

【公開版】

令和元年 10 月 31 日	
資料番号	1

六ヶ所再処理施設における
新規制基準に対する適合性

第九条：外部からの衝撃による損傷の防止【外部火災】
航空機墜落による火災について

日本原燃株式会社

【令和元年度 306 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合での指摘事項】

航空機墜落火災評価における対象航空機の選定の考え方について説明すること。

【指摘事項に対する回答】

航空機墜落火災評価における対象航空機については、従来は三沢対地訓練区域を訓練飛行中の自衛隊機又は米軍機のうち、当社による調査結果から、積載燃料が多い自衛隊機のF-2を選定するとともに、今後、訓練飛行を行う主要な航空機となる可能性のあるF-35を選定していた。

しかし、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」及び「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率評価について（平成21年6月30日 原子力安全・保安院）」の要求を踏まえ、航空機墜落火災評価における対象航空機については以下のとおり選定する。

- 「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」を参考として、燃料積載量が最大の自衛隊機であるKC-767を選定する。
- 再処理施設の南方向約10kmの三沢対地訓練区域を訓練飛行中の自衛隊機又は米軍機のうち、当社による調査結果から、自衛隊機のF-2及び米軍機のF-16を選定する。
- 今後、訓練飛行を行う主要な航空機となる可能性のあるF-35についても選定する。
- 火災による熱影響評価の対象とする航空機については、熱影響が厳しいF-16を選定する。

1. はじめに

令和元年8月21日に開催された令和元年度第23回原子力規制委員会において、航空機墜落による火災については、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」（以下「外部火災ガイド」という。）によらず、建屋外壁等で火災が発生することを評価の前提とすること、また、火災影響評価にあたってのモデル化の考え方については、外部火災ガイドを参考に行うこととの方針を踏まえ、再処理施設への航空機墜落による火災の再評価結果を以下に示す。

2. 航空機墜落による火災の条件

(1) 航空機墜落による火災の想定

航空機墜落による火災の想定は、以下のとおりとする。

- a. 航空機は、対象航空機のうち、燃料積載量が最大の機種とする。
- b. 航空機は、燃料を満載した状態を想定する。
- c. 航空機墜落地点は、建屋外壁等の外部火災防護施設への影響が厳しい地点とする。
- d. 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する。
- e. 気象条件は無風状態とする。
- f. 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倍とする。
- g. 油火災において任意の位置にある輻射強度を計算により求めるには、半径が1.5m以上の場合で火炎の高さを半径の3倍にした円筒火災モデルを採用する。

(2) 墜落による火災を想定する航空機の選定

外部火災ガイドを参考に、航空機墜落火災の対象航空機については、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率評価について（平成21年6月30日 原子力安全・保安院）」（以下「航空機落下確率評価ガイド」という。）の落下事故の分類を踏まえ、以下の航空機の落下事故における航空機を選定する。

a. 自衛隊機又は米軍機の訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行中の落下事故の航空機

外部火災ガイドを参考として、燃料積載量が最大の自衛隊機であるKC-767を選定する。

また、再処理施設の南方向約10kmに三沢対地訓練区域があり、自衛隊機及び米軍機が訓練を行っている。このため、三沢対地訓練区域を訓練飛行中の自衛隊機又は米軍機のうち、当社による調査結果から、自衛隊機のF-2及び米軍機のF-16を選定する。さらに、今後、訓練飛行を行う主要な航空機となる可能性のあるF-35についても選定する。

各航空機の燃料積載量を第2-1表に示す。

第2-1表 航空機の燃料積載量

対象航空機	燃料積載量 (m ³)
KC-767	145.1 ⁽¹⁶⁾
F-2	10.4 ⁽²⁾⁽³⁾
F-16	9.8 ⁽¹⁾⁽³⁾
F-35	10.8 ⁽³⁾⁽⁴⁾

b. 計器飛行方式民間航空機の空路を巡航中の落下事故の航空機

直行経路を巡航中の計器飛行方式民間航空機の落下事故については、航空機落下確率評価の [1] 式を用いると、航空機落下確率が 10^{-7} 回/年となる範囲が敷地外となる。

$$P_c = \frac{f_c \times N_c \times A}{W} \dots [1]$$

P_c : 再処理施設への巡航中の航空機落下確率 ; 1×10^{-7} (回/年)

A : 標的面積 (k m^2)

N_c : 評価対象とする直行経路の年間飛行回数 (1, 825 (飛行回/年)

(注 1))

W : 航空路幅 (14. 816 (k m) ⁽⁵⁾)

$f_c = G_c/H_c$: 単位飛行距離当たりの巡航中の落下事故率 (回/ (飛行回 \cdot k m))

G_c : 巡航中事故件数 (0. 5 (回) (注 2))

H_c : 延べ飛行距離 (11, 497, 450, 753 (飛行回 \cdot k m) ^{(6) (7)} (注 3))

(注 1) 国土交通省航空局に問い合わせた結果 (平成27年の札幌管制区のピーク日の交通量) を365倍した値。

(注 2) 事故件数は平成11年1月から平成30年12月の間 ^{(6) (8)} 0回であるが、厳しい評価となるように0.5回とした。

(注 3) 平成11年1月から平成24年12月での期間は「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」、平成25年1月から平成30年12月までの期間は「航空輸送統計調査」による。

敷地外における外部火災については、石油備蓄基地に配置している51基の原油タンク（約11.1万 m^3 /基）の原油全てが防油堤内に流出した全面火災を想定している。計器飛行方式民間航空機の墜落による火災について、最大の燃料積載量（約240 m^3 ）である機種火災を想定しても、石油備蓄基地火災の規模を踏まえると、計器飛行方式民間航空機の墜落による火災は、近隣工場等の火災影響評価に包含される。

3. 熱影響評価の共通データ

(1) 航空機墜落地点について

再処理施設は敷地内に放射性物質を取り扱う建屋が多く、面的に広く分布していることを踏まえ、離隔距離を想定しない航空機墜落による火災としてとらえ、建屋外壁等の外部火災防護施設への影響が厳しい地点とする。また、航空機墜落事故として単独事象を想定する。

(2) 火災源から受熱面への輻射強度の算出

a. 形態係数の算出

形態係数は、外部火災ガイドを参考として以下の前提に基づき[2]式より算出する。

- i. 航空機墜落による火災は、墜落の状況によって様々な燃焼範囲の形状が想定されるが、円筒火災を生ずるものとする。
- ii. 燃焼面積は、航空機の投影面積と等価な円を仮定する。
- iii. 以上より形態係数は0.5とする。

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

$$\text{ただし, } m = \frac{H}{R} = 3, \quad n = \frac{L}{R}, \quad A = (1+n)^2 + m^2, \quad B = (1-n)^2 + m^2$$

ここで、

ϕ : 形態係数

L : 離隔距離 (m)

H : 火炎の高さ (m)

R : 燃焼半径 (m)

b. 受熱面における輻射強度の算出

輻射強度は外部火災ガイドを参考として、[3]式より算出する。航空機燃料の輻射発散度については、第3-1表のガソリン・ナフサの値を用いる。

また、外部火災防護施設のうち外部火災防護対象設備を収納する建屋及び危険物タンク等については、太陽光の入射として $0.4 \text{ kW/m}^{(9)}$ 2 を加算する。

以上より輻射強度は約 30 kW/m^2 とする。

$$E = Rf \cdot \phi \quad \dots [3]$$

ここで、

E : 輻射強度 (W/m^2)

Rf : 輻射発散度 (W/m^2)

ϕ : 形態係数

第3-1表 物質固有の輻射発散度

物質名	輻射発散度	物質名	輻射発散度
カフジ原油	41×10^3 (35×10^3)	メタノール	9.8×10^3 (8.4×10^3)
ガソリン・ナフサ	58×10^3 (50×10^3)	エタノール	12×10^3 (10×10^3)
灯油	50×10^3 (43×10^3)	LNG (メタン)	76×10^3 (65×10^3)
軽油	42×10^3 (36×10^3)	エチレン	134×10^3 (115×10^3)
重油	23×10^3 (20×10^3)	プロパン	74×10^3 (64×10^3)
ベンゼン	62×10^3 (53×10^3)	プロピレン	73×10^3 (53×10^3)
n-ヘキサン	85×10^3 (73×10^3)	n-ブタン	83×10^3 (71×10^3)

(単位は W/m^2 、かつこ内は $\text{kcal/m}^2 \text{h}$)
「外部火災ガイド」より抜粋

(3) 燃焼時間

燃焼時間は、[4]式より算出する。

燃焼速度については、文献⁽¹⁰⁾から油面降下速度 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とする。

燃焼範囲は航空機の投影面積を文献^{(2) (15) (17)}の図面から設定し、KC-767は $1,800 \text{ m}^2$ 、F-2は 110 m^2 、F-16は 90 m^2 及びF-35は 110 m^2 となる。

燃料量は、第2-1表からKC-767は 145.1 m^3 、F-2は 10.4 m^3 、F-16は 9.8 m^3 及びF-35は 10.8 m^3 である。

上記データ及び[4]式より、燃焼時間はKC-767が約1,100秒、F-2が約1,200秒、F-16が約1,400秒及びF-35が約1,300秒である。

$$t = \frac{V}{A \times v} \quad \dots [4]$$

ここで、

t : 燃料時間 (s)

V : 燃料量 (m^3)

A : 燃焼範囲 (m^2)

v : 燃焼速度 (m/s) (ガソリンの燃焼速度 4.8 mm/min より算出)

(4) 熱影響評価の対象航空機

上記(1)から(3)を踏まえ、選定した墜落による火災を想定する航空機における外壁表面温度の評価結果を第3-2表に示す。第3

－ 2 表より，火災による熱影響評価の対象とする航空機については，熱影響が厳しい F－16 を選定する。

第 3－2 表 熱影響評価の対象航空機

対象航空機	燃焼面積 (m^2)	燃料積載量 (m^3)	燃焼速度 (m/s)	燃焼時間 (s)	外壁表面温度* ($^{\circ}C$)
KC－767	1,800	145.1	8.0×10^{-5}	約 1,100	約 630
F－2	110	10.4		約 1,200	約 650
F－16	90	9.8		約 1,400	約 700
F－35	110	10.8		約 1,300	約 680

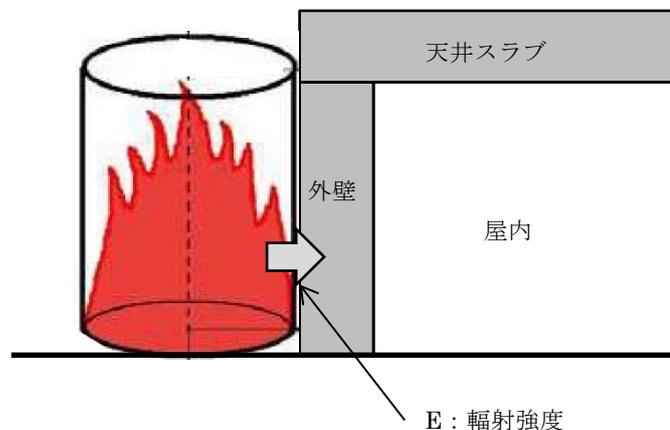
*：外壁表面温度は，4. に記載する評価式により算出。

4. 航空機墜落による外部火災防護施設への熱影響評価

(1) 外部火災防護対象設備を収納する建屋の熱影響評価

a. 熱影響評価について

外部火災防護施設のうち外部火災防護対象設備を収納する建屋（以下「対象建屋」という。）については、外壁の至近に円筒火災モデルを設定し、火災の発生から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度を与えるものとして熱影響を評価する。評価にあたっては、天井スラブ及び外壁のうち、離隔距離が小さく輻射熱による影響が厳しい外壁を代表とし、より厳しい評価となるように外壁表面からの対流及び輻射放熱は考慮せず、火災からの輻射のエネルギーは全て建屋内面に向かう評価モデルとする。円筒火災モデルの概要を第4-1図に示す。



第4-1図 対象建屋の計算モデル

熱影響評価により、外壁の温度上昇により屋内の外部火災防護対象設備の安全機能を損なわないこと、建屋外壁が要求される機能を損なわないことを確認する。

対象建屋外壁の内部温度の時間変化は、表面熱流束一定の半無限固体の熱伝導に関する [5] 式^(1.1) に基づき算出する。

$$T = T_0 + \frac{2 \times E \times \sqrt{\alpha \times t}}{\lambda} \times \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{4 \times \alpha \times t}\right) - \frac{x}{2 \times \sqrt{\alpha \times t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \times \sqrt{\alpha \times t}}\right) \right] \cdots [5]$$

ここで、

T : 外壁の内部温度 (°C)

x : 外壁表面からの深さ (m)

t : 燃焼時間 (s)

T_0 : 初期温度 (°C)

E : 輻射強度 (W/m²)

α : 温度伝導率 (m²/s) ($\alpha = \lambda / (\rho \times c)$)

λ : コンクリート熱伝導率 (W/mK)

ρ : コンクリート密度 (kg/m³)

c : コンクリート比熱 (J/kgK)

$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ ($\operatorname{erf}(x)$: 誤差関数)

対象建屋外壁に対する熱影響評価の計算条件を第4-1表に示す。

第4-1表 熱影響評価の計算条件

項目	記号	数値	単位
初期温度	T_0	50 ^{*2}	°C
燃焼時間	t	1,400	s
輻射強度	E	30 ^{*1}	kW/m ²
コンクリート熱伝導率	λ	1.74 ^(1,2)	W/mK
コンクリート密度	ρ	2,150 ^{*3}	kg/m ³
コンクリート比熱	c	963 ^(1,2)	J/kgK

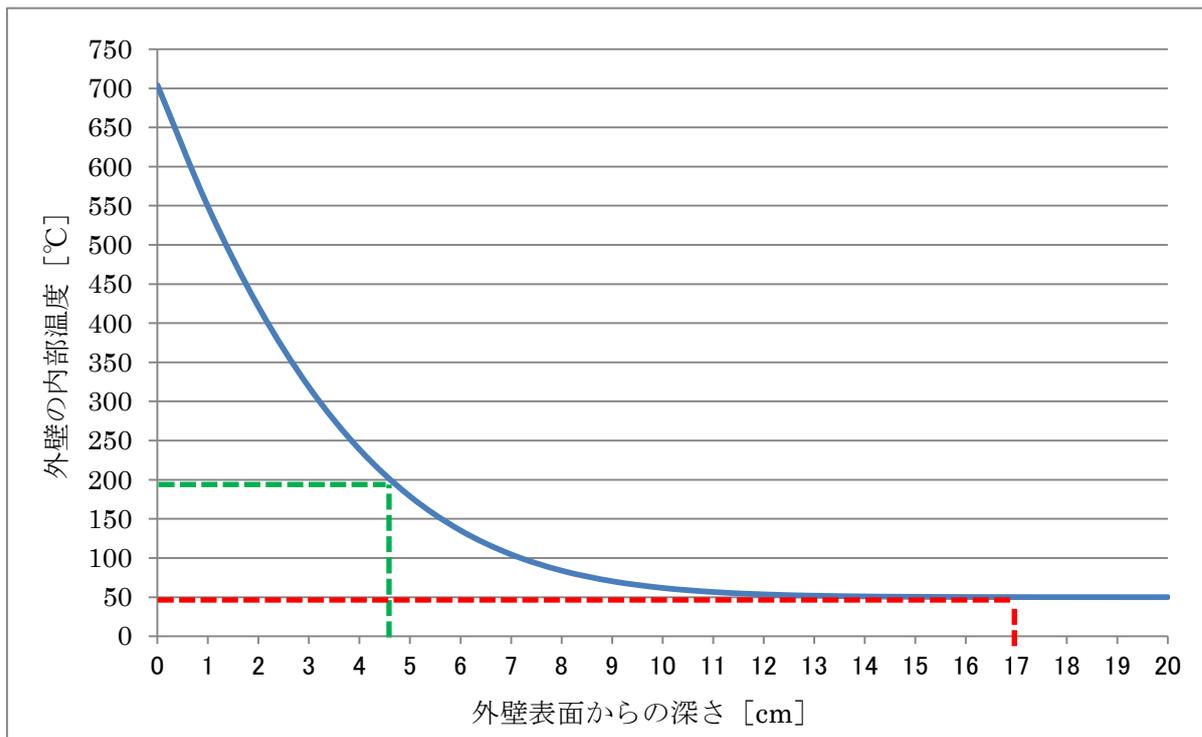
*1：太陽光の入射を考慮し、0.4kW/m²を加算。

*2：初期温度は、室内の最高温度を踏まえ設定。

*3：遮蔽設計の最小値（使用前検査確認項目）

b. 熱影響評価の結果について

評価対象航空機であるF-16の墜落による火災に対して対象建屋の外壁の熱影響評価の結果を第4-2図に示す。



第4-2図 建屋外壁を対象とした熱影響評価結果

評価の結果，外壁表面より約 17 c m で初期温度 (50°C) となり，入熱による影響がなくなることが分かる。これに対し，第4-2表に示すとおり，対象建屋の最小外壁厚は 17 c m 以上であることから，屋内に設置する外部火災防護対象設備の安全機能は損なわれない。

さらに，別途想定した航空機については，燃焼時間が F-16 より短時間であるため，F-16 の結果に包含される。

第4-2表 対象建屋の最小外壁厚

建屋名	最小外壁厚
使用済燃料輸送容器管理建屋の 使用済燃料収納使用済燃料輸送容器保管庫	約 130cm
使用済燃料受入れ・貯蔵建屋	約 120cm
前処理建屋	約 120cm
分離建屋	約 120cm
精製建屋	約 120cm
ウラン脱硝建屋	約 120cm
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	約 110cm
ウラン酸化物貯蔵建屋	約 120cm
ウラン・プルトニウム混合酸化物貯蔵建屋	約 120cm
高レベル廃液ガラス固化建屋	約 120cm
第1ガラス固化体貯蔵建屋	約 30cm
制御建屋	約 120cm
非常用電源建屋	約 30cm
主排気筒管理建屋	約 20cm

また、内部温度は外壁表面から深さ約 5 c m の領域においてはコンクリートの許容温度 $200^{\text{(13)}} \text{ } ^\circ\text{C}$ 以上となる。

日本建築学会「建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説」及び「構造材料の耐火性ガイドブック」を参考に鉄筋コンクリートの影響を想定すると、外壁の表層部分のコンクリートひび割れ、外壁表面から深さ 5 c m 未満のコンクリート強度低下が想定される。また、鉄筋では受熱温度が $500\sim 600^\circ\text{C}$ 以下であれば加熱冷却後の残存強度は

受熱前強度と同等であるとされていることに対し、鉄筋位置は表面から5 cm以上（設計かぶり厚さ：外壁6 cm，屋根5 cm）の深さにあることから、鉄筋に影響を及ぼすことはない想定される。

これらを踏まえ、建屋外壁に要求される機能と想定される損傷を考慮した影響評価を実施した結果を第4-3表に示すとおりであり、建屋外壁が要求される機能を損なわない。

第4-3表 建屋外壁への要求機能と影響評価

要求機能	内容	影響評価
放出経路の維持機能	換気空調設備と合わせて建物の区画形成により放出経路を維持する機能	外壁表面の損傷のみであり、放出経路の維持機能に影響はない。
遮蔽機能	放射線量を所定レベルまで低減する機能	損傷部分（外壁表面から5 cm）が無いとしても必要遮蔽厚が確保できること（第4-4表）、直線的な貫通ひび割れが発生しないことから遮蔽機能に影響はない。
支持機能	主要設備・機器を支持する機能	外壁表面の損傷のみであり、主要設備等の支持機能に影響はない。
波及的影響の防止機能	破損、落下又は転倒により、設備・機器の機能を阻害しない機能	コンクリートの表面損傷程度であり、設備・機器への物理的な波及的影響はない。

第4-4表 対象建屋の最小外壁厚と必要遮蔽厚

建屋名	最小外壁厚	必要遮蔽厚
使用済燃料輸送容器管理建屋の 使用済燃料収納使用済燃料輸送容器保管庫	約 130cm	100cm 以上
使用済燃料受入れ・貯蔵建屋	約 120cm	100cm 以上
前処理建屋	約 120cm	100cm 以上
分離建屋	約 120cm	100cm 以上
精製建屋	約 120cm	100cm 以上
ウラン脱硝建屋	約 120cm	100cm 以上
ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	約 110cm	100cm 以上
ウラン酸化物貯蔵建屋	約 120cm	100cm 以上
ウラン・プルトニウム混合酸化物貯蔵建屋	約 120cm	100cm 以上
高レベル廃液ガラス固化建屋	約 120cm	100cm 以上
第1 ガラス固化体貯蔵建屋	約 30cm	20cm 以上
制御建屋	約 120cm	-
非常用電源建屋	約 30cm	-
主排気筒管理建屋	約 20cm	-

c. 建屋全体の支持機能について

想定される損傷を考慮した場合においても、建屋全体の支持機能が維持されることを、以下の方法にて確認する。

また、評価結果を第4-5表及び第4-6表に示す。

- ・ 代表評価として外壁厚さ及び建物平面が小さい非常用電源建屋及び主排気筒管理建屋の2建屋とする。
- ・ 損傷範囲は長辺方向の外壁一面の深さ5cmとする。
- ・ 損傷範囲を減じた軸断面積 A' にて支持重量 W を支えられることを軸応力度 σ (W/A') とコンクリートの許容圧縮応力度 f_c の比較により確認する。

第4-5表 非常用電源建屋の損傷後の軸応力評価結果

要素 番号	地上高さ	支持重量 W	軸断面積		軸 応力度 σ	許容 応力度 f_c	断面 裕度 α
			A	A'			
	m	kN	m^2	m^2	N/mm^2	N/mm^2	$1 < \alpha$
1	9~14	18858	108.9	106.5	0.18	9.8	56
2	0~9	76772	151.8	149.4	0.51	9.8	19

第4-6表 主排気筒管理建屋の損傷後の軸応力評価結果

要素 番号	地上高さ	支持重量 W	軸断面積		軸 応力度 σ	許容 応力度 f_c	断面 裕度 α
			A	A'			
	m	kN	m^2	m^2	N/mm^2	N/mm^2	$1 < \alpha$
1	0~4	6040	16.5	15.2	0.40	7.8	20

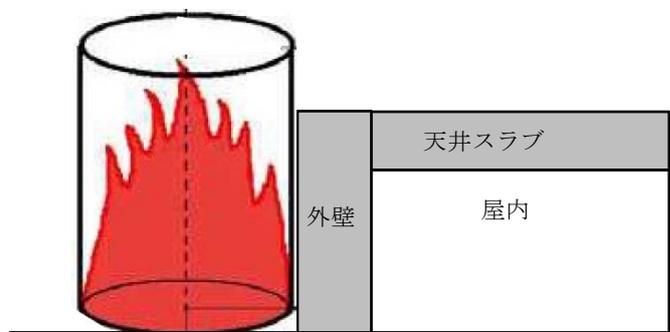
以上より、建物全体の支持機能が損なわれないことを確認した。

d. 天井スラブの評価について

天井スラブの評価は以下の理由により、外壁の評価に包含される。

- i. 火炎長が天井スラブより低い場合、天井スラブに輻射熱を与えないことから熱影響はない。
- ii. 火炎長が天井スラブより高い場合、天井スラブに輻射熱を与えるが、離隔距離が大きくなることから、その輻射熱は外壁に与える輻射熱より小さい。
- iii. 火炎からの離隔距離が等しいとした場合においても、垂直面（外壁）と水平面（天井スラブ）の形態係数は、垂直面の方が大きいことから、その輻射熱は外壁に与える輻射熱より小さい。

天井スラブへの熱影響概念図を第4-3図に示す。



第4-3図 天井スラブへ熱影響概念図

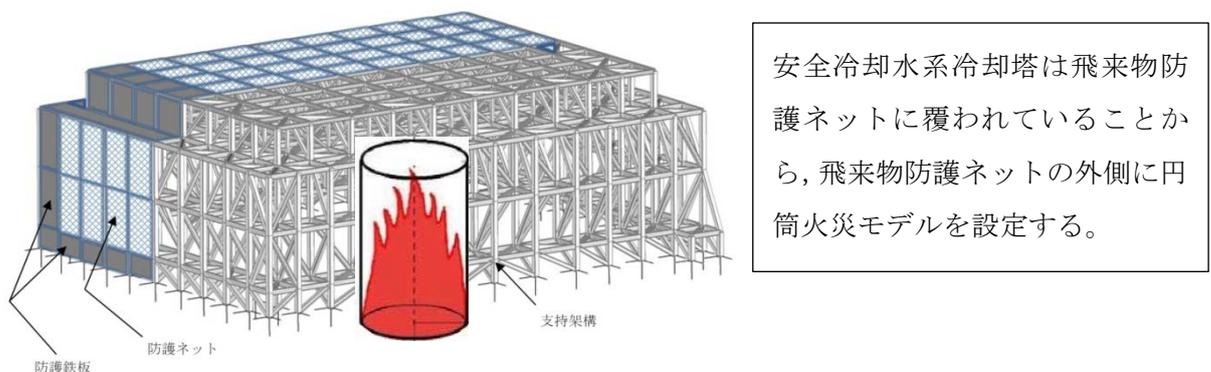
なお、対象建屋の最小スラブ厚は15cm以上であり、第4-2図に示すとおり初期温度(50℃)程度となること、また、上記理由を踏まえると屋内に設置する外部火災防護対象設備の安全機能は損なわれない。

(2) 屋外に設置する外部火災防護施設に対する航空機墜落地点の設定

屋外に設置する外部火災防護施設のうち、使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設用 安全冷却水系冷却塔 A/B，再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B，主排気筒，屋外ダクト，第2非常用ディーゼル発電機用 安全冷却水系冷却塔 A/B については，竜巻防護対策設備（飛来物防護板，飛来物防護ネット）により竜巻からその機能を防護する設計としている。また，竜巻防護対策設備については，防護対象設備に対して波及的影響を与えることのない設計としている。

上記の外部火災防護施設については，外部火災防護対象設備を収容する建屋への評価と同様に，外部火災防護施設の外殻となる竜巻防護対策設備の至近で航空機墜落による火災が発生することを想定し，外部火災防護施設の安全機能を損なわない設計とする。また，竜巻防護対策設備についても，屋外に設置する外部火災防護施設に航空機墜落による火災を起因とした波及的影響を与えることのない設計とする。

航空機墜落地点のイメージ図を第4-4図に示す。



第4-4図 航空機墜落地点のイメージ

(3) 屋外に設置する外部火災防護施設に対する防護設計

火炎から輻射熱を直接受熱する屋外に設置する外部火災防護施設及び金属製の飛来物防護板については、火炎からの輻射熱を受けて高温になることが想定されるため、外部火災防護施設の安全機能を損なわないように、耐火被覆、断熱材等の防護対策を実施する。

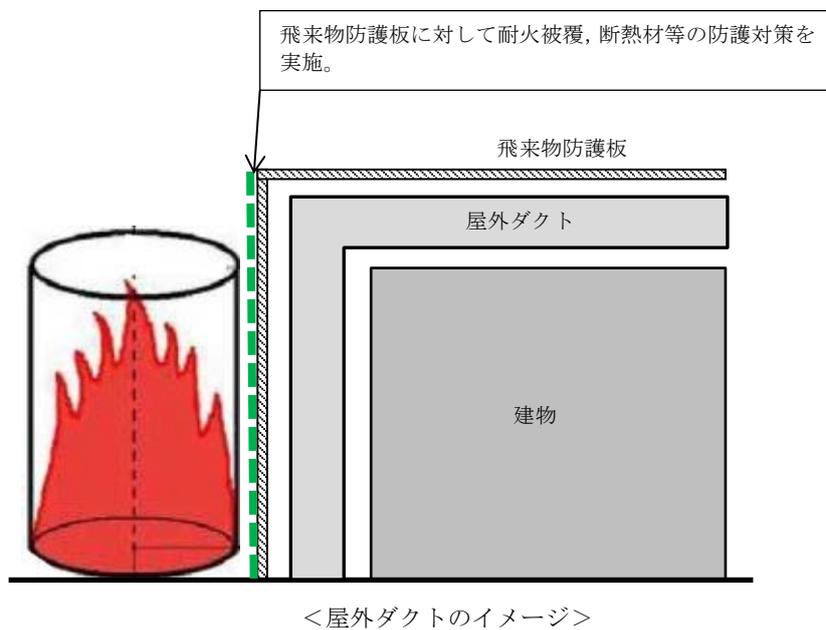
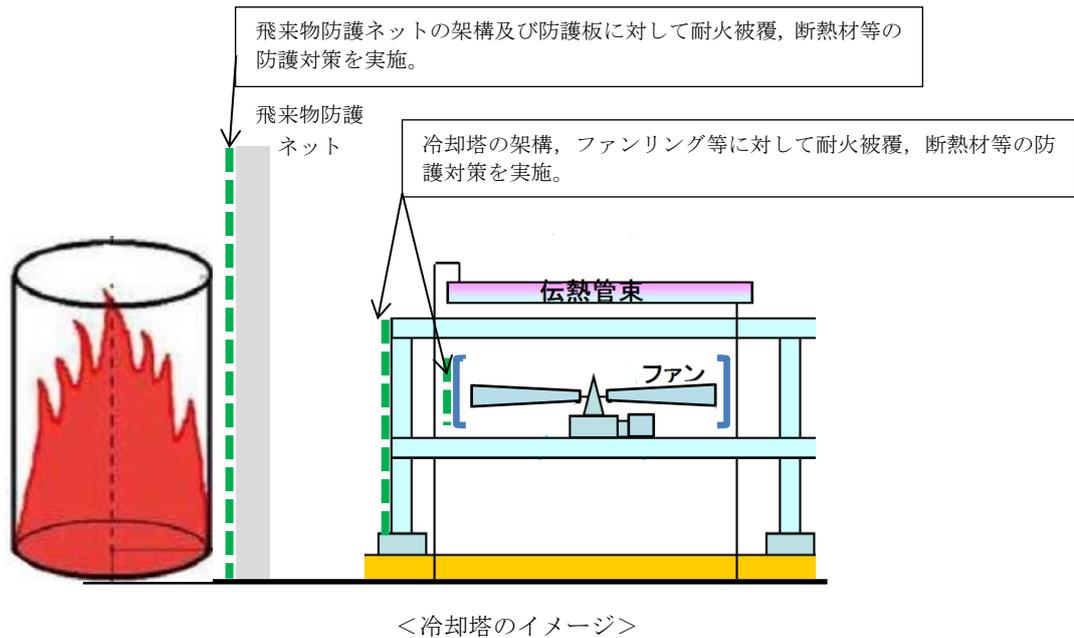
飛来物防護ネットについても安全冷却水系冷却塔に波及的影響を与えることを防止するため、支持構造物である架構に耐火被覆、断熱材等の防護対策を実施する。

また、第2非常用ディーゼル発電機を収容する非常用電源建屋についても、飛来物防護板を設置することから、上記と同様に防護対策を実施する。

防護対策のイメージ図を第4-5図に示す。また、耐火被覆材の基本設計の考え方を添付資料に示す。

上記設計にあたっては、防護対策を踏まえた影響評価を実施する。

屋外に設置する外部火災防護施設については、主要部材である鋼材の強度が維持される温度 $325^{\text{(15)}}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下となり、外部火災防護施設の安全機能を損なわないことを確認する。また、安全冷却水系冷却塔については、冷却水の温度上昇により安全機能を損なわないことを確認する。



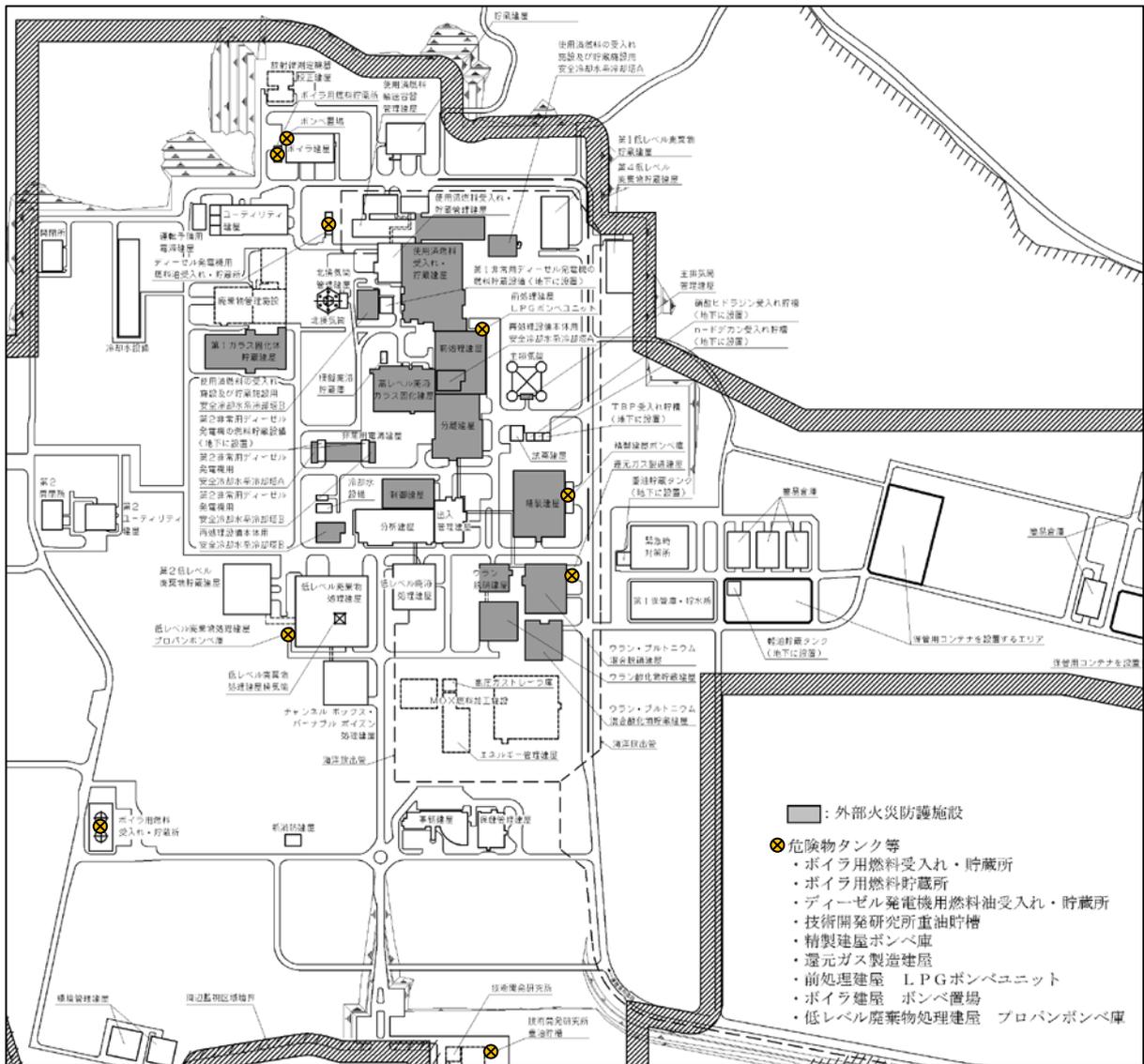
第4-5図 防護対策のイメージ

5. 航空機墜落による火災と敷地内の危険物タンク等の重畳について

敷地内に存在する危険物タンク等の対象を第5-1表に、敷地内の配置を第5-1図に示す。

第5-1表 敷地内に存する危険物タンク等

危険物タンク等	貯蔵物
ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所	重油
ボイラ用燃料貯蔵所	重油
ディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所	重油
技術開発研究所重油貯槽	重油
精製建屋ボンベ庫	水素
還元ガス製造建屋	水素
前処理建屋 LPGボンベユニット	プロパン
ボイラ建屋 ボンベ置場	プロパン
低レベル廃棄物処理建屋 プロパンボンベ庫	プロパン



第5-1図 敷地内に存在する危険物タンク等の配置

(1) 重油タンク火災の影響について

航空機墜落火災に対する重油タンク火災の影響については、発生熱量が大きく外部火災防護施設に与える影響が大きい事象を想定する。発生熱量が一番大きくなる想定として、重油タンクが航空機墜落により火災を発生させることを想定する。第5-2表に、重油を貯蔵する危険物タンク等と外部火災防護施設との離隔距離を示す。

航空機が危険物タンク等に直撃し、危険物および航空機燃料による重畳火災を想定したとしても、外部火災防護施設の間には第5-2表に示す離隔距離があることから、離隔距離が最も短いディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所の重畳火災により、外部火災防護施設である使用済燃料受入れ・貯蔵建屋が受ける輻射強度は 1 kW/m^2 程度であり、外部火災防護施設の直近で航空機墜落による火災を想定した場合の輻射強度 (30 kW/m^2) よりも小さく、外部火災防護施設の直近における航空機墜落による火災評価に包含される。

第5-2表 危険物タンク等の火災の影響評価の対象となる外部火災防護施設

	危険物タンク等	外部火災防護施設	離隔距離 (m)
外部火災防護対象設備を収納する建屋に対する熱影響評価	ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所	ウラン酸化物貯蔵建屋	580
	ボイラ用燃料貯蔵所	使用済燃料輸送容器管理建屋の使用済燃料収納使用済燃料輸送容器保管庫	205
	ディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所	使用済燃料受入れ・貯蔵建屋	100
屋外に設置する外部火災防護施設に対する熱影響評価	ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所	再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B	490
	ボイラ用燃料貯蔵所	使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設用 安全冷却水系冷却塔 B	210
	ディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所	使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設用 安全冷却水系冷却塔 B	100

(2) 可燃性ガスを貯蔵するボンベ庫の爆発の影響について

低レベル廃棄物処理建屋 プロパンボンベ庫及びボイラ建屋 ボンベ置場については、外部火災防護施設からの離隔距離が十分あることを踏まえ、外部火災ガイドを参考とし危険限界距離を算出し、至近の外部火災防護施設までの離隔距離が確保されていることを確認する。

精製建屋ボンベ庫及び還元ガス製造建屋については、外部火災防護施設に隣接しており、危険限界距離の確保では出来ない。そのため、爆風圧により隣接する外部火災防護施設が影響を受けないことを確認する。

前処理建屋 L P G ボンベユニットについては、前処理建屋と一体となっているボンベ庫（壁厚 30 c m，天井スラブ厚 30 c m）に收容されていることから、ボンベ庫外壁外側を航空機墜落地点と想定し、屋内の L P G ボンベユニットへの影響を確認する。上記 4.（1）における外部火災防護施設の建屋外壁の熱影響評価から、ボンベ庫外壁内面への熱影響はないことから、航空機墜落による火災により、L P G ボンベユニットが爆発に至ることはない。

a. 危険限界距離の評価

低レベル廃棄物処理建屋 プロパンボンベ庫及びボイラ建屋 ボンベ置場については、外部火災ガイドを参考とし、[6] 式より危険限界距離を算出し、至近の外部火災防護施設までの離隔距離が確保されていることを確認する。

$$X = 0.04 \sqrt[3]{K \times W} \quad \dots [6]$$

ここで,

X : 危険限界距離 (m)

λ : 換算距離

K : プロパンの定数

W : 設備定数

ボイラ建屋 ボンベ置場及び低レベル廃棄物処理建屋 プロパンボンベ庫の計算条件を第5-3表及び第5-4表に示す。

第5-3表 ボイラ建屋 ボンベ置場の計算条件

項目	記号	数値	単位
換算距離	λ	14.4	$\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$
プロパンの定数	K	328	—
設備定数	W	150	kg

第5-4表 低レベル廃棄物処理建屋 プロパンボンベ庫の計算条件

項目	記号	数値	単位
換算距離	λ	14.4	$\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$
プロパンの定数	K	328	—
設備定数	W	2,975* ¹	kg

* 1 : 1,000 kg 以上のため, 平方根の値を用いる。

評価の結果を第5-5表に示す。評価の結果、爆発源と至近の外部火災防護施設の離隔距離は危険限界距離以上確保されている。

第5-5表 危険限界距離の評価結果

危険物タンク等	至近の外部火災防護施設	危険限界距離 (m)	離隔距離 (m)
低レベル廃棄物処理建屋 プロパンボンベ庫	使用済燃料収納使用済燃料 輸送容器保管庫	22	210
ボイラ建屋 ボンベ置場	再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔B	48	132

b. 爆風圧の評価

精製建屋ボンベ庫及び還元ガス製造建屋に収容する可燃性ガスボンベの爆発によって発生する爆風圧から隣接する建屋外壁の評価対象部にかかる曲げモーメント及びせん断力を算出し、建屋外壁の許容応力以下であることを確認する。

評価においては厳しい評価となるように対象外壁の支持状況に応じて梁部材とみなして評価を実施する。

i. 爆風圧の算出

外部火災ガイドを参考とし [7] 式より換算距離を算出する。

$$X = 0.04\lambda\sqrt[3]{K \times W} \quad \dots [7]$$

ここで、

X : 離隔距離 (m)

λ : 換算距離 ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

K : 定数

W : 設備定数

換算距離は外部火災ガイドが参考としている⁽¹⁴⁾ 指針 から圧力の近似式として表すことができるため、[8]式に代入して爆風圧を算出する。

$$\lambda = 3.2781P^{-0.48551} \quad \dots [8]$$

ここで、

P : 爆風圧 (kgf / cm^2) ただし、 $P \geq 0.65$

ii. 曲げモーメントの算出

算出した爆風圧から梁部材の等分布荷重状態における最大曲げモーメントを[9]式より, また, 許容曲げモーメントを[10]式より算出する。

$$M = \frac{wl^2}{8} \quad \dots[9]$$

ここで,

M : 曲げモーメント (N・m)

w : 爆風圧による荷重 (N/m)

l : 支持スパン (m)

$$M_a = Aftj \quad \dots[10]$$

ここで,

M_a : 許容曲げモーメント (N・m)

A : 鉄筋量 (mm^2)

$f t$: 鉄筋の許容引張応力度 (N/ mm^2)

j : 応力中心間距離 (mm)

iii. せん断力の算出

算出した爆風圧から梁部材の等分布荷重状態における最大せん断力を[11]式より, また, 許容せん断力を [12]式より算出する。

$$Q = \frac{wl}{2} \quad \dots[11]$$

ここで,

Q : せん断力 (N)

w : 爆風圧による荷重 (N/m)

l : 支持スパン (m)

$$Q_a = fsbj \quad \dots [12]$$

ここで,

Q_a : 許容せん断力 (N)

f_s : コンクリート許容せん断応力度 (N/mm²)

b : 梁幅 (mm)

j : 応力中心間距離 (mm)

爆発源の評価に係る計算条件を第5-6表~第5-8表に示す。

iv. 評価結果

評価の結果を第5-9表に示す。爆風圧による荷重は建屋外壁の許容応力未満である。

第5-6表 爆発源の評価条件

危険物タンク等	貯蔵物	設備定数 W (m ³)	水素の 定数K ^(1.4)	至近の建屋	離隔 距離*1 X (m)
精製建屋 ボンベ庫	水素	626	2,860×10 ³	精製建屋	6
還元ガス 製造建屋		280		ウラン・プルトニウム 混合脱硝建屋	5

* 1 : 危険物タンク等の中心から至近の建屋外壁表面までの距離。

第5-7表 評価対象部の条件 (精製建屋)

項目	記号	数値	単位
スパン	<i>l</i>	8.2	m
梁幅	<i>b</i>	1.0	m
配筋	—	S D345 D38@200	—
外壁厚さ	—	1,200	mm
鉄筋量	<i>A</i>	5,700	mm ²
鉄筋の許容引張応力度	<i>f_t</i>	345	N/mm ²
応力中心間距離	<i>j</i>	945	mm
コンクリート許容 せん断応力度	<i>f_s</i>	1.18	N/mm ²

第5-8表 評価対象部の条件（ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋）

項目	記号	数値	単位
スパン	l	8.0	m
梁幅	b	1.0	m
配筋	—	S D345 D38@200	—
外壁厚さ	—	1,200	mm
鉄筋量	A	5,700	mm ²
鉄筋の許容引張応力度	f_t	345	N/mm ²
応力中心間距離	j	945	mm
コンクリート許容せん断応力度	f_s	1.18	N/mm ²

第5-9表 爆風圧に対する評価結果

危険物タンク等	至近の建屋	爆風圧による荷重		許容応力	
		曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)
精製建屋 ボンベ庫	精製建屋	1,200	580	1,800	1,100
還元ガス 製造建屋	ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋	950	480	1,800	1,100

6. 二次的影響評価

二次的影響として、火災に伴い発生するばい煙及び有毒ガスを抽出し、その上で、安全機能を有する施設のうち、外気を取り込むことにより、外部火災防護対象設備の安全機能が損なわれるおそれがある設備を第6-1表のとおり選定する。

ばい煙及び有毒ガスによる影響については、外部火災ガイドを参考として、ばい煙及び有毒ガスの侵入を防止するため、適切な対策を講ずることで外部火災防護対象設備の安全機能を損なわない設計とする。

6.1 ばい煙の影響

(1) 換気空調系統

外部火災防護施設の各建屋の換気設備の給気系は、粒子フィルタ又は中性能フィルタにより、ばい煙の侵入を防止することで、外部火災防護対象設備の安全機能を損なわない設計とする。

制御建屋の中央制御室は、運転員の作業環境を確保するため、制御建屋中央制御室換気設備の外気取入口に高性能粒子フィルタを設置するとともに、制御建屋中央制御室換気設備の外気との連絡口を遮断し、制御建屋の中央制御室内空気を再循環する措置を講ずる設計とする。また、使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の制御室については、制御建屋の中央制御室にて使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の状態を監視できる設計とし、必要に応じて制御建屋の中央制御室への運転員の退避の措置を講ずるものとする。

さらに、制御建屋の中央制御室については、外気との連絡口を遮断することによる中央制御室内に滞在する運転員の環境悪化防止のため、

酸素濃度及び炭酸ガス濃度の影響評価を実施し、居住性に影響を及ぼさないことを確認する。評価結果を第6-2及び第6-3表に、制御建屋中央制御室換気設備系統概要図を第6-1図に示す。

(2) ディーゼル発電機

外部火災防護対象設備の第1非常用ディーゼル発電機については、中性能フィルタ及び第2非常用ディーゼル発電機については、ステンレス製ワイヤーネットにより、ばい煙の侵入を防止することで、安全機能を損なわない設計とする。

(3) 安全圧縮空気系の空気圧縮機

外部火災防護対象設備の空気圧縮機の吸気側については、中性能フィルタにより、ばい煙の侵入を防止することで、安全機能を損なわない設計とする。

(4) ガラス固化体貯蔵設備の収納管及び通風管

ガラス固化体貯蔵設備は、間接自然空冷貯蔵方式により、貯蔵するガラス固化体からの崩壊熱を利用して冷却空気入口シャフトから外気を取り入れ、外部火災防護対象設備である収納管と通風管で形成する円環流路を上昇しながらガラス固化体を冷却し、冷却空気出口シャフトより排出している。

外気とともに冷却空気の流路にばい煙が流入するが、流路の閉塞を防止する構造とし、安全機能を損なわない設計とする。

6.2 有毒ガスの影響

制御建屋の中央制御室は、運転員の作業環境を確保するため、有毒ガスの侵入を防止できるよう、制御建屋中央制御室換気設備の外気との連絡口を遮断し、制御建屋の中央制御室内空気を再循環する措置を講ずる設計とする。また、使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の制御室については、制御建屋の中央制御室にて使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設の状態を監視できる設計とし、必要に応じて制御建屋の中央制御室への運転員の退避の措置を講ずるものとする。

さらに、制御建屋の中央制御室については、外気との連絡口を遮断することによる中央制御室内に滞在する運転員の環境悪化防止のため、酸素濃度及び炭酸ガス濃度の影響評価を実施し、居住性に影響を及ぼさないことを確認する。評価結果を第6-2及び第6-3表に、制御建屋中央制御室換気設備系統概要図を第6-1図に示す。

第6-1表 ばい煙及び有毒ガスによる影響評価の対象
となる設備

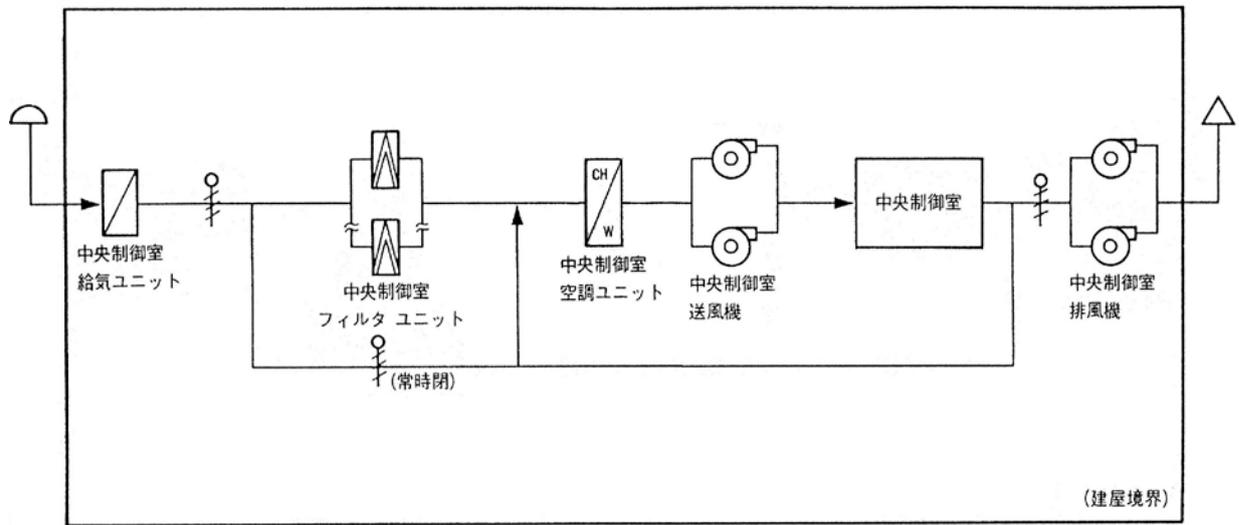
	分類	影響評価対象設備
機器への 影響	外気を取り込む 空調系統	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外部火災防護施設の各建屋の 建屋換気設備 ・ 制御建屋中央制御室換気設備
	外気を取り込む 機器	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第1非常用ディーゼル発電機 ・ 第2非常用ディーゼル発電機 ・ 安全圧縮空気系の空気圧縮機 ・ ガラス固化体貯蔵設備

第6-2表 制御建屋 中央制御室内空気の酸素濃度評価結果

時間	12時間	24時間	36時間	93時間
酸素濃度	20.6%	20.2%	19.8%	18.0%

第6-3表 制御建屋 中央制御室内空気の炭酸ガス濃度評価結果

時間	6時間	12時間	18時間	21時間
炭酸ガス 濃度	0.16%	0.30%	0.43%	0.49%



第 6 - 1 図 制御建屋中央制御室換気設備系統概要

参考文献

- (1) John.W.R.Taylor. ed. Jane's All the World's Aircraft 1987-88. Jane's Publishing Company Limited, 1987.
- (2) Paul.Jackson. ed. Jane's All the World's Aircraft 1997-98. Jane's Information Group, 1997.
- (3) NASA. "Analysis of NASA JP-4 Fire Tests Data and Development of a Simple Fire Model". NASA Contractor Report. 1980, CR-159209.
- (4) Paul, Jackson. Jane's All The World's Aircraft: Development & Production 2017-2018. HIS Markit, 2017.
- (5) 国土交通省航空局. 飛行方式設定基準. 2006.
- (6) 原子力規制委員会. 航空機落下事故に関するデータ. 2016, NTEC-2016-2002.
- (7) 国土交通省. 航空輸送統計調査 年報 (平成 25 年-30 年).
- (8) 国土交通省. 運輸安全委員会. 報告書検索結果.
<http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/air-kensaku-list.php?sort=asc&by=o> (参照 2018-05-10)
- (9) IAEA. IAEA 安全基準 IAEA 放射性物質安全輸送規則のための助言文書 (No. TS-G-1. 1). 改訂 1, 2008.
- (10) 日本火災学会編. 火災便覧 新版, 共立出版, 1984.
- (11) 日本機械学会. 伝熱工学資料 改訂第 4 版. 1986.
- (12) 日本建築学会. 原子炉建屋構造設計指針 同解説. 1988.
- (13) 安部武雄ほか. "高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究". 日本建築学会構造系論文集 第515号. 日本建築学会, 1999.

- (14) 消防庁特殊災害室. 石油コンビナートの防災アセスメント指針. 2013.
- (15) 財団法人日本建築センター. 建築火災のメカニズムと火災安全設計
- (16) 世界航空年鑑2012-2013
- (17) ボーイング社ホームページ資料. 767 Airplane Characteristics for Airport Planning.

耐火被覆の基本設計の考え方

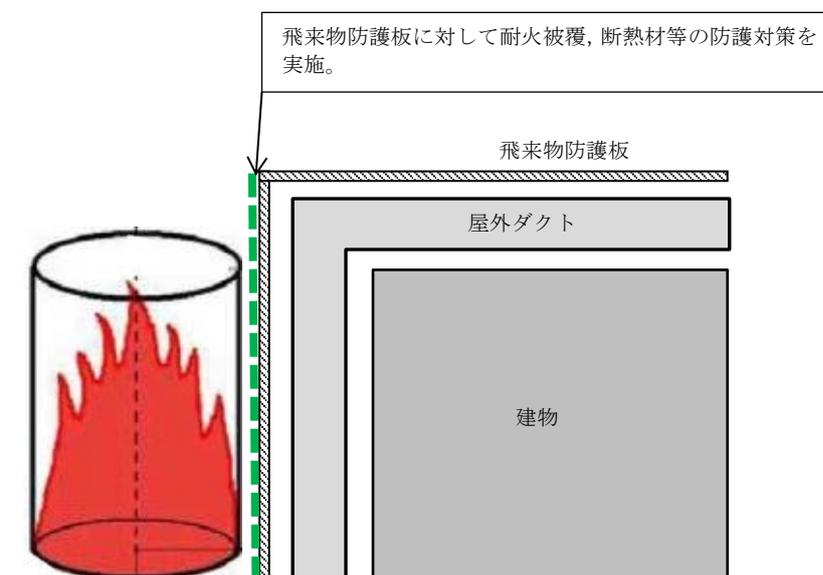
1. はじめに

屋外の外部火災防護施設及び竜巻対策設備への対策として耐火被覆等の対策を行う。耐火被覆材は建築基準法及び同法施行令に基づく耐火構造の認定を取得している製品の採用を検討している。

航空機墜落による火災に対して、耐火被覆材による対策の有効性について以下のとおり確認した。

2. 航空機墜落による火災の想定について

令和元年8月21日に開催された令和元年度第23回原子力規制委員会において示された方針を踏まえ、外部火災防護施設の外殻となる竜巻防護対策設備の至近で航空機墜落による火災が発生することを想定し、火炎から輻射熱を直接受熱する飛来物防護板（SUS製）を代表例として「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」を参考に火災による影響を確認した。



3. 飛来物防護板の温度評価について

外部火災ガイドを参考として輻射強度（約 30 k W/m^2 ）を算出し輻射強度に対する鋼材の熱伝導を熱移動の経路として設定し(1)から(3)に基づき、代表として主排気筒及び屋外ダクトに対して設置する飛来物防護板（SUS製）の温度を確認した。

評価の結果を図1に示す。評価対象の温度は、1400秒で 960°C まで温度上昇することとなった。

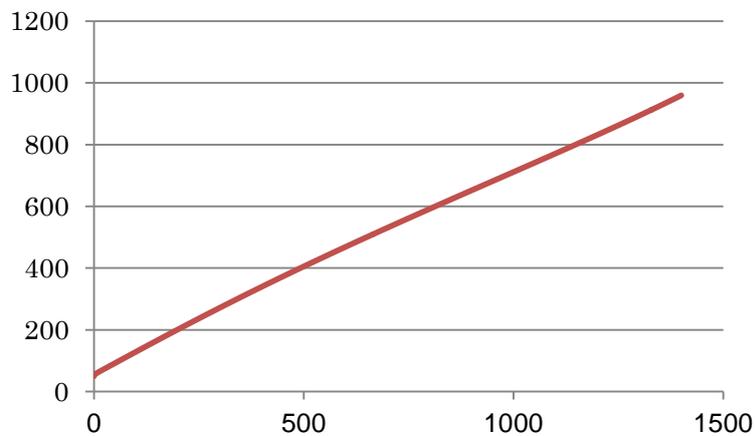


図1：飛来物防護板の温度評価結果

(1) 火炎から鋼材への輻射

$$Q_{r1} = E \cdot A$$

A：防護板面積 (m^2) (= 1)

(2) 鋼材温度の時間変化

$$(n=1 \text{ 外側}) : \rho c V \frac{d}{dt} T_{c1} = Q_{r1} - Q_c(T_{c1})$$

$$(n=2 \text{ から } n-1 \text{ 鋼材内}) : \rho c V \frac{d}{dt} T_{cn}(t) = Q_c(T_{cn-1}) - Q_c(T_{cn})$$

$$(n=n \text{ 内側}) : \rho c V \frac{d}{dt} T_{cn}(t) = Q_c(T_{cn-1})$$

ρ ：鋼材密度 (kg/m^3)

c：鋼材比熱 (J/kgK)

V：鋼材体積 (m^3)

n : 節点番号

$T_{cn}(t)$: 節点nでの鋼材温度 (°C)

$Q_c(T_{cn})$: 鋼材内の熱伝導 (W)

ステンレス鋼の物性値は、伝熱工学資料改訂第5版の SUS304 の物性値より、近似式を作成し設定した。

(3) 鋼材内の熱伝導

$$Q_c(T_{cn}) = \frac{\lambda_c}{L} \cdot A \cdot (T_{cn} - T_{cn+1})$$

λ_c : 鋼材の熱伝達率 (W/mK)

L : 鋼材の区分厚さ (m)

3. 耐火被覆材採用の見通し

2. で確認した飛来物防護板の温度確認結果より、約 270 秒で飛来物防護板表面温度は 250°C に達する。耐火被覆材は 250°C 以降で発泡が始まり、熱伝導率が低下する。耐火被覆材を表面に被覆することで、270 秒以降の温度上昇を抑えることが期待できる。

温度上昇を抑制するために必要な被覆厚さを検討し、外部火災防護施設の安全機能を損なわないために耐火被覆を行う。

4. 安全上重要な施設に対する許容温度の設定

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、文献⁽¹⁾⁽²⁾によると、鋼材の高温時における有効降伏応力度は以下の式により近似される。一般的な鋼材の降伏応力度については約 450°C で長期許容応力度相当となる常温時降伏応力度の 2/3 の値となる。

$$\sigma_y(T) = \begin{cases} F & T \leq 325 \\ F \cdot \left(\frac{700 - T}{375}\right) & 325 < T < 700 \end{cases}$$

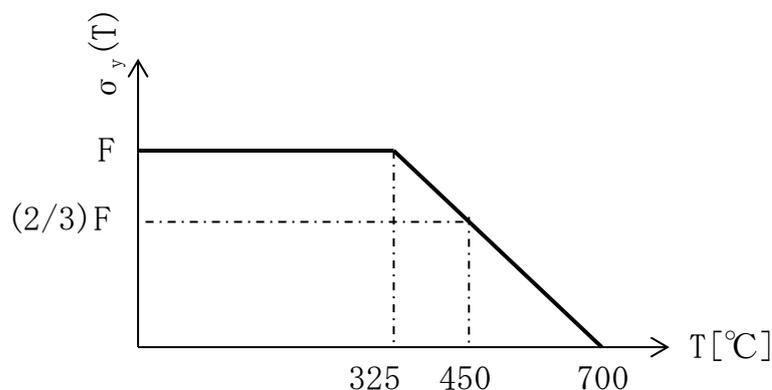


図 2 : 鋼材の高温時の有効降伏応力度

ただし、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℃としていること、また、文献⁽¹⁾⁽²⁾では 325℃以下であれば、強度が常温時と変わらないとしていることから、安全上重要な施設については厳しい評価となるよう、鋼材の強度が常温時と変わらない 325℃を許容温度として設定した。

5. 参考文献

- (1) 2001 年版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説，国土交通省住宅局建築指導課他
- (2) 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