、①金属キャスクが高温に晒されることにより金属キャスクの温度が上昇する、②貯蔵建屋内の空気の流れが変化することにより金属キャスクの除熱状態が変化し、金属キャスクの温度が上昇する、の2つの影響が考えられる。

金属キャスクの除熱は、金属キャスク表面からの輻射、及び金属キャスク表面における貯蔵建屋内空気の対流により行われているが、建屋外壁からの熱伝達による外壁内表面からの輻射や熱気流の侵入により貯蔵建屋内の空気温度が極端に上昇した場合、熱の流れが逆転し金属キャスクが加熱される可能性が考えられる。

前項で評価したとおり、想定される火災の重畳に伴う貯蔵建屋内空気の温度上昇は最大でも29℃程度であり、周囲空気温度が29℃上昇したと仮定した場合74℃となるが、定常状態における金属キャスク各部の温度（第33表の①）の値を上回らないことから、この値を超えて金属キャスクが周囲空気により熱せられることはなく、基本的安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはない。

また、貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい金属キャスクの温度と周囲空気温度が同じとなり、建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われ断熱状態となることを仮定する。この場合、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、エンジン発電機火災（4060秒間）と航空機墜落に伴う火災のうち燃焼継続時間が最大となる場合（①民間機（計器飛行方式）による火災：6677秒間）で、燃焼継続時間の長い6672秒間を保守的に3倍程度考慮して21000秒間と仮

定すると，この間のキャスクの温度上昇  $\Delta T$  は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{キャスクの熱容量})$$

$Q : 12.1 \text{ kW}$ ，  $t : 21000 \text{ s}$ ，  $C : 41850 \text{ kJ/K}$  (中性子遮へい材及び内部収納物を除く)

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 21000 \div 41850 = 6.072 \approx 6.1 \text{ K} = 6.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

この温度上昇は，定常状態における金属キャスク温度の設計余裕 (第 33 表) に比べても小さく，基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇はない。

## 8. ばい煙及び有毒ガスの影響評価について

### 8.1 評価の考え方

外部火災により発生するばい煙及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ることを考慮すると、ばい煙及び有毒ガスが貯蔵建屋の周辺に滞留する可能性は低いと考えられるが、万一ばい煙及び有毒ガスが貯蔵建屋内の侵入した際に、貯蔵建屋及び金属キャスクに与える影響について評価を実施する。

貯蔵建屋内には、金属キャスク以外に、金属キャスクを取扱う上で必要な各設備（天井クレーン、搬送台車等）やエリアモニタの検知器等の設備が存在するが、いずれもばい煙や有毒ガスによって金属キャスクの基本的安全機能に直接影響を及ぼす設備はなく、またポンプ等の電気機器も存在しない。建屋内に侵入したばい煙については、建屋の構造上長時間滞留することは考えにくく、金属キャスクを含む建屋内の各設備に大きな影響を与えることはないものと考えられる。また、短時間でもばい煙や有毒ガスの環境に晒された金属キャスクや各設備に対する長期的な影響についても、建屋内の状況の常時監視や毎日の巡視点検、及び定期的な設備の詳細点検・保守の実施により都度異常の有無を確認することができ、安全性を確保できるものと考えられる。

有毒ガスについては、外部火災により発生すると考えられる物質においては、IDLH\*対象物質である一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)等が考えられるが、これらは人体に対する影響を左右するものであり、また腐食性のある二酸化硫黄については、長時間の環境下に晒された場合貯蔵建屋内の検知器や電源端子箱等に影響を及ぼす可能性も考えられるが、通常の点検や保守で対処可能であることから、有毒ガスに対する影響評価に対しては考慮する必要はない。

また、建屋内で発生する火災に関し、ケーブル被覆管等の燃焼により塩化水素が発生する可能性があるが、金属キャスクに接続されるケーブルを含めキャスク周辺のケーブルについては難燃性ケーブルを使

用するため火災の可能性は低く，万一発火した場合においても建屋内に常備しているセルフエアセットや酸素ボンベ等の防護装置を装着の上迅速な消火活動が可能であることから，塩化水素ガスに関しても特に考慮する必要はない。

これより，貯蔵建屋内の金属キャスク以外の設備については外部火災に対する影響評価は考慮する必要はない。

\*:IDLH(Immediately Dangerous to Life of Health)

30分暴露によって生命及び健康に直ちに危険を及ぼす環境空気中の物質の濃度限度値，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。発電炉の安全審査においても，中央制御室の居住性への影響評価で対象とされている物質。

なお，事務建屋及び備品管理建屋の一部は従業員の執務のためのものであり，基本的安全機能を有する設備に対し直接操作を行うことにより当該機能を維持する設備は設置されておらず人員が常駐する必要はない。外部火災発生の際には，事務建屋内の人員は速やかに避難することで危険を回避することができることから，事務建屋については外部火災に対する影響評価について考慮する必要はないものとする。また，出入管理建屋，受変電設備建屋及び備品管理建屋については，いずれも常時人が常駐することではなく，また基本的安全機能を有する設備に対し直接操作を行うことにより当該機能を維持する設備は設置されていないため，外部火災に対する影響評価について考慮する必要はない。

## 8.4 影響評価結果

### 8.4.1 貯蔵建屋への影響評価

外部火災によるばい煙については貯蔵建屋の給排気口より侵入することが考えられるが，ばい煙の粒子径は一般的にはマイクロメートル( $\mu\text{m}$ )のオーダーであるため，外部からのばい煙等の付着により給排気口が閉塞される可能性は極めて低い。

また，貯蔵建屋の給気口の位置は地上高さ約8m，排気口の位置は地

上高さ約 23m であり，さらに給気口に防雪フード，排気口に遮風板が設置されている。これらの設置高さについては，過去の気象観測記録による最大積雪量 170cm<sup>\*1</sup>，及び降下火砕物最大堆積層厚約 30cm<sup>\*2</sup>と比較しても十分高い位置にあり，ばい煙等を含む異物の堆積による給排気口の閉塞はない。

\*1：むつ特別地域気象観測所の積雪観測記録（1935年～2007年）における最大積雪量（1977年2月15日）

\*2：洞爺火山灰による最大堆積層厚  
（\*1,\*2とも「使用済燃料貯蔵事業許可申請書」添付書類八 記載値）

また，給排気口の開口寸法等の仕様について，第37表に示す。

第37表 貯蔵建屋給排気口の仕様

		開口寸法	仕様
給気口	貯蔵区域	幅約 4000mm × 高さ約 3500mm (片壁面あたり 12 箇所，計 24 箇所設置)	・防雪フード設置(防鳥網 φ 1.5mm × 20mm 格子，地上面からフード下端までの高さ約 6700mm)
	受入れ区域	幅計約 15000mm × 高さ約 3000mm	・防雪フード設置(防鳥網 φ 1.5mm × 20mm 格子，地上面からフード下端までの高さ約 6200mm)
排気口	貯蔵区域	幅約 8000mm × 高さ約 3000mm (片壁面あたり 12 箇所，計 24 箇所設置)	・遮風板設置(ガラリメッシュ約 30mm 幅，地上面から遮風板下端までの高さ約 22700mm)
	受入れ区域	幅計約 28000mm × 高さ約 1300mm	・遮風板設置(ガラリメッシュ約 30mm 幅，地上面から遮風板下端までの高さ約 19300mm)

#### 8.4.2 金属キャスクへの影響評価

建屋内に侵入したばい煙の熱による金属キャスクへの影響については，ばい煙の建屋内への侵入から短時間の場合は，建屋内の安全が確認でき次第速やかに金属キャスクやその他の設備の状況について点検を実施し，必要に応じて清掃等を実施することにより安全性を確保できる。

建屋内に侵入したばい煙，有毒ガスについては，建屋の構造上長時間滞留することは考えにくく，金属キャスクを含む建屋内の各設備に

大きな影響を与えることはないものと考えられる。また、短時間でもばい煙や有毒ガスの環境に晒された金属キャスクや各設備に対する長期的な影響についても、建屋内の状況の常時監視や毎日の巡視点検、及び定期的な設備の詳細点検・保守の実施により都度異常の有無を確認することができ、安全性を確保できることから、外部火災に対する二次的影響の評価についてはばい煙及び有毒ガスによる評価を実施することとする。

#### 8.4.2.1 金属キャスクの遮へい機能について

金属キャスクについては、放射性物質を限定された空間に閉じ込めるための以下の配慮がなされている。

- ① 蓋及び蓋貫通孔のシール部には長期間にわたって閉じ込め性能を維持する観点から耐熱性、耐食性を有し、耐久性の高い金属ガスケットを用いる。
- ② 金属キャスク本体を堅固な構造とし、蓋部は一次蓋、二次蓋の二重蓋構造とする。閉じ込め境界は、本体胴、一次蓋、バルブカバー及び金属ガスケットとする。また、本体胴、一次蓋、二次蓋、バルブカバー、圧力センサ及び金属ガスケットからなる空間を閉じ込め監視圧力境界とする。
- ③ 金属キャスク内部は負圧とし、蓋間空間はあらかじめ正圧とすることにより圧力障壁を設ける。
- ④ 蓋間空間の圧力を監視することにより、万一、いずれかの金属ガスケットに漏えいが生じた場合、閉じ込め機能低下が検出できる構造とする。この場合でも、金属キャスク内部の負圧は維持され、内部気体が直接大気中に放出されることはない。
- ⑤ 万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、蓋を追加装着できる構造を有すること等、閉じ込め機能の修復性を考慮する。

上記の配慮により金属キャスクは密封構造となっており、境界内

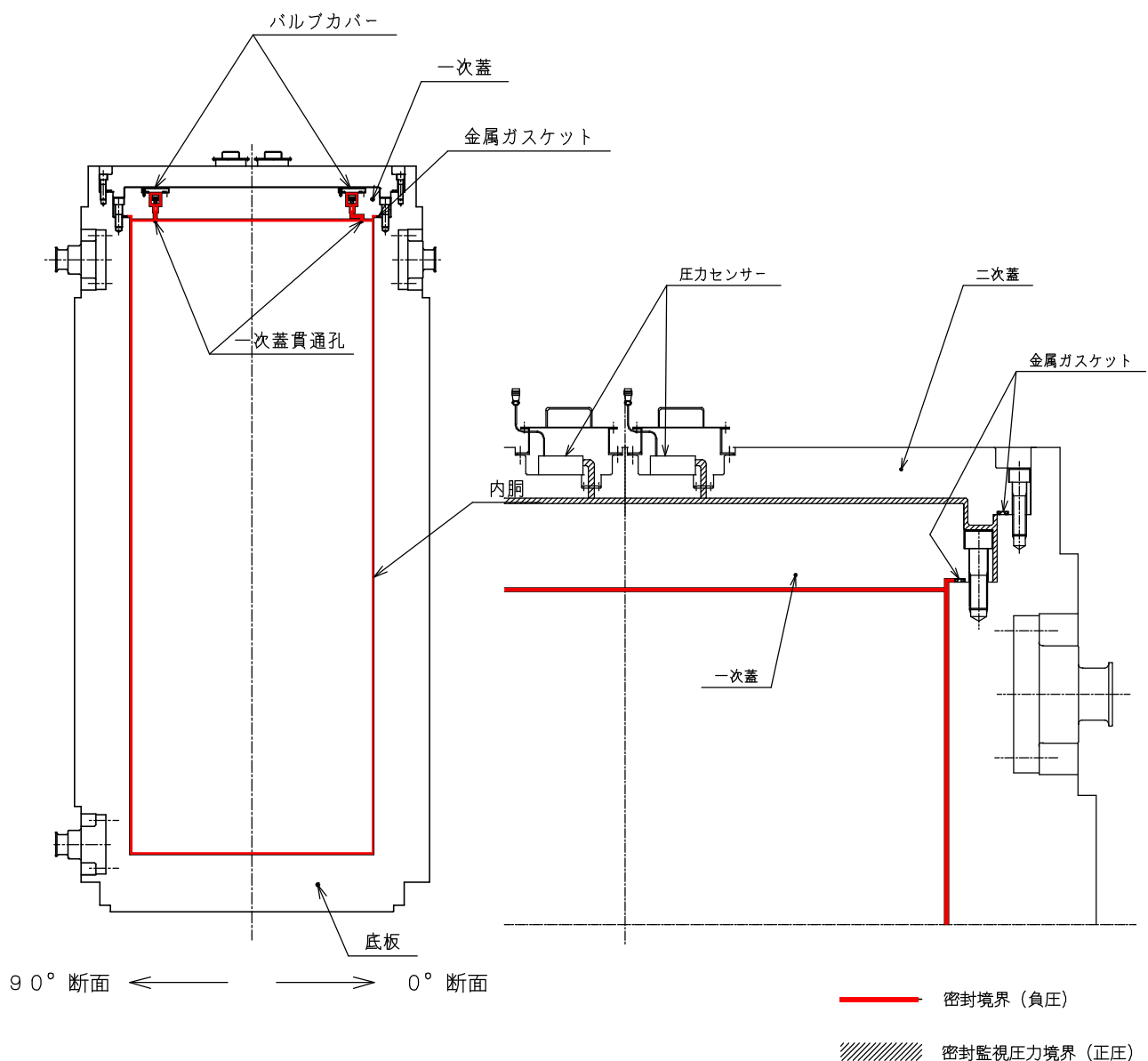
部を負圧にすることで遮へい機能を保っている。金属キャスクの密封境界部について第 63 図に示す。

金属キャスクへのばい煙、有毒ガスの影響については、金属キャスク本体へのばい煙の付着あるいは二次蓋と保護カバーの間隙から侵入し二次蓋の金属ガasketに付着することが考えられるが、金属キャスク本体については、外気に触れる部材において塗装等の防錆処置を施してあり、直接外気に触れる外筒、二次蓋等の塗装には、耐食性のほかに耐放射線性・汚染除去性・耐熱水性が求められる原子力プラントでは多く使用されているエポキシ樹脂系塗料が用いられている。同じく外気に触れる蓋ボルトには耐摩耗性に優れたメッキを施してある。このため、ばい煙や腐食性のある有毒ガスに対しても影響はないものとする。なお、塗装の防錆効果を考慮せずキャスク本体素材である炭素鋼の全面腐食を仮定して評価したところ、数 mm 程度（60 年間）の減肉であり実用上問題となる腐食量にはならない結果となったことを確認している。

また、貯蔵状態においては、二次蓋の上面について保護カバーで覆うことにより傷や汚れを防止するとともに、海塩粒子等の付着や異物の侵入を抑制する。

さらに、貯蔵期間中は定期的に外観検査を行い、塗装表面の都度清掃や、傷などがつき金属表面が露出した場合は補修塗装を行う計画であることから、ばい煙及び有毒ガスによる金属キャスクへの影響はないものと判断する。





第 63 図 金属キャスクの密封境界部

#### 8.4.2.2 保護カバーについて

金属キャスクの貯蔵期間中は，下記の目的のため金属キャスクの二次蓋上部に保護カバーを設置することとしている。

- ①三次蓋取付フランジ部（ゴムOリングシール面と蓋取り合い面で構成）は，貯蔵後輸送時の密封境界を形成する部分であり，傷防止及び防錆処理の観点から保護が必要である。

- ②二次蓋端面と本体側二次蓋取り合い面（嵌め合い部）の隙間への異物混入防止及び防錆処理面の保護，及び二次蓋ボルト取付部への異物混入防止とボルト着座部の保護のために，二次蓋ボルト部を覆うような構造とする。
- ③現場における定期点検において柔軟な確認作業が行えるよう，保護カバーは容易に取外しが可能な構造，寸法，重量とする。

以上の理由から，保護カバーの材料には軽量なエンジニアリングプラスチックを使用することとしている。保護カバーの設置概要図について第 64 図に示す。三次蓋フランジ面に装着後は，ズレ防止のため三次蓋ボルト穴にピンを設置する。

保護カバーの取扱いについては貯蔵エリア内にて行われるが，その取扱い性を考慮し人力でも取り扱えるように分割式とし，容易に取外しが可能な設計とする。したがって，金属キャスクの保守点検時における二次蓋のボルト穴や三次蓋シール面の確認時においても，保護カバーがその実施に影響することはない。

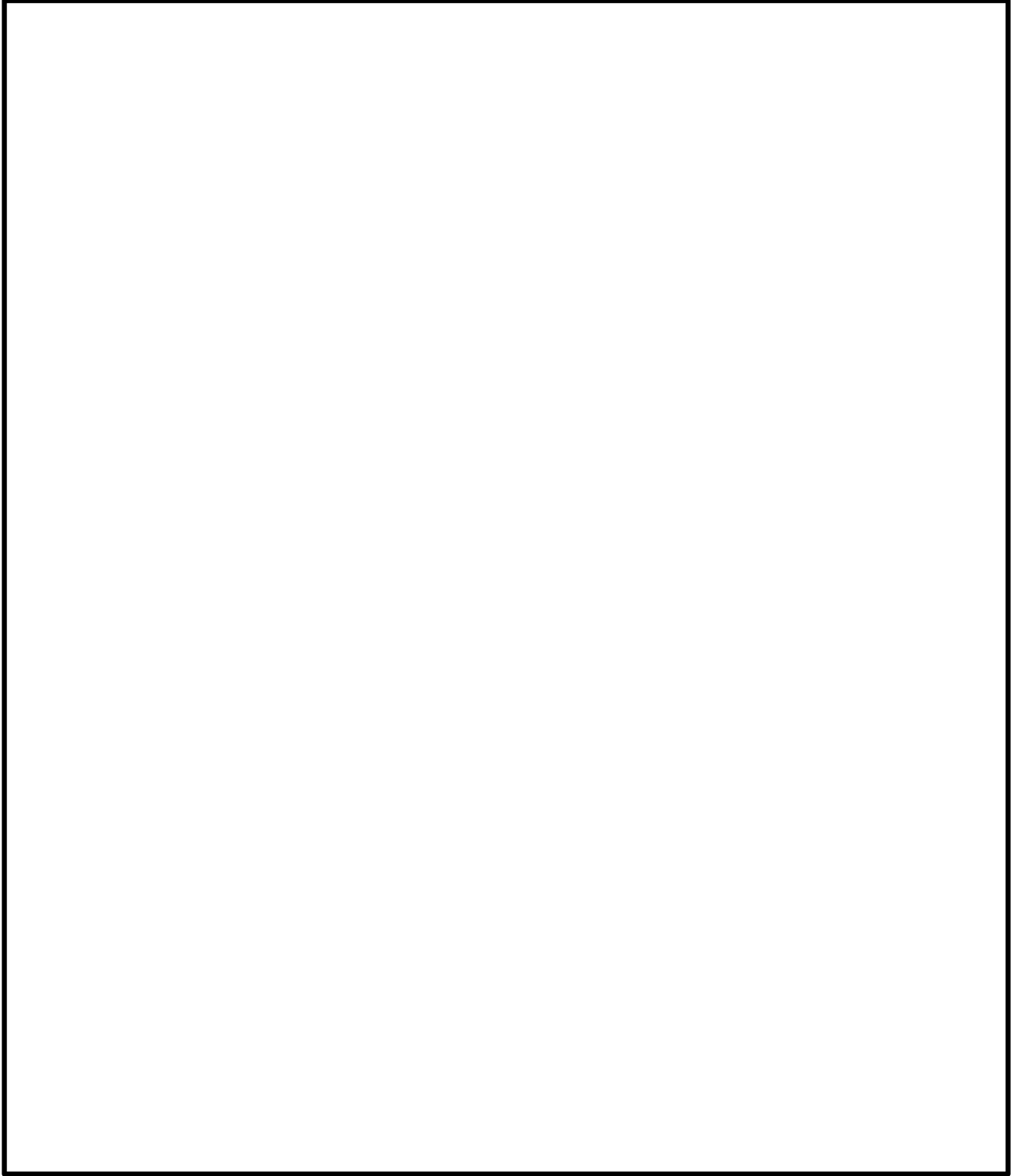
使用を予定しているエンジニアリングプラスチックは，MC ナイロン（登録商標）という名称であるナイロン 6（ $\{CO-(CH_2)_5-NH\}_n$ ）と呼ばれるポリアミド樹脂であり，重合法及び成形方法を改善した大形素材で，機械的強度や耐油性に優れ汎用的に使用されている。以下に，その特徴を示す。

- ・耐熱性：連続使用温度 120℃に対し，貯蔵中の蓋部温度は 90℃程度であることから耐熱性が問題となることはない。
- ・耐燃性：JIS による酸素指数(22%以下が可燃性)は 26%であり可燃性材ではなく，また ASTM D635（燃焼速度試験）において自己消火性\*を有する材料と定義されている。  
(\*自己消火性：単独で燃焼を継続しない性質)
- ・耐放射線性：放射線照射量が  $10^4$  Gy を超えてから機械特性の変化が見られるが，貯蔵中（50 年間）の当該部の照射量は最大で  $10^2$  Gy 程度であることから 50 年間の貯

蔵においても放射線による劣化が問題となることはない。

- ・ 耐候性：材料メーカーの3年間の屋外試験で紫外線や雨に晒しても有意な劣化がなかったことが確認されており、耐候性に優れている。
- ・ 耐錆性：三次蓋取付フランジ部のシート面の錆に対しては、海風による錆発生を低減でき、またシート面に接する部分についても樹脂であることから異種金属の接触による錆発生（腐食）もない。

金属キャスクは、貯蔵期間中は自然換気構造である貯蔵建屋にて保管されるが、保護カバーは上記の特徴をもつ材料を用いているため、貯蔵建屋内にばい煙が侵入した場合においても、貯蔵中の金属キャスクに影響を及ぼすことはない。



第 64 図 金属キャスク保護カバー設置概要図

## 8.5 居住性への影響評価

貯蔵建屋及び事務建屋の居住性の影響については、外部火災により発生する有毒ガスに対する評価となる。外部火災により発生すると考えられる有毒ガスについては、IDLH 対象物質である一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)が考えられるが、これらは人体に対する影響を左右するものである。

貯蔵建屋については、金属キャスク貯蔵期間中は金属キャスク及び各設備の点検、保守の実施時以外に人が常駐することはない、火災発生時には建屋内の人員は迅速に安全な場所に避難することにより危険を回避することができることから、居住性への影響については考慮する必要はない。

事務建屋は従業員の執務のための建屋であり、基本的安全機能を有する設備に対し直接操作を行うことにより当該機能を維持する設備は設置されておらず人員が常駐する必要はない。外部火災発生の際には、事務建屋内の人員は速やかに避難することで危険を回避することができることから、事務建屋については外部火災に対する居住性への影響については考慮する必要はないものとする。

貯蔵建屋や事務建屋からの避難の際、有毒ガスの影響が懸念される場合でも、原子力防災資機材の一環として貯蔵施設内に設置されているエアボンベ等の防護装置により対処することができる。

以上より、外部火災による有毒ガスに対する居住性への影響はない。

## 参考文献

- (1) 原子力規制委員会「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」  
(平成 25 年 6 月)
- (2) 青森県石油コンビナート等防災計画 (平成 23 年 2 月修正)
- (3) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第 5 版」
- (4) 「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 (平成 21・06・25 原院第 1 号(平成 21 年 6 月 30 日原子力安全・保安院一部改正))」(原子力安全・保安部会, 原子炉安全小委員会)
- (5) 「航空機落下事故に関するデータの整備」(独立行政法人 原子力安全基盤機構, JNES/SAE08-012 08 解部報-0012, 平成 20 年 3 月)
- (6) 国土交通省 H P 「航空輸送統計調査 年報」(昭和 63 年～平成 19 年分)  
<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/syousaikensaku.html>
- (7) 「正方形熱源の風下における温度分布 (佐賀武司)」(東北工業大学紀要 I 理工学編  
第 16 号 1996)
- (8) 自治省消防庁消防研究所「大規模石油タンクの燃焼に関する研究報告書」(H11/9)  
p7 Figure 1.2

## コンクリート許容温度（200℃）について

コンクリートの熱影響に対する圧縮強度については、実証試験の結果<sup>(1)</sup>より 200℃程度以下までであれば常温の状態とほとんど変化がなく、影響も少ないことが確認されている。

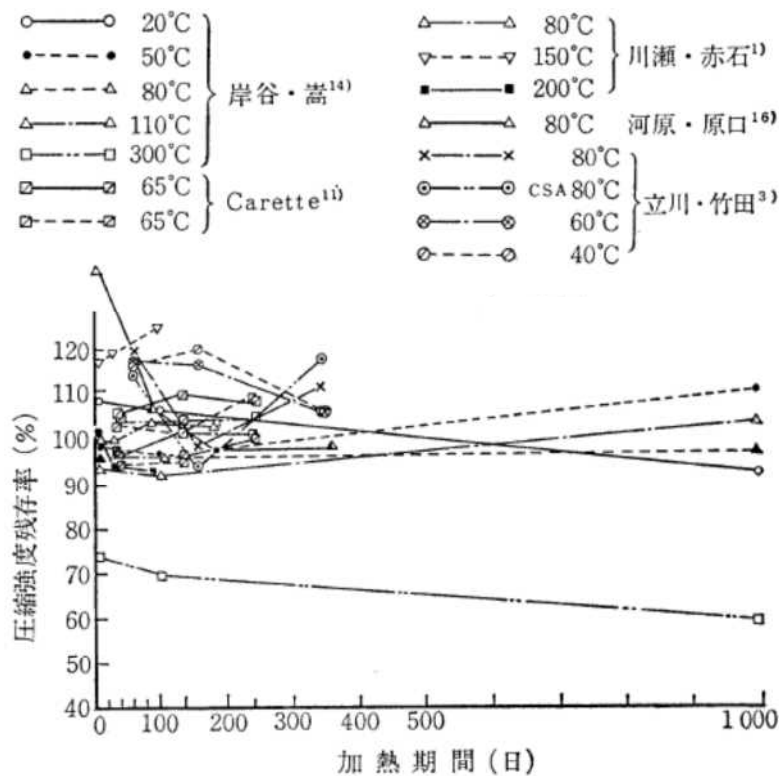
この実証試験における供試体の加熱方法については、供試体の内外温度差と供試体内の温度分布の不均一を小さくし、熱応力の影響を小さくするため 100℃/hr にてそれぞれの計画加熱温度（常温（20℃）及び 100℃～600℃まで 100℃刻みの計 7 パターン）まで加熱し、計画加熱温度到達後は供試体内部温度が均一となるようにそれぞれの計画加熱温度にて 24 時間保持させ、その後自然冷却により降温している。供試体の加熱パターンについて、別添 1－1 図に示す。



別添 1－1 図 コンクリート供試体加熱パターン

加熱後の供試体については、加熱温度 300℃までは外観上の変化も認められなかったことから、コンクリート温度 200℃において 24 時間保持した状態でもコンクリートの強度については異常がないことが確認できる。

また、他の論文<sup>(2)</sup>においても、コンクリート材料の耐熱性を評価する場合には、加熱温度のほかに加熱期間が問題になるとしており、各実験結果を比較した上で、加熱期間が100日以下の短期である場合には、加熱期間が短い方が圧縮強度の低下はより少ないものと評価している（別添1-2図）ことから、上記、コンクリート温度200℃において24時間保持した状態でもコンクリートの強度については異常がないことの妥当性を示しているものと考えられる。



別添1-2図 加熱期間と圧縮強度残存率の関係

一方、森林火災によって外壁表面温度が最高で約138℃となった場合（発火点1（発火時刻7:56）における評価結果）のコンクリート温度上昇に対する時間変化については、別添1-3図に示すとおり2時間以内に加熱前の温度に戻ることが確認されることから、24時間と比較しても十分短時間であることが確認できる。また、その他の発火点（1（発火時刻6:58）、2、3）における評価結果に対しても別添1-4図のとおり約2時間以内で加熱前の温度に戻ることが確認されること



から、同様に 24 時間と比較して十分短時間であることが確認できる。

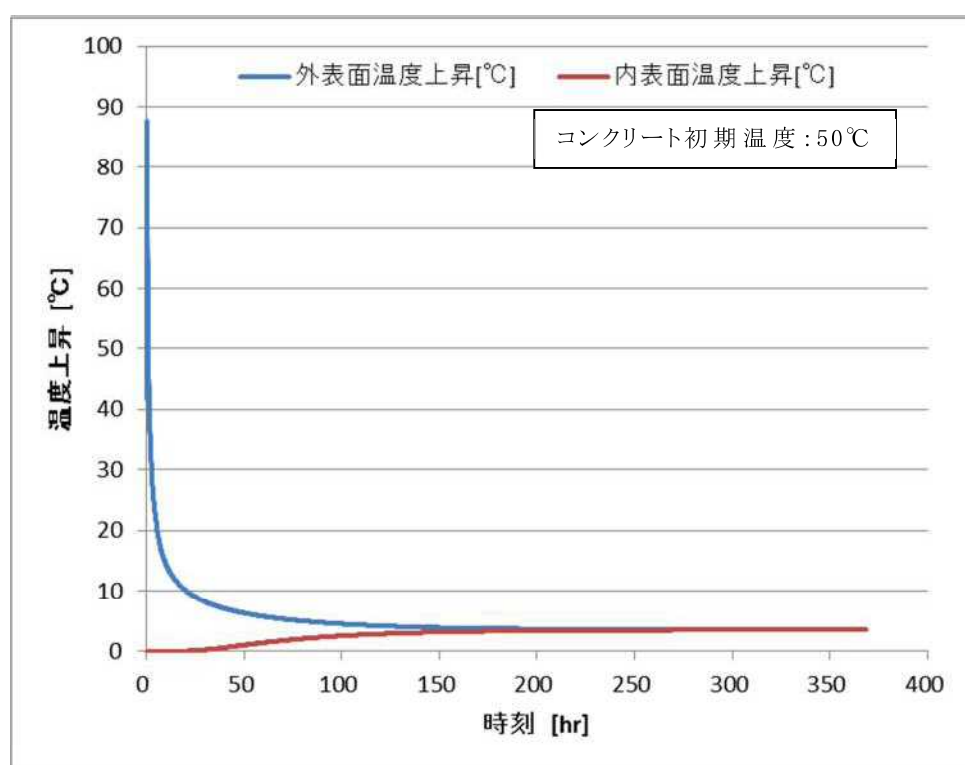
このことから、概括的にコンクリートの熱影響に対する強度については、200℃程度以下までであれば常温とほとんど変化がなく影響も少ないと考えられるため、貯蔵建屋外壁の許容温度については 200℃と定めた。

※コンクリート制限温度値(200℃)：

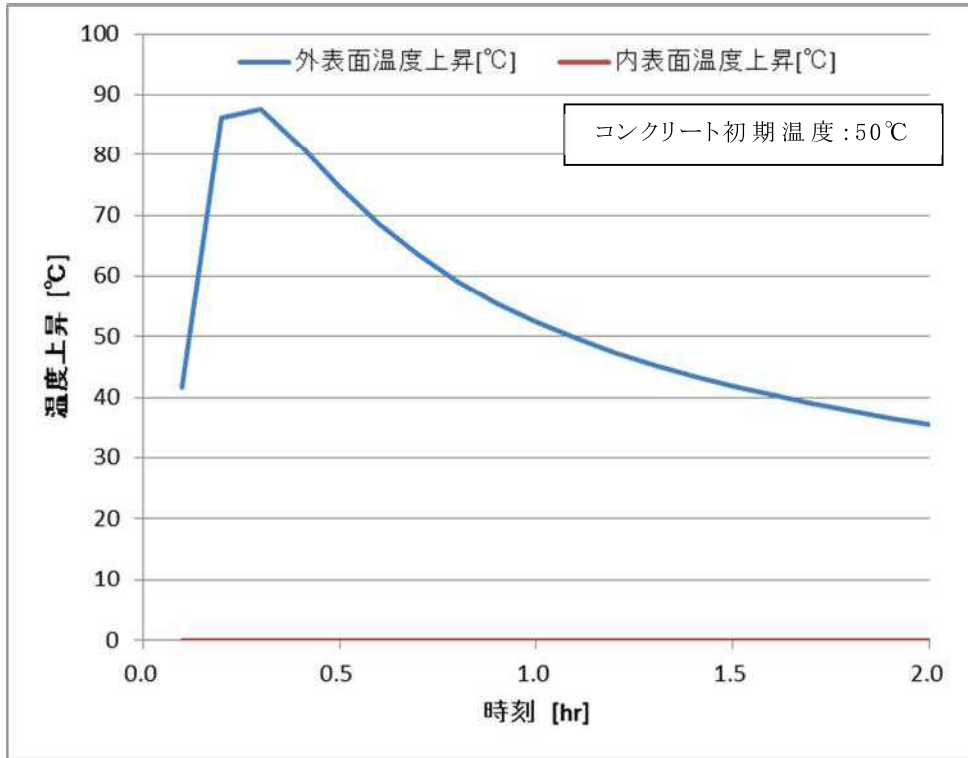
各文献値をもとにしたコンクリートの熱影響に対する温度上限値（新規制基準に対する安全審査で各事業者も採用している値）

#### 参考文献

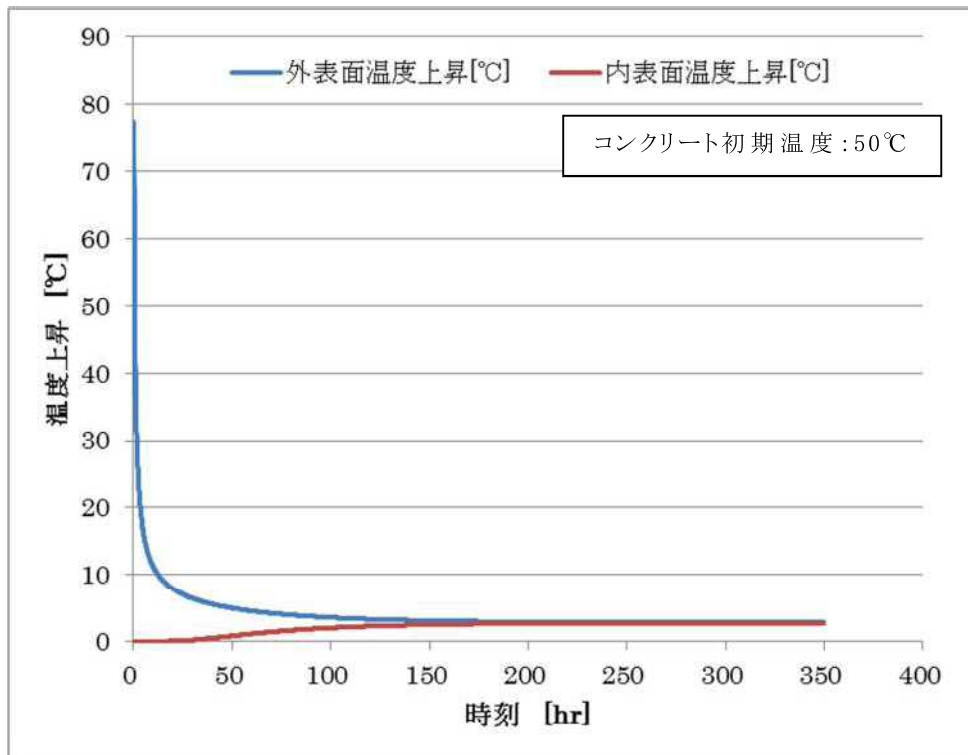
- (1)：論文「高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究」  
(コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003)
- (2)：論文「高温下のコンクリートの物性」(コンクリート工学 Vol.22(1984) No.3)



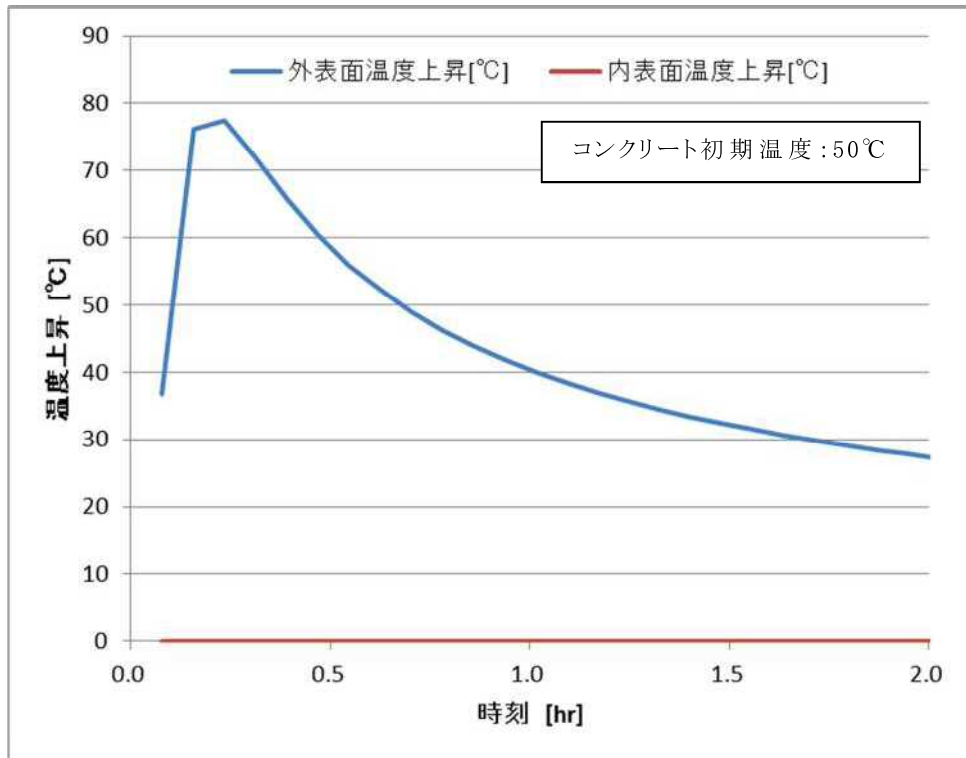
別添 1 - 3 図(1) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 1（発火時刻 7:56））



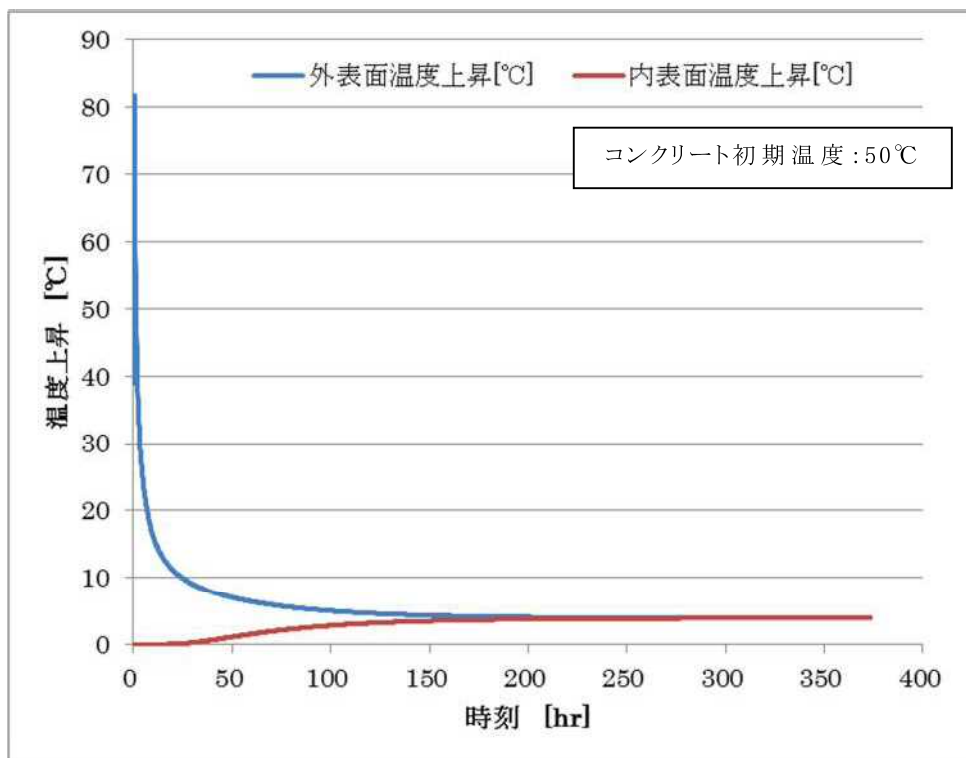
別添 1 - 3 図(2) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 1（発火時刻 7:56））



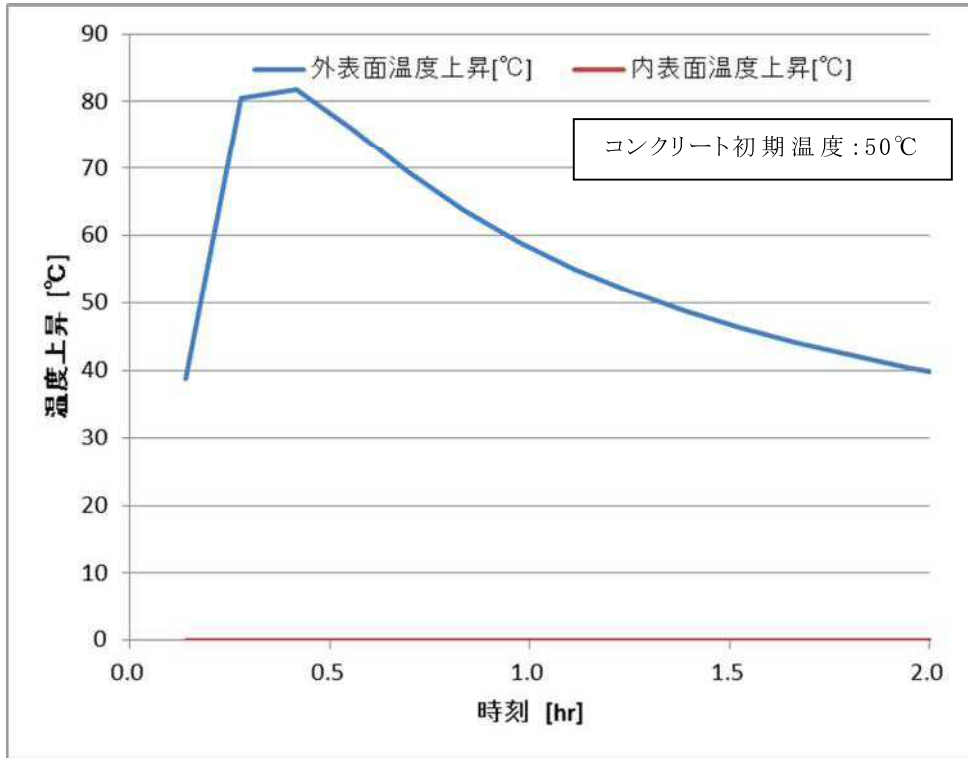
別添 1 - 4 図(1) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 1（発火時刻 6:58））



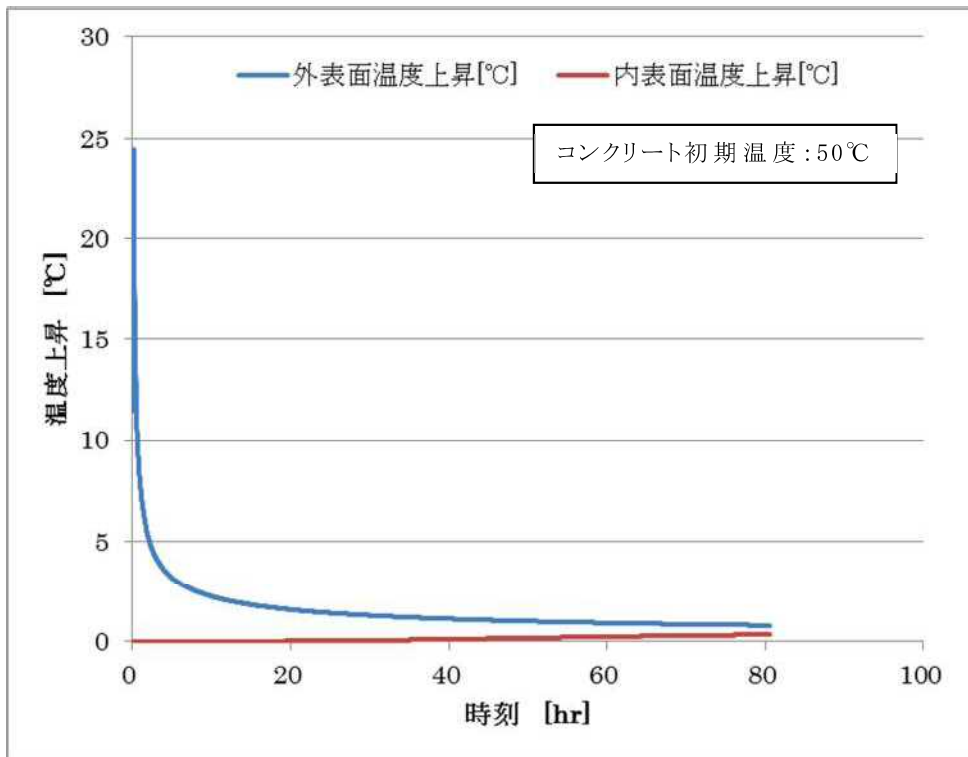
別添 1 - 4 図(2) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 1（発火時刻 6:58））



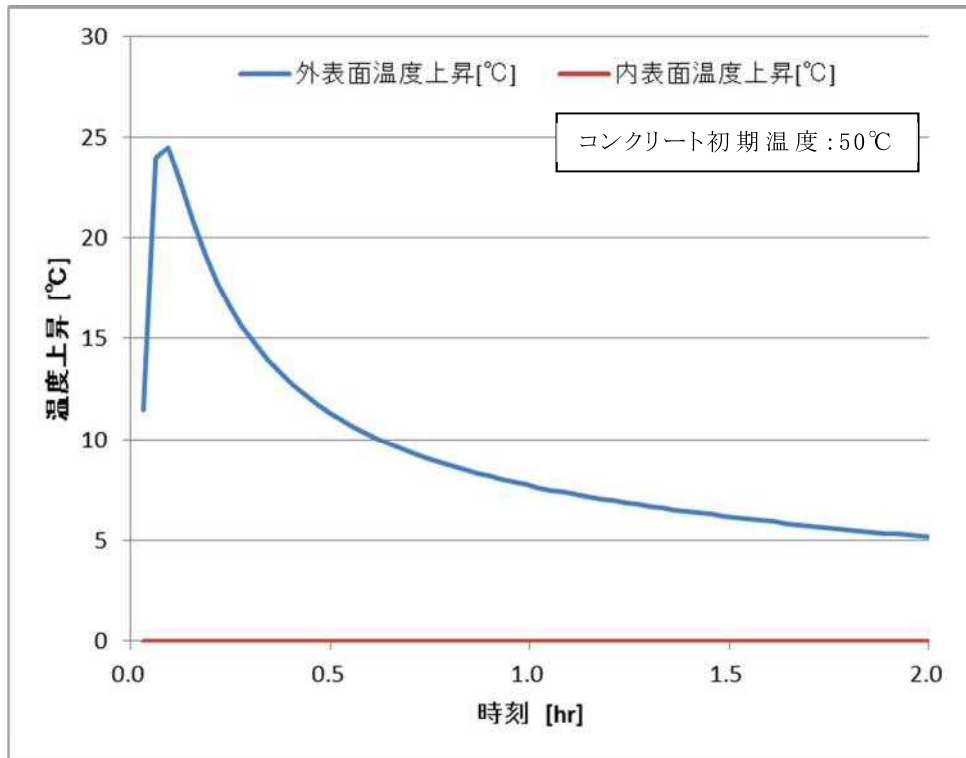
別添 1 - 4 図(3) 建屋外壁（内壁）温度の時間変化  
（発火点 2（発火時刻 10:00））



別添 1-4 図(4) 建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化  
(発火点 2 (発火時刻 10:00))



別添 1-4 図(5) 建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化  
(発火点 3 (発火時刻 11:00))



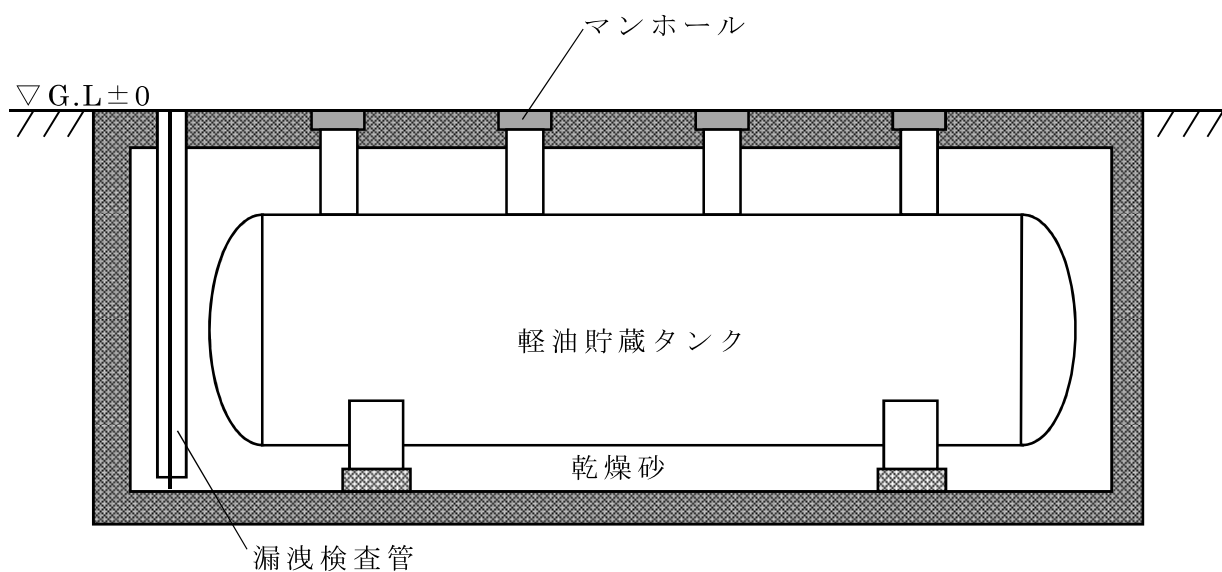
別添 1 - 4 図(6) 建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化  
(発火点 3 (発火時刻 11:00))

## 軽油貯蔵タンクの地下化について

軽油貯蔵タンクは、「危険物の規則に関する政令」及び「危険物の規制に関する規則」に適合する地下タンク貯蔵所として設計するため、地表面で火災が発生する可能性は低い。

また、タンク地上部のマンホールも含め、地上で発生する火炎からの輻射熱の影響を受けない構造とする。

以上から、軽油貯蔵タンクは、外部火災源の対象から除外する。軽油貯蔵タンクの構造概要図を別添 2 - 1 図に示す。



別添 2 - 1 図 軽油貯蔵タンクの構造概要

## 航空機墜落確率の最新化による外部火災評価への影響について

## 1. 航空機墜落確率の再評価

航空機墜落による外部火災評価に用いたカテゴリ毎の航空機墜落確率について、NRA 技術ノート「航空機落下事故に関するデータ（平成10～29年）」（NTEN-2019-2001）に基づき再評価した。別添3-1表に外部火災評価に用いた墜落確率との比較を示す。

「軍用機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故」のみわずかではあるが墜落確率が上昇した。その他のカテゴリについては、既評価と同等か若干低い結果となった。

したがって、航空機墜落による火災評価についてのみ別添3-1表の墜落確率にて貯蔵建屋外壁温度評価を実施し、影響を確認する。

別添3-1表 カテゴリ毎の航空機墜落確率の比較

カテゴリ		墜落確率（回／施設・年）	
		既評価	再評価
民間航空機	①計器飛行方式（大型固定翼機）	$9.20 \times 10^{-10}$	$9.11 \times 10^{-10}$
軍用機（自衛隊機, 米軍機）	②高高度飛行を行う大型固定翼機	$1.79 \times 10^{-9}$	$1.79 \times 10^{-9}$
	③その他の機種	$1.52 \times 10^{-8}$	$1.59 \times 10^{-8}$
	④基地－訓練空域往復時の墜落事故	$2.13 \times 10^{-8}$	$2.13 \times 10^{-8}$

## 2. 軍用機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故による外部火災再評価

### 2.1 墜落地点の想定

#### (1) 標的面積

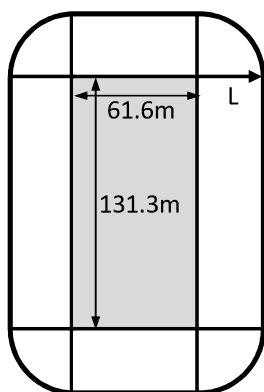
「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率  $10^{-7}$ （回／炉・年）に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は  $0.0081 \text{ km}^2$  であることから、航空機の墜落確率が  $10^{-7}$ （回／炉・年）となる標的面積  $S$  を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (1.59 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 50943.40 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

#### (2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、別添 3-1 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 70 \text{ m}$  となった。



$$\pi L^2 + 2(131.3 + 61.6)L + 131.3 \times 61.6 = S$$

これをLについて解くと

$$L = \frac{-(131.3 + 61.6) + \sqrt{(131.3 + 61.6)^2 - \pi(131.3 \times 61.6 - S)}}{\pi}$$

となる。

別添 3-1 図 離隔距離計算イメージ

### 2.2 火災影響評価

#### (1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：F-15

燃料の種類：JP-4



燃料量：14.87 (kℓ) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イーグル  
 (航空ジャーナル社 昭和 55 年 2 月 5 日発  
 行) 記載値  
 火炎輻射強度：58000 (W/m<sup>2</sup>) ※ガイド附属書 B のガソリンの値  
 質量低下速度：0.051 (kg/m<sup>2</sup>/s) ※NUREG-1805 の JP-4 の値  
 燃料密度：760 (kg/m<sup>3</sup>) ※NUREG-1805 の JP-4 の値  
 燃焼面積：44.6 (m<sup>2</sup>) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イー  
 グル記載の図面より算出した。

## (2) 評価対象建屋に関する入力データ

建屋からの離隔距離：70 (m)

外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m<sup>3</sup>)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第 5 版の石灰岩コンクリートの値

## (3) 評価方法

ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

### (a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、3.768 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{44.6/\pi} = 3.768 \text{ (m)}$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積 (m<sup>2</sup>)

### (b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.005675 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

$\phi$  : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、329.15 W/m<sup>2</sup>となり、切り上げて約 329.2 W/m<sup>2</sup>とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.005675 = 329.15 \Rightarrow 329.2 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>), R<sub>f</sub> : 火炎輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、4968.8 sとなり、切り上げて約 4969 sとした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 14.87 / (44.6 \times 0.0000671) = 4968.8 \Rightarrow 4969 \text{ (s)}$$

ここで、 $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671$ ,  $\pi R^2 \doteq S = 44.6$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m<sup>3</sup>), v : 燃焼速度 (m/s)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T<sub>0</sub> : 初期温度 (°C),

k : 熱伝導率 (W/m/K),  $\kappa$  : 温度拡散率 (=k/ρC<sub>p</sub>) (m<sup>2</sup>/s),

ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>), C<sub>p</sub> : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価