


【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外外火 05 R0
提出年月日	令和 3 年 2 月 8 日

外部火災防護設計の基本方針に関する補足説明資料
【耐火被覆の考え方について】

目 次

1.	はじめに	1
2.	耐火塗料とは	1
3.	耐火被覆の設計に関する検討について	2
4.	設計結果	5
5.	参考文献	8

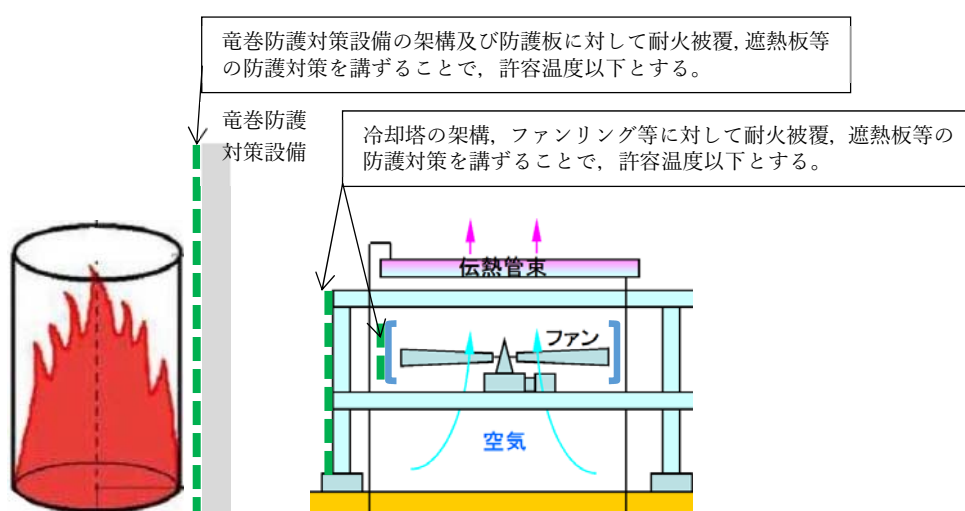
 : 商業機密の観点から公開できない箇所

1. はじめに

事業変更許可申請書にて、屋外に設置する外部火災防護対象施設は、外部火災の影響により安全機能を損なわない設計とすること、また竜巻防護対策設備は、外部火災の影響に対し、外部火災防護対象施設に波及的影響を及ぼすことのない設計とすることを記載している。

外部火災として考慮すべき火災のうち航空機墜落による火災は、その火炎から受ける輻射強度が強いこと、屋外に設置する外部火災防護対象施設までの距離が短いことにより、屋外に設置する外部火災防護対象施設に対し過酷な火災事象となる。そのため、耐火被覆、遮熱板等の防護対策を講ずることとしている。

航空機墜落による火災に対する防護対策のうち耐火被覆としては、設備の耐震性に与える影響や施工性の観点から、メリットが大きい耐火塗料を採用することとしているが、先行炉において採用実績がないことから、耐火塗料の塗装範囲の考え方及び耐火塗料塗装後の外部火災防護対象施設等に対する温度評価の考え方について説明する。なお、本資料では、第1回申請対象施設である安全冷却水B冷却塔（以下「冷却塔」という）及び冷却塔に波及的影響を及ぼし得る竜巻防護対策設備を代表に、耐火被覆の妥当性について説明する。



第1図 冷却塔及び竜巻防護対策設備への防護対策のイメージ

2. 耐火塗料とは

耐火塗料は、鋼材等を対象とした耐火被覆材の一つである。耐火塗料は、火災時の温度上昇に伴い熱膨張（発泡）し、熱伝導性の低い断熱層を形成する。この断熱層が耐火被覆材として火災による加熱から鋼材等を防護する働

きをする。

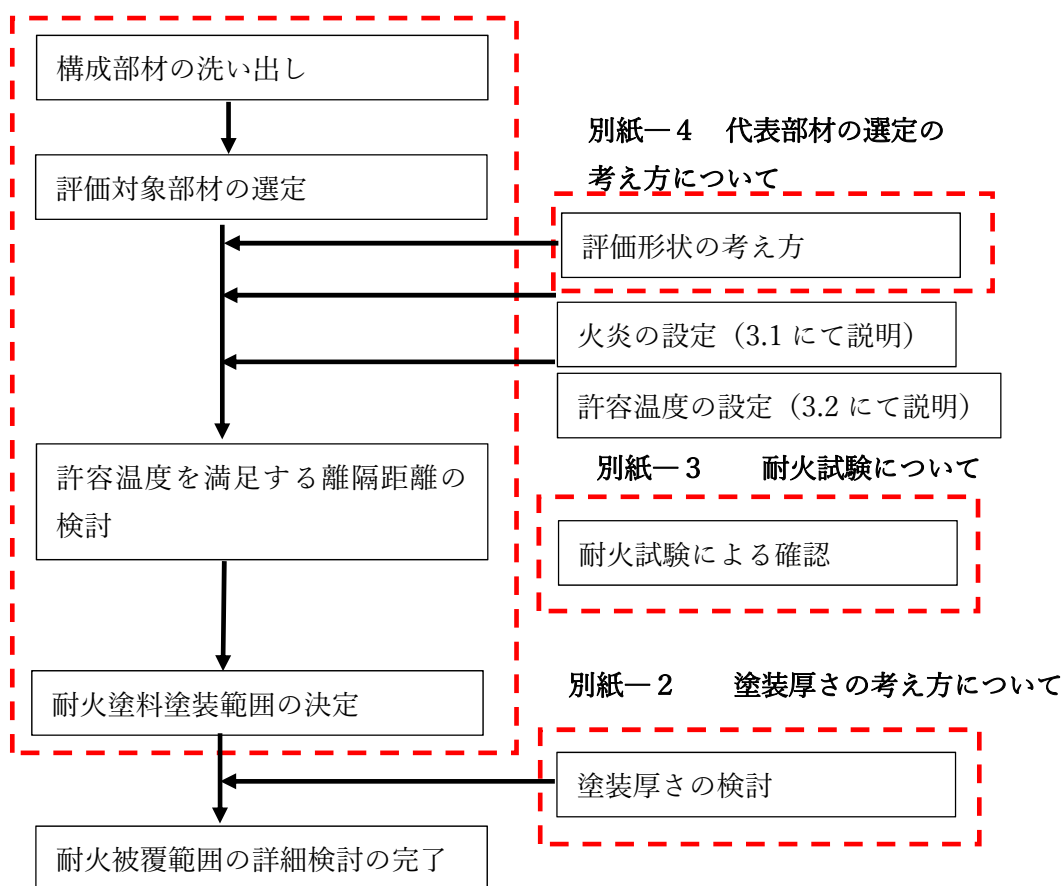
3. 耐火被覆の設計に関する検討について

耐火被覆の妥当性検討に関する検討フローを以下に示す。

耐火塗料の塗装範囲の考え方、塗装厚さの考え方、耐火試験及び代表部材の選定については、詳細を別紙にて説明することとし、本資料においては、各検討における前提条件である火炎の設定、許容温度の考え方及び設計の結果について示す。

各詳細検討の概要を第1表に示す。

別紙-1 耐火塗料の塗装範囲の考え方について



第2図 耐火被覆の検討フロー

第1表 防護対策の妥当性を示すために行った検討の概要及び対応する別紙

別紙	資料名	検討内容の概要
1	耐火塗料の塗装範囲の考え方	航空機墜落火災を想定した場合に、鋼材の温度が許容温度以下となる離隔距離（以下「必要離隔距離」という。）を算出する。必要離隔距離を確保できない鋼材が耐火塗料の塗装対象となる。
2	塗装厚さの妥当性について	別紙－1にて抽出された塗装対象に対し、必要な塗装厚さを設定する。 耐火塗料を塗装した鋼材の温度評価においては、耐火塗料を物性が既知の断熱材に置き換える必要があるため、その設定の考え方を説明する。その上で鋼材温度が許容温度以下となる耐火塗料の塗装厚さを解析により求める。
3	耐火試験について	別紙－2にて示した鋼材の温度評価と同等の条件を模擬し、耐火試験を実施する。 これによって得られた鋼材の温度測定結果と、解析による温度評価結果を比較し、別紙－2の評価結果が妥当であることを確認する。
4	必要離隔距離の算出の対象とする代表部材の選定について	必要離隔距離を算出する際、保守的な結果が得られるよう、温度上昇が最大となる部材の形状を選定する。屋外の外部火災防護対象施設及び竜巻防護対策設備を構成する各部材の調査結果から、熱影響が最も大きい形状として平板を代表として選定する。

3. 1 火炎の設定

添付資料「VI-1-1-1-4-6 外部火災防護における評価条件及び評価結果」にて示したとおり、燃焼時間が最も長く熱影響が厳しいF-16を航空機墜落による火災の対象航空機とする。航空機墜落による火災源の設定を第1表に示す。

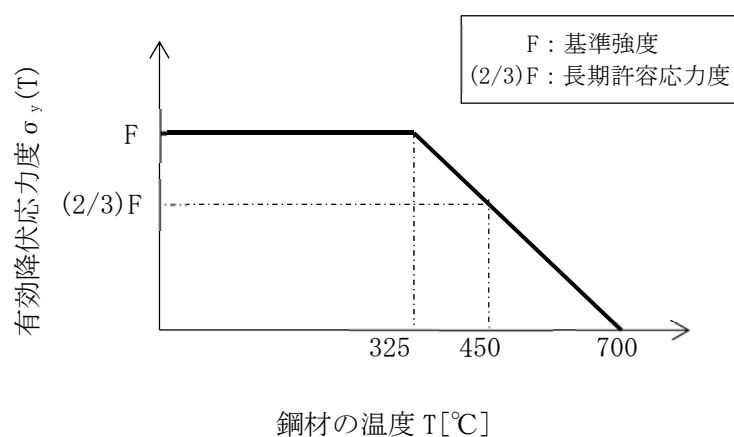
第1表 航空機墜落による火災源の設定

	設定条件
対象航空機	F-16
燃焼面積[m ²]	約 90
燃料積載量[m ³]	9.8
燃焼速度[m/s]	8.0×10^{-5}
燃焼時間[s]	約 1,400

3. 2 鋼材の許容温度設定について

一般的に、鋼材は温度上昇に伴い強度が低下するが、その高温強度に対する公的規格は存在していない。一方、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、第3図のように表される。

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



第3図 鋼材の高温時の有効降伏応力度

建築基準法施行令によれば、鋼材の長期許容応力度は鋼材の基準強度の2/3と定められており、鋼材の有効降伏応力度がこの長期許容応力度を確保していれば、長期荷重に対する構造安全性が維持可能となる。

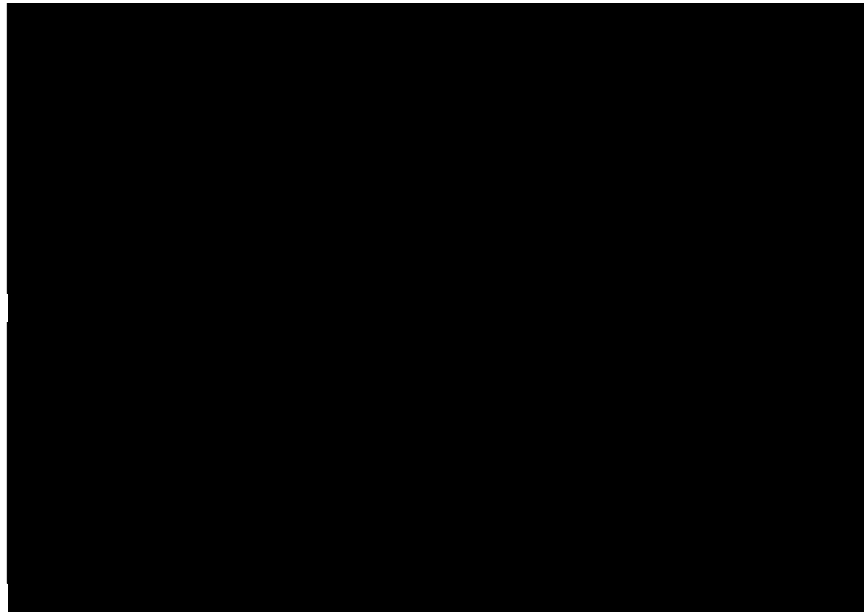
第3図に示すとおり、鋼材が高温となりその有効降伏応力度が長期許容応力度相当まで低下する温度は450℃となることから、航空機墜落火災により直接輻射を受け、竜巻防護対策設備の温度が上昇したとしても、この温度が450℃以下であれば、竜巻防護対策設備の構造安全性が維持可能であり、安全上重要な施設である冷却塔に波及的影響を与えることはないと考えられる。

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。また、安全上重要な施設以外の評価対象である竜巻防護対策設備については、構造物が崩壊して安全上重要な施設に波及的影響を与えない設計とするため許容温度を450℃とする。


4. 設計結果

「3. 耐火被覆の設計に関する検討について」に基づき、冷却塔および竜巻防護対策設備について、検討した結果として、耐火被膜の施工範囲を第4図、第5図に示す。

また、安全上重要な施設である冷却塔の主要な部材に対し、許容温度を満足するために必要な耐火塗料の塗装厚さは3mm、竜巻防護対策に対する耐火塗料の塗装厚さは2mmとなった。

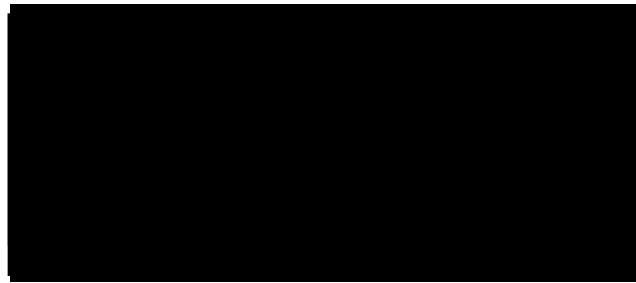


屋根面

 : 耐火塗料の塗装範囲

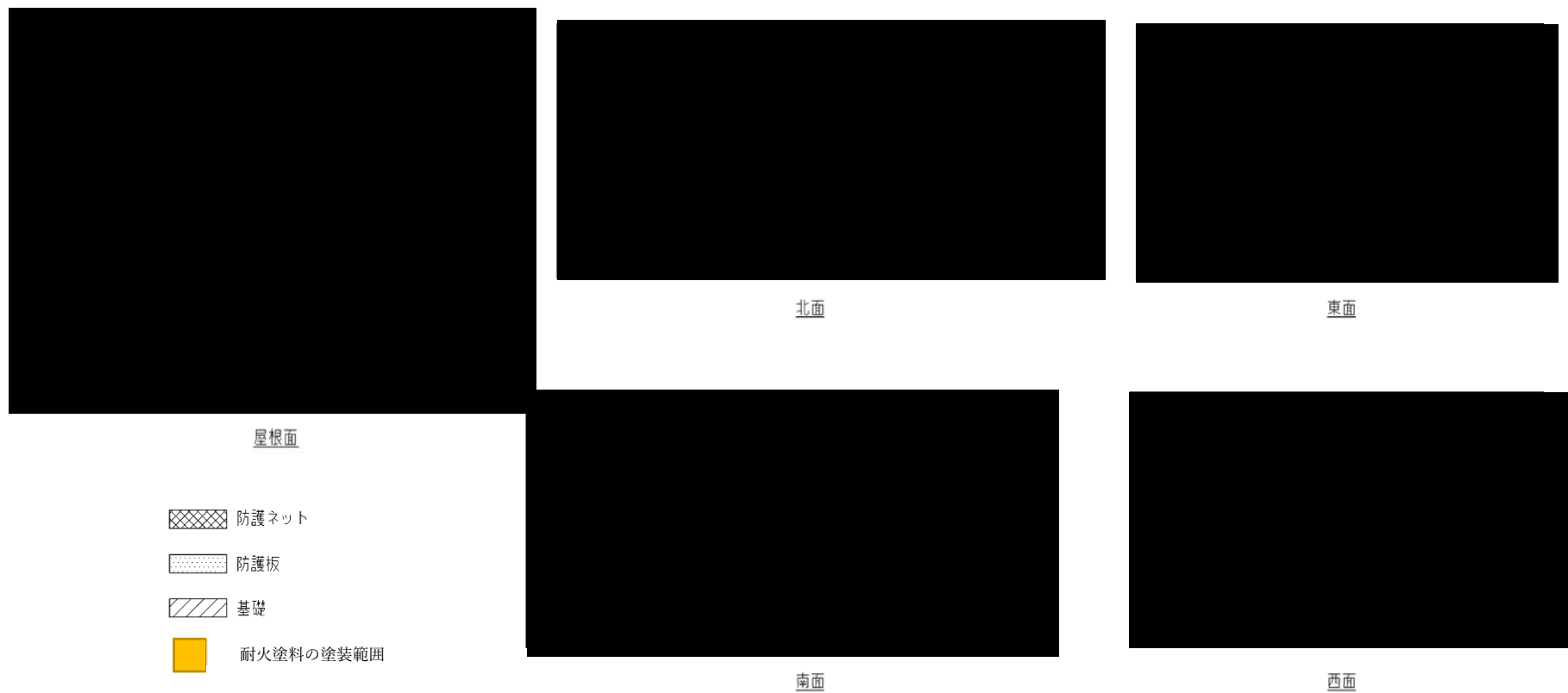


南面



東面

第4図 再処理設備本体用 安全冷却水B冷却塔の耐火被膜塗装範囲



第5図 竜巻防護対策設備の耐火被膜塗装

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

令和3年2月12日 RO

【耐火塗料の塗装範囲の考え方について】

別紙-1

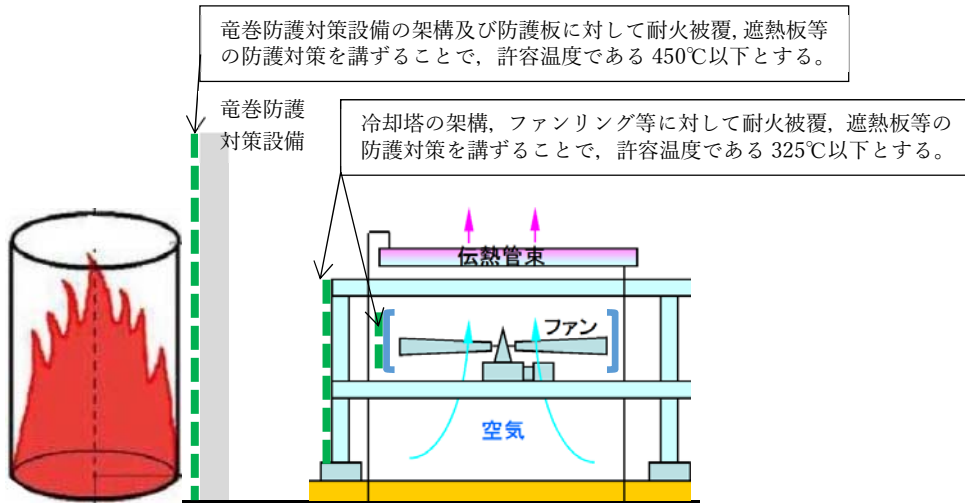
目 次

1.	はじめに	1
2.	評価部材の選定について.....	2
3.	評価対象形状の選定について.....	2
4.	必要離隔距離の算出条件.....	2
5.	必要離隔距離の算出.....	2
6.	必要離隔距離の算出結果.....	6
7.	耐火塗料の塗装範囲について.....	7

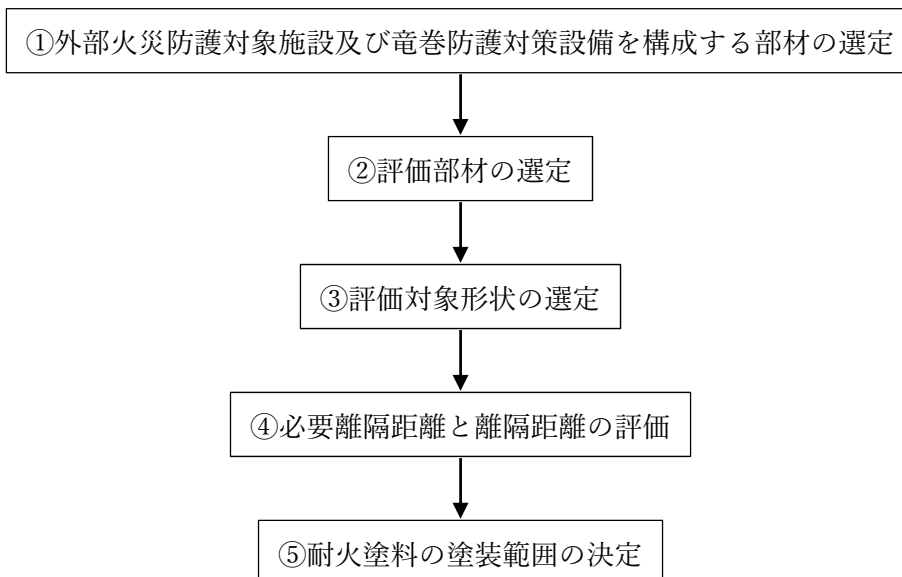
1. はじめに

本資料は、航空機墜落による火災時に火炎からの輻射を直接受熱し、高温となるおそれのある冷却塔及び竜巻防護対策設備を構成する部材に対し、その材質及び厚さ毎に許容温度を下回る離隔距離（以下「必要離隔距離」という。）を算出し、外部火災の防護対策として実施する耐火塗料の塗装範囲の妥当性について説明するものである。

耐火塗料の塗装範囲の検討の流れを第2図に示す。



第1図 冷却塔及び竜巻防護対策設備への防護対策のイメージ



第2図 検討の流れ

2. 評価部材の選定について

冷却塔及び竜巻防護対策設備を構成する部材のうち、火炎からの輻射を直接受ける部材を選定する。電動機、減速機、ファンブレード等の遮熱板等により輻射を直接受けない部材は評価対象部材としない。

3. 評価対象形状の選定について

冷却塔及び竜巻防護対策設備を構成する部材のうち、輻射を受ける部材に対して、必要離隔距離を算出する。

必要離隔距離を算出する際、部材の形状は評価に影響を与える評価条件の一つである。安全冷却水B冷却塔及びその外殻となる竜巻防護対策設備を構成する部材には、平板、中空円管、中空角管、H鋼等の様々な形状があるが、受熱面と放熱面の面積比率、部材の熱容量を考慮した場合、部材の材料及び厚さが同じであれば、平板が最も厳しい熱影響（別紙—4参照）を受けることを確認している。したがって、必要離隔距離を算出する際は平板形状にて算出する。

4. 必要離隔距離の算出条件

第1表及び第2表に必要離隔距離の算出に必要な算出条件を示す。

第1表 輻射強度算出条件

項目	記号	数値	備考
輻射発散度	Rf	58,000 [W/m ²]	「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」より「ガソリン・ナフサ」の値を使用
輻射強度（太陽光）	Es	400 [W/m ²]	
低減率	ϵ	1	
燃焼面積	A_b	90 [m ²]	

第2表 平板温度算出条件

項目	記号	数値	備考
対象鋼板の初期温度	T_{c0}	50 [°C]	
周囲雰囲気温度	T_a	40 [°C]	
燃焼時間	t	1,400 [s]	

5. 必要離隔距離の算出

航空機墜落による火災時の輻射強度を考慮し、部材の材質及び厚さ毎に一次元非定常熱伝導計算を行い、許容温度を下回る離隔距離を算出する。

(1) 輻射強度

輻射強度は火炎から対象物までの距離が広がると減衰する。輻射強度は、外部火災影響評価ガイドより以下のように設定する。

(形態係数の算出)

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

$$m = 3$$

$$n = L/R$$

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

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

ここで、

ϕ : 形態係数 ($L=R$ の場合は0.5)

L : 離隔距離 [m] ($=R+\alpha$ α : 火炎からの距離 [m])

R : 燃焼半径 [m] ($=\sqrt{A_b/\pi}$ A_b : 燃焼面積)

(輻射強度の算出)

$$E = Rf' \cdot \phi + Es$$

$$Rf' = Rf * \varepsilon$$

ここで、

E : 輻射強度 [W/m²]

Rf' : 低減率を考慮した輻射発散度 [W/m²]

ϕ : 形態係数

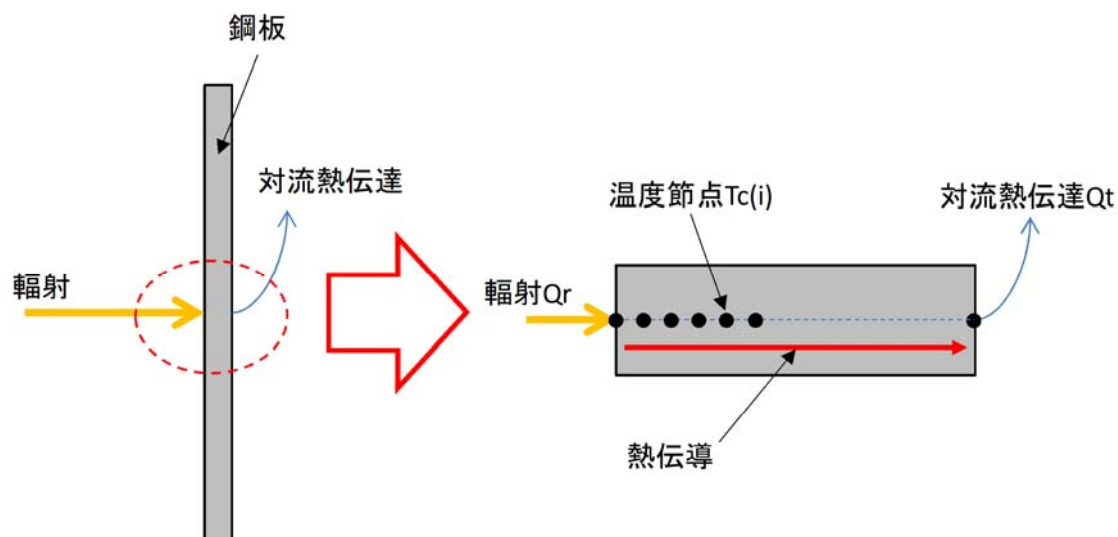
Es : 輻射強度 (太陽光) [W/m²]

Rf : 輻射発散度 [W/m²]

ε : 低減率

(2) 輻射を受ける平板の温度

計算モデルを第3図に示す。輻射を受ける平板の温度は、1次元熱伝導として非定常計算する。区分区間毎に温度節点を設定する。区分区間は温度一様とし時間変化をステップ計算にて計算する。時間変化は差分式（陽解法）にて計算する。



第3図 計算モデル

(輻射)

$$Qr = E \cdot A$$

(対流熱伝達)

$$Qt = h \cdot A \cdot (Tc(N) - Ta)$$

(平板の温度)

i=1 (表面温度)

$$Q = Qr - \frac{\lambda_c}{L_c} \cdot A \cdot (Tc(1) - Tc(2))$$

$$V = \frac{L_c}{2} \cdot A$$

$$Tc(1)_{new} = Tc(1) + dt \cdot \frac{Q}{\rho_c \cdot C_c \cdot V}$$

i=2~N-1 (内部温度)

$$Q = \frac{\lambda_c}{L_c} \cdot A \cdot (Tc(i-1) - Tc(i)) - \frac{\lambda_c}{L_c} \cdot A \cdot (Tc(i) - Tc(i+1))$$

$$V = L_c \cdot A$$

$$Tc(i)_{new} = Tc(i) + dt \cdot \frac{Q}{\rho_c \cdot C_c \cdot V}$$

i=N (裏面温度)

$$Q = \frac{\lambda_c}{L_c} \cdot A \cdot (Tc(N-1) - Tc(N)) - Qt$$

$$V = \frac{L_c}{2} \cdot A$$

$$Tc(N)_{new} = Tc(N) + dt \cdot \frac{Q}{\rho_c \cdot C_c \cdot V}$$

ここで,

Qr : 火炎からの輻射熱伝達 [W]

E : 輻射強度 [W/m²]

A : 対象鋼板の面積 [m²] (=1 [m²] 単位面積)

Qt : 裏面での対流熱伝達 [W]

h : 熱伝達係数 [W/(m²·K)] (=12.5 [W/(m²·K)])

$Tc(i)$: 平板の温度 [°C] 節点 i, 節点数 N

Ta : 周囲雰囲気温度 [°C] (=40 [°C])

Q : 区分区間への熱量 [W]

λ_c : 鋼板の熱伝導率 [W/(m·K)]

ρ_c : 鋼板の密度 [kg/m³]

C_c : 鋼板の比熱 [J/(kg·K)]

L_c : 区分区間 [m] (=板厚厚さ/ (N-1))

V : 区分区間の体積 [m³]

$Tc(i)_{new}$: 時間経過後の平板の温度 [°C] 節点 i, 節点数 N

dt : ステップ間隔 [s] (=0.01 [s])

6. 必要離隔距離の算出結果

安全上重要な施設である安全冷却水B冷却塔及び竜巻防護対策設備を構成する部材を考慮し、選出した部材に対して算出した必要離隔距離の結果を第3表に示す。

第3表 部材毎の必要離隔距離

材料	板厚 (mm)	必要離隔距離 (m)	
		安全上重要な施設	竜巻防護対策設備
炭素鋼	36	1	0
	28	2	0
	22	3	1
	19	5	1
	15	7	3
	14	7	3
	13	8	4
	12	9	4
	11	9	5
	10	—	6
	9	11	7
	8	12	7
	6.5	14	9
	6.4	14	9
	6	15	10
	4.5	18	12
	3.91	19	13
	3.9	19	13
	3.2	21	15
	2.3	23	17
2.11	23	17	
1.2	25	19	
ステンレス鋼	20	4	1
	16	6	2
	12	8	4
	9	11	6

7. 耐火塗料の塗装範囲について

再処理設備本体用 安全冷却水 B 冷却塔及びその外殻となる竜巻防護対策設備を構成する部材を抽出した上で、材料、部材厚さ及び形状を整理し、第 3 表に示した必要離隔距離を適用した結果を第 4 表に示す。

第 4 表の必要離隔距離の評価結果と再処理設備本体用 安全冷却水 B 冷却塔及びその外殻となる竜巻防護対策設備を構成する部材の離隔距離を比較し、必要離隔距離を確保できない鋼材を耐火塗料の塗装対象とする。耐火塗料の塗装範囲を第 4 図及び第 5 図に示す。

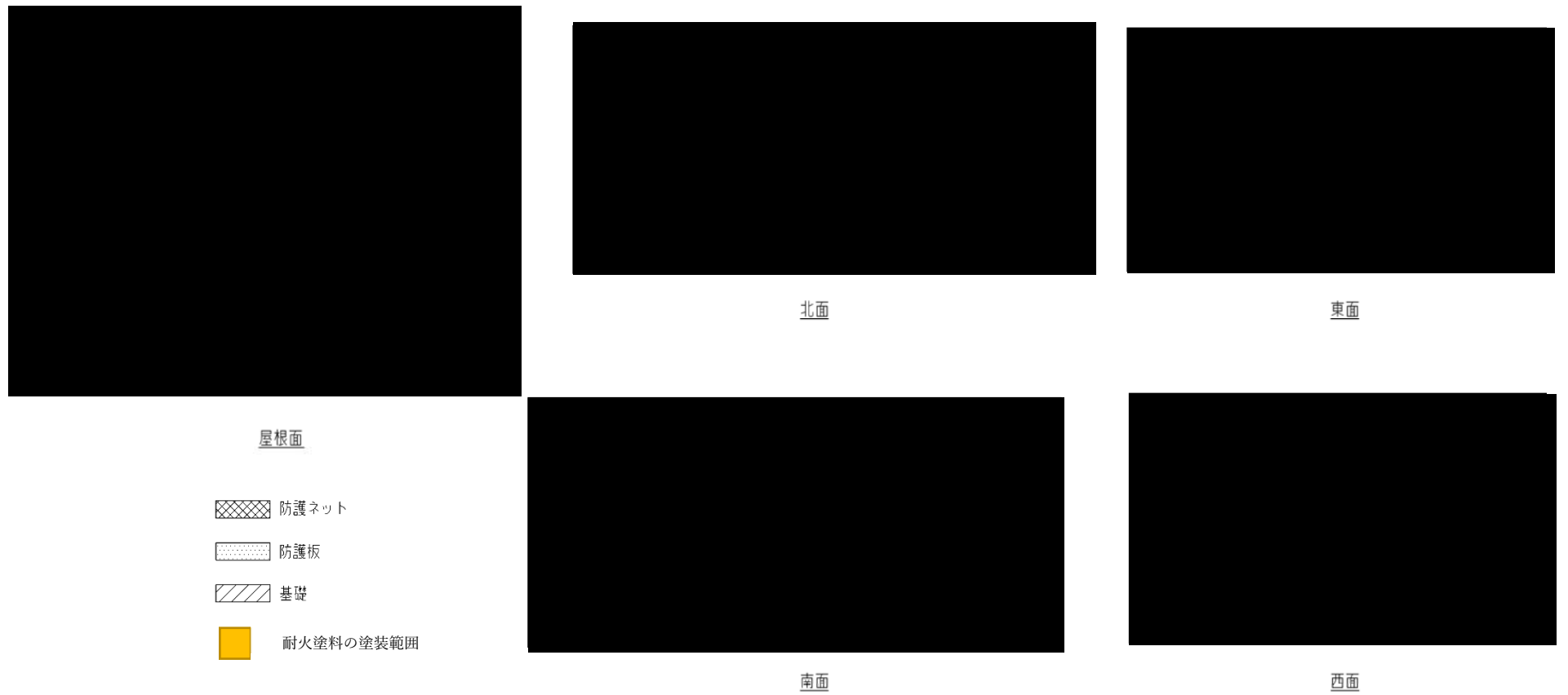
なお、第 3 表に記載のない板厚については、保守的な設定とするため近傍の板厚のうち、薄い板厚に対する必要離隔距離を適用することとする。

第4表 安全冷却水B冷却塔及び竜巻防護対策設備への
必要離隔距離の適用結果

No.	機器	部材	材質	部材厚さ [mm]	形状	必要離隔距 離[m]	備考
1	安全冷却水B冷却塔	架構				7	
2		架構				2	
3		架構				2	
4		架構				7	
5		架構				11	
6		架構				9	
7		架構				9	
8		架構				7	
9		架構				14	
10		架構				12	
11		架構				11	
12		架構				9	
13		架構				9	
14		架構				7	
15		伝熱管				-	他の部材の内側
16		上部ルーバー				11	
17		上部ルーバー				9	
18		ファンブレード				-	ファンリングの内側
19		ファンリング				21	
20		ファンリング				15	
21		配管				-	冷却水配管の温度評価にて示す
22		電動機				-	他の部材の内側
23		減速機				-	他の部材の内側
24	竜巻防護対策設備	架構	BCP325	28	中空角管	0	
25		架構	G385	32	中空角管	0	
26		架構	SN490B	6	H鋼	10	
27		架構	SN490B	8	H鋼	7	
28		架構	SN490B	9	H鋼	7	
29		架構	SN490B	10	H鋼	6	
30		架構	SN490B	12	H鋼	4	
31		架構	SN490B	13	H鋼	4	
32		架構	SN490B	18	H鋼	3	
33		架構	SN490B	20	H鋼	1	
34		架構	SN490B	28	H鋼	0	
35		防護板	SUS304	9	平板	6	



第4図 安全冷却水B冷却塔



第5図 竜巻防護対策設備

令和3年2月12日 RO

【塗装厚さの考え方について】

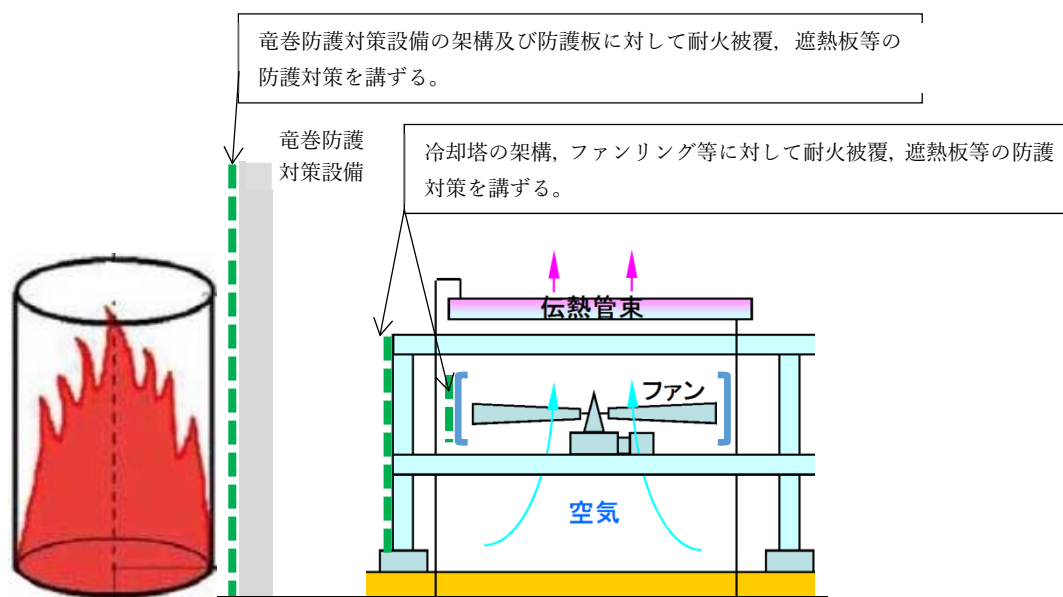
別紙-2

目 次

1.	はじめに	1
2.	耐火塗料の塗装厚さの考え方	1
3.	断熱材厚さへの換算	2
3.1	耐火塗料を塗装した鋼材の温度測定試験について	2
3.2	温度解析について	3
3.3	試験結果について	7
4.	耐火塗料塗装後の鋼材温度について	8
4.1	評価条件	9
4.2	評価方法	9
4.3	評価結果	11
5.	参考文献	13

1. はじめに

航空機墜落による火災の防護対策である耐火塗料は、輻射を受けて発泡し気泡を含む炭化層による断熱層を形成する素材であり、温度評価のためには、その発泡に応じた厚さの耐火被覆の熱物性値を取得する必要がある。そのため、本資料では、発泡に応じた厚さの耐火被覆が、物性値が既知の断熱材厚さいくらに相当するかの確認の考え方について整理するとともに、それに基づいて耐火塗料を塗装した鋼材の温度評価を実施し、評価結果が許容温度を満足することを確認した。

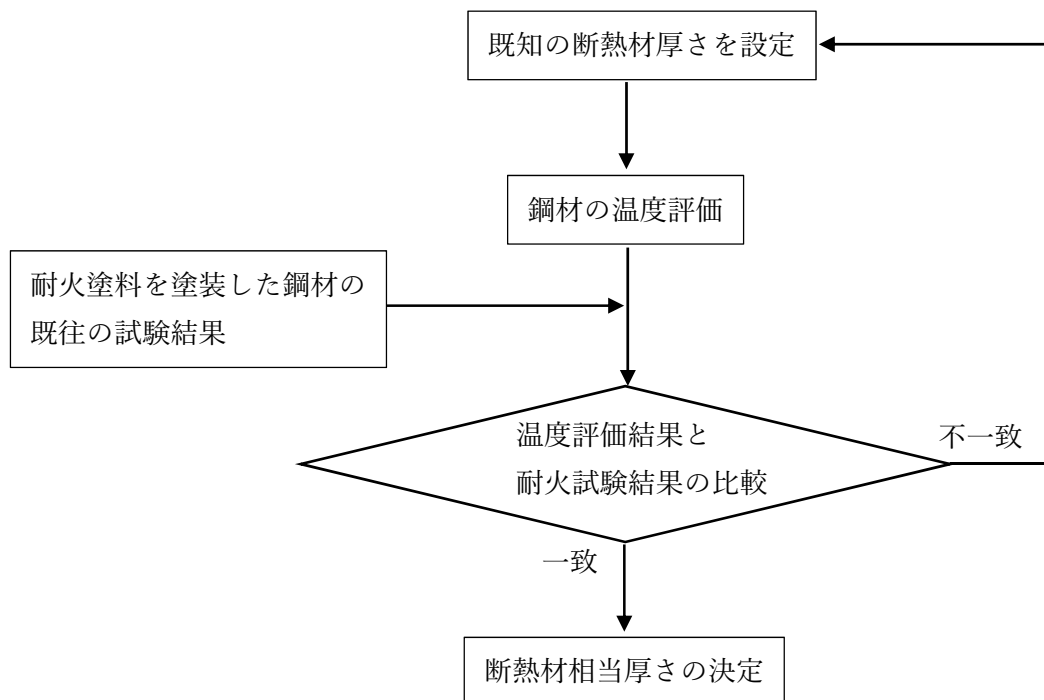


第1図 竜巻防護対策設備及び冷却塔の場合の防護対策のイメージ

2. 耐火塗料の塗装厚さの考え方

耐火塗料を塗装した鋼材の温度上昇を評価するためには、輻射による加熱時の耐火塗料の熱的挙動を把握した上で、断熱材を考慮した鋼材の熱的挙動を基に比較評価する。

比較評価するに当たっては、耐火塗料を塗装した鋼材を加熱し得られた既往の試験結果と物性値が既知の断熱材を用いて評価した鋼材温度の解析結果を比較する。評価においては、鋼材の温度解析の各時間進行において、鋼材温度の解析結果と試験データが一致するまで、断熱材の厚さを繰り返し変更し、鋼材温度の解析結果と試験データが一致する断熱材厚さを求めることで、耐火塗料と等価な断熱材厚さを算出する(第2図参照)。



第2図 耐火塗料と等価な断熱材厚さの算出の流れ

3. 断熱材厚さへの換算

3.1 耐火塗料を塗装した鋼材の温度測定試験について

既往の知見として IS0834 にて示される標準加熱曲線による加熱を実施した1時間耐火試験データがある。

試験条件を第1表に示す。

第1表 試験条件

鋼材の材質	炭素鋼
鋼材の形状	角管
鋼材の外径厚さ	300mm×300mm
鋼材の厚さ	9mm
耐火塗料の塗装厚さ	2mm
炉内温度	IS0834 にて示される標準加熱曲線による加熱温度 (第3図参照)

3.2 温度解析について

(1) 計算条件

第2表に計算で用いた数値を示す。

第2表 計算条件

項目	記号	数値	単位	備考
ステファン・ボルツマン定数	σ	5.67×10^{-8}	$W(m^2 \cdot K^4)$	参考文献(3)
受熱面積	A	0.282	m^2	$\square 300 \times 300 \times 9$
空气体積	V	0.0795	m^3	$= 0.282^2 \times 1$
空気量	Na	3	mol	$= \rho \cdot V \times 10^3 / M$
分子量	M	28.97	g/mol	参考文献(3)
空気密度	ρ	1.2006	kg/m^3	at 初期温度
ガス定数	R	8.314472	$J/(mol \cdot K)$	参考文献(4)
初期温度	T_{i0}	20	$^{\circ}C$	
重力加速度	g	9.80665	m/s^2	参考文献(4)

(2) 物性値

以下に計算で用いる物性値を示す。

a. 空気

伝熱工学資料(改訂4版)記載値を使用した。

b. 炭素鋼

伝熱工学資料(改訂第5版)記載値を使用した。

c. 断熱材

下表のとおり、メーカーカタログ値を使用した。

第3表 断熱材※の熱物性値

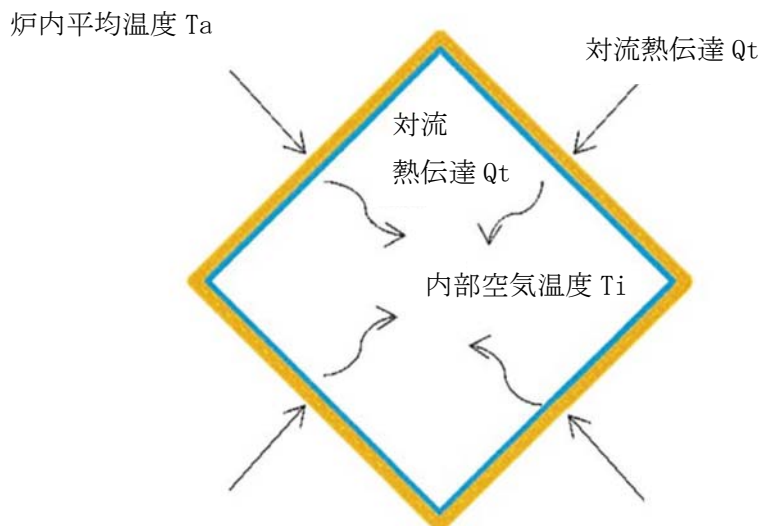
温度 T	密度 ρ	定圧比熱 C_p	熱伝導率 λ
$^{\circ}C$	g/cm^3	$kJ(kg \cdot K)$	$W/(m \cdot K)$
100	0.25	0.858	-
200	0.25	0.959	-
400	0.25	1.083	0.10
600	0.25	1.153	0.14
800	0.25	1.198	0.20
1000	0.25	1.227	0.26

※ ファインフレックスB I Oボード 5625-A

(3) 解析方法

第3図に計算モデルを示す。解析では、耐火塗料を塗布した角鋼管を炉内に入れ、IS0834に基づく標準加熱時間-温度曲線にて炉内を昇温した時の鋼材温度を計算する。

炉内から角鋼管へは輻射による加熱があるものとし、断熱材及び鋼材にて熱伝導し、角鋼管内部の空気へは熱伝達があるものとする。内部空気の流出入はないものとする。



第3図 耐火塗料を塗装した角鋼管の温度評価のモデル

a. 炉内の温度上昇

炉内の温度上昇は、IS0834に基づく標準加熱時間 - 温度曲線にて設定する。

b. 炉内から鋼材への輻射熱伝達

炉内から鋼材への輻射熱伝達は、炉壁及び炉内温度が同じとし、次式にて設定する。

$$Q_r = \sigma \cdot A \cdot ((T_a + 273.15)^4 - (T_d(1) + 273.15)^4)$$

ここで、

Q_r : 輻射熱伝達 (W)

σ : ステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8}$ (W/(m² · K⁴)))

A : 受熱面積 (m²)

T_a : 炉内平均温度 (°C)

$T_d(1)$: 断熱材表面温度 (°C)

c. 鋼材からの空気への対流熱伝達

鋼材から空気への対流熱伝達は、次式⁽³⁾にて設定する。

$$Q_t = h \cdot A \cdot (T_f(N_f) - T_i)$$

ここで、

Q_t : 対流熱伝達 (W)
 h : 熱伝達係数 (W / (m² K))
 A : 受熱面積 (m²)
 $T_f(N_f)$: 鋼材表面温度 (°C)
 T_i : 内部空気温度 (°C)

$$h = Nul \cdot \lambda / HL$$

$$Nux = C_T(Pr) \left(v_\infty / v_w \right)^{0.21} (Gr/Pr)^{1/4}$$

$$C_T(Pr) = \frac{3}{4} \left\{ \frac{Pr}{(2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5Pr)} \right\}^{1/4}$$

$$\left(v_\infty / v_w \right)^{0.21} = 1$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Nul = (4/3)Nul$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot HL^3 \cdot (T_f(N_f) - T_i)}{\nu^2}$$

ここで,

h : 熱伝達係数 (W / (m² K))
 Nul : 平均ヌセルト数
 Nux : 局所ヌセルト数
 HL : 角鋼管の高さ
 λ : 空気の熱伝導率 (W / (m · K))
 $C_T(Pr)$: プラントル数の関数
 Gr : グラスホフ数
 Pr : プラントル数
 Ra : レーリー数
 g : 重力加速度 (=9.80665m / s²)
 β : 体膨張率 (1 / K)
 $T_f(N_f)$: 鋼材の表面温度 (°C)
 T_i : 内部空気温度 (°C)
 ν : 動粘性係数 (m² / s)
 添字 : ∞ : 周囲流体の値, w : 壁面の値

d. 内部空気の温度変化 (非定常熱伝導)

内部空気は温度一様として鋼材の各面からの対流熱伝達により温度変化するものとし,

次式⁽³⁾にて設定する。

$$Na \cdot Cv \cdot \frac{d}{dt} Ti = 4 \cdot Qt$$

上式を陽解法により Δt ごとの時間進行の式にすると

$$Ti_{n+1} = Ti_n + \Delta t * \frac{4 \cdot Qt}{Na \cdot Cv}$$

ここで、

Ti_{n+1} : Δt 後の内部空気温度 (°C)

Ti_n : 現在の内部空気温度 (°C)

Δt : 時間刻み (s)

Qt : 対流熱伝達 (W)

Na : 内部空気量 (mol)

Cv : 定積比熱 (J/mol·K) (= $C_p - R$)

C_p : 低圧比熱 (J/mol·K)

R : 気体定数 (J/mol·K)

e. 断熱材の温度変化 (非定常熱伝導)

断熱材は温度一様の複数節点の熱伝導とし、温度変化は次式⁽³⁾にて設定する。

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d}{dt} Td = Q$$

上式を陽解法により Δt ごとの時間進行の式にすると

$$Td_{n+1} = Td_n + \Delta t * \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

ここで、

Td_{n+1} : Δt 後の断熱材温度 (°C)

Td_n : 現在の断熱材温度 (°C)

Δt : 時間刻み (s)

Q : 熱伝導量 (W)

ρ : 断熱材の密度 (kg/m³)

c : 断熱材の比熱 (J/kg·K)

V : 断熱材の体積 (m³)

また、耐火塗料の発泡については、鋼材温度が 210°C を超えた時点で断熱材の厚さを変化させるものとする。ただしモデルの形状変化はさせず、断熱材の厚さに応じた比熱及び熱伝導率を設定する。

f. 鋼材の温度変化 (非定常熱伝導)

鋼材は温度一様の複数節点の熱伝導とし、温度変化は次式⁽³⁾にて設定する。

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d}{dt} T d = Q$$

上式を陽解法により Δt ごとの時間進行の式にすると

$$Tf_{n+1} = Tf_n + \Delta t * \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

ここで、

Tf_{n+1} : Δt 後の鋼材温度 (°C)

Tf_n : 現在の温度 (°C)

Δt : 時間刻み (s)

Q : 熱伝導量 (W)

ρ : 鋼材の密度 (kg/m³)

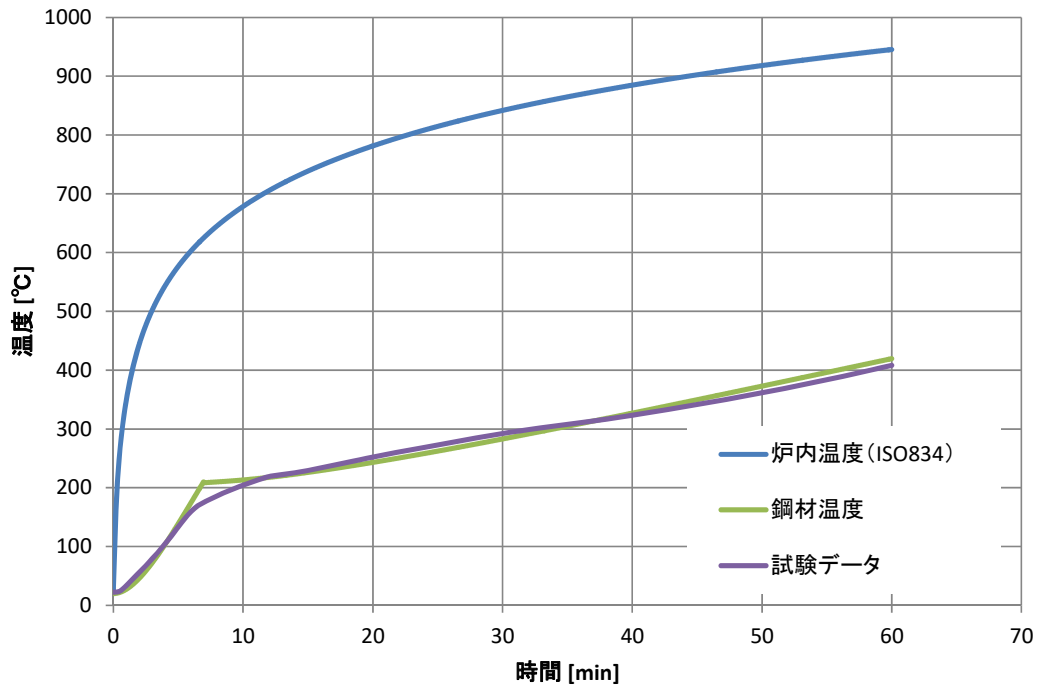
c : 鋼材の比熱 (J/kg·K)

V : 鋼材の体積 (m³)

3.3 試験結果について

3.1 に示した既往の試験結果と 3.2 の評価結果との比較結果を第 4 図に示す。ここで、炉内温度とは、既往の試験に用いた炉の温度、試験温度は耐火塗料を塗装した鋼材の温度、鋼材温度は断熱材厚さを変化させた評価結果である。

第 4 図の結果から、耐火塗料の発泡が終了する 210°C を基点として、加熱開始から 210°C までが厚さ 1 mm の断熱材、210°C 以降が厚さ 25 mm の断熱材として評価した鋼材内部温度が試験データと同等となる結果が得られた。よって、耐火塗料 2 mm を施工した鋼材の熱評価を実施する際は、耐火塗料の発泡前 (210°C 以下) は厚さ 1 mm の断熱材、耐火塗料の発泡後 (210°C より上) は厚さ 25 mm の断熱材に置き換えて評価することとする。



第4図 既往の試験結果と等価断熱材厚さを適用して評価した鋼材温度の比較

また、耐火塗料が2mmと異なる場合においては、耐火塗料厚さと比例した断熱材厚さを評価式に反映することとする。具体的には耐火塗料3mmを塗装した鋼材の熱評価においては、耐火塗料の発泡前は厚さ1mmの断熱材とし、耐火塗料の発泡後は、37.5mm（耐火塗料3mm／耐火塗料2mm×断熱材厚さ25mm）とする。

4. 耐火塗料塗装後の鋼材温度について

3.で得られた結果を踏まえ、耐火塗料を塗装した鋼材に対して、航空機墜落による火災の輻射熱を加えた温度評価を行う。温度響評価においては輻射熱量を一定とし、全ての輻射熱量を断熱材表面で受け取ることとする。

火炎の温度は、無限平行平板間の輻射熱エネルギー算出式である以下の式を用いて、算出する。

$$E = \sigma A \epsilon (T_f^4 - T_w^4)$$

E：火炎の輻射発散[W/m²]

σ：ステファン・ボルツマン定数

A：単位面積（1m²とする。）

ε：放射率（厳しい側として0.2とする。）

T_f：火炎の温度[K]

T_w : 鋼材表面の初期温度 (50℃=323.15Kとして設定する。) [K]

4.1 評価条件

第3表に計算で用いた数値を示す。

第3表 計算条件

項目	記号	数値	単位	備考
ステファン・ボルツマン定数	σ	5.67×10^{-8}	$W(m^2 \cdot K^4)$	
受熱面積	A	1	m^2	
鋼材厚さ	Lf	0.009	m	
断熱材の厚さ	Ld	25 ^{*1} , 37.5 ^{*2}	mm	
初期温度	To	50	℃	

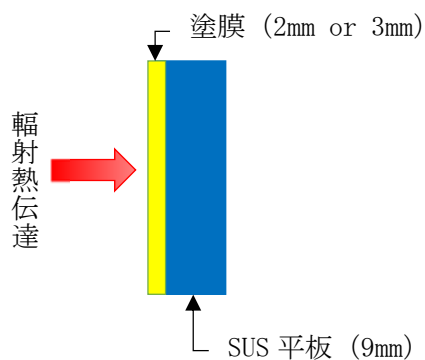
*1:安全上重要な施設で許容温度 325℃

*2:竜巻防護対策設備で許容温度 450℃

4.2 評価方法

第5図に計算モデルを示す。解析では、耐火塗料を塗装した9mmのステンレス板に火炎柱がゼロ距離で隣接した場合の輻射による鋼材温度の変化を計算する。耐火塗料は断熱材として設定する。

なお、評価部材の選定に当たっては、安全冷却水B冷却塔及びその外殻となる竜巻防護対策設備を構成する部材のうち、火炎からの距離、部材の形状及び部材厚さの観点から熱影響が大きいと考えられるSUS平板(部材厚さ9mm)を選定した。



第5図 計算モデル (黄色:耐火塗料, 青色:ステンレス板)

(イ) 輻射強度

算出に用いる記号とその単位及び定義を以下に示す。

記号	単位	定義
E	W/m ²	輻射強度
Rf	W/m ²	輻射発散度(=58,000)
∅	-	円筒火災モデルの形態係数(=0.5)
E ₀	W/m ²	太陽の影響による輻射強度(=400)

輻射強度は下式⁽³⁾により算出する。

$$E = Rf \cdot \emptyset + E_0$$

(ロ) 鋼材への輻射熱伝達

算出に用いる記号とその単位及び定義を以下に示す。

記号	単位	定義
Q _r	W	輻射熱伝達
E	W/m ²	輻射強度
A	m ²	受熱面積
Td(1)	°C	断熱材表面温度

鋼材への輻射熱伝達は、火炎柱の火炎温度 1,500°C、鋼材の初期温度を 50°C とし、下式⁽³⁾のとおり設定する。

$$Q_r = E \cdot A \cdot \frac{((1,500 + 273.15)^4 - (Td(1) + 273.15)^4)}{((1,500 + 273.15)^4 - (50 + 273.15)^4)}$$

(ハ) 断熱材の温度変化（非定常熱伝導）

算出に用いる記号とその単位及び定義を以下に示す。

記号	単位	定義
Td _{n+1}	°C	Δ t秒後断熱材温度
Td _n	°C	断熱材表面温度
Δ t	s	時間刻み
Q	W	熱伝導量
ρ	kg/m ³	断熱材の密度
c	J/(kg・K)	断熱材の比熱
V	m ³	断熱材の体積

断熱材は温度一様の複数接点の熱伝導を考慮したモデルを設定し、温度変化は下式⁽³⁾にて設定する。

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d}{dt} Td = Q$$

上式を陽解法により Δt ごとの時間進行を下式⁽³⁾に示す。

$$Td_{n+1} = Td_n + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

また、耐火塗料の代替として断熱材を使用しているため、耐火塗料の発泡については、鋼材温度が 210℃を超えた時点で断熱材が 1 mm から 25 mm に変化するものとする。ただしモデルの形状変化はさせず、210℃以下の場合、断熱材の比熱は 25 分の 1 に、熱伝導率は 25 倍に設定する。

(二) 鋼材の温度変化（非定常熱伝導）

算出に用いる記号とその単位及び定義を以下に示す。

記号	単位	定義
Tc_{n+1}	℃	後の鋼材温度
Tc_n	℃	現在の鋼材温度
Δt	s	時間刻み
Q	W	熱伝導量
ρ	kg/m ³	鋼材の密度
c	J/(kg · K)	鋼材の比熱
V	m ³	鋼材の体積

鋼材は温度一様の複数節点の熱伝導を考慮したモデルを設定し、温度変化は下式⁽³⁾にて設定する。

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d}{dt} Tc = Q$$

上式を陽解法により Δt ごとの時間進行を下式に示す。

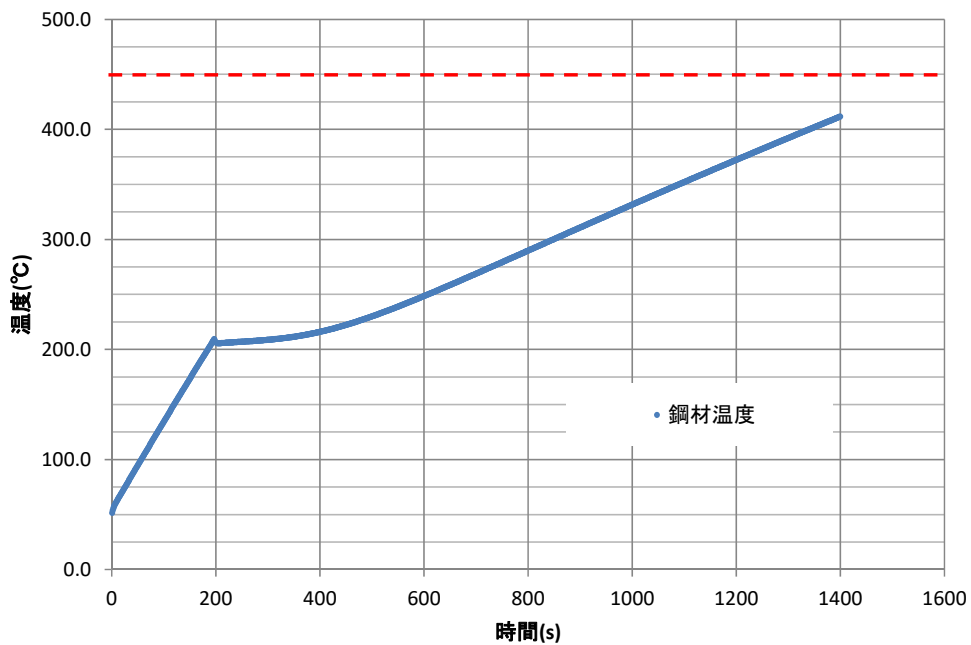
$$Tc_{n+1} = Tc_n + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

4.3 評価結果

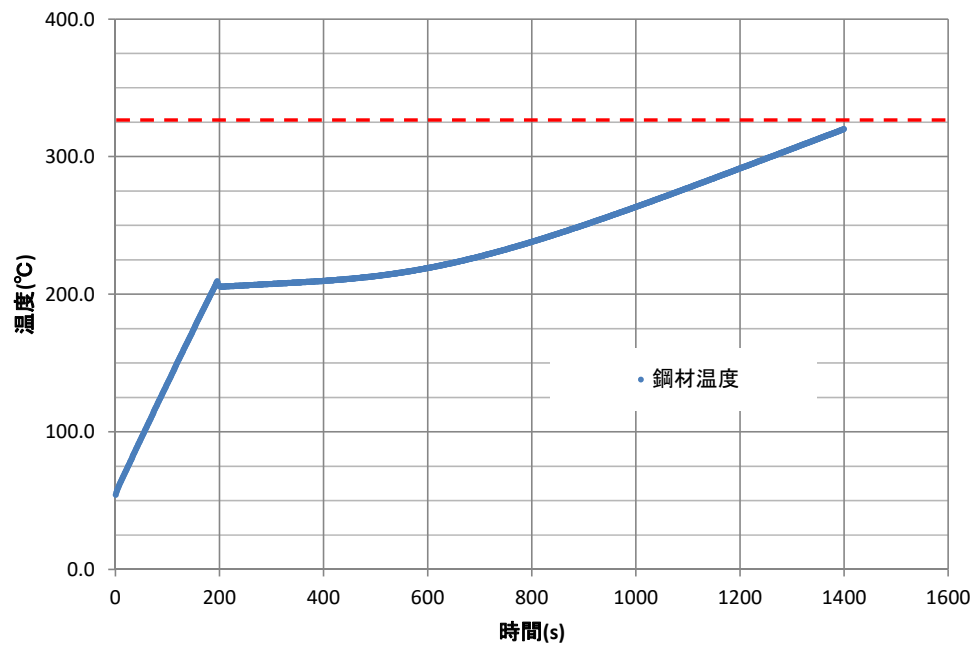
航空機墜落による火災の火炎温度を一定とした耐火塗料 2 mm 及び 3 mm の鋼材温度の評価結果を第 6 図及び第 7 図に示す。

評価の結果，耐火塗料を 2 mm 厚さで塗装することで，火災発生から 1,400 秒後の鋼材温度が 410°C 程度，耐火塗料を 3 mm 厚さで塗装した場合には 320°C 程度となる。

以上より，安全上重要な施設（許容温度 325°C）に対しては，耐火塗料 3 mm，竜巻防護対策設備（許容温度 450°C）に対しては，耐火塗料 2 mm を塗装することで，鋼材温度を許容温度以下に抑えられることが評価により確認された。よって，耐火塗料による防護の設計方針としては，安全上重要な施設に 3 mm 及び竜巻防護対策設備に 2 mm の耐火塗料を塗装することとする。



第 6 図 耐火塗料 2 mm を塗装した場合の鋼材温度評価結果



第7図 耐火塗料3mmを塗装した場合の鋼材温度評価結果

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
- (3) 伝熱工学資料 改訂第5版
- (4) 機械工学便覧 基礎編α9 単位・物理定数・数学

令和3年2月12日 RO

【耐火試験について】

別紙-3

目 次

1.	はじめに	1
2.	試験の概要	2
3.	耐火塗料の条件	3
4.	耐火試験の結果	3

1. はじめに

屋外に設置する設計対処施設のうち、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bは、外部火災影響により安全機能を損なわない設計としている。また、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bの外殻となる竜巻防護対策設備は、外部火災影響により再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bに波及的影響を及ぼすことのない設計としている。

航空機墜落による火災は、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bの外殻となる竜巻防護対策設備の至近で発生することを想定し、その火災からの輻射熱を直接受熱した場合においても、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bを構成する部材の温度を許容温度である 325℃以下とすることにより、安全機能を損なわない設計としている。

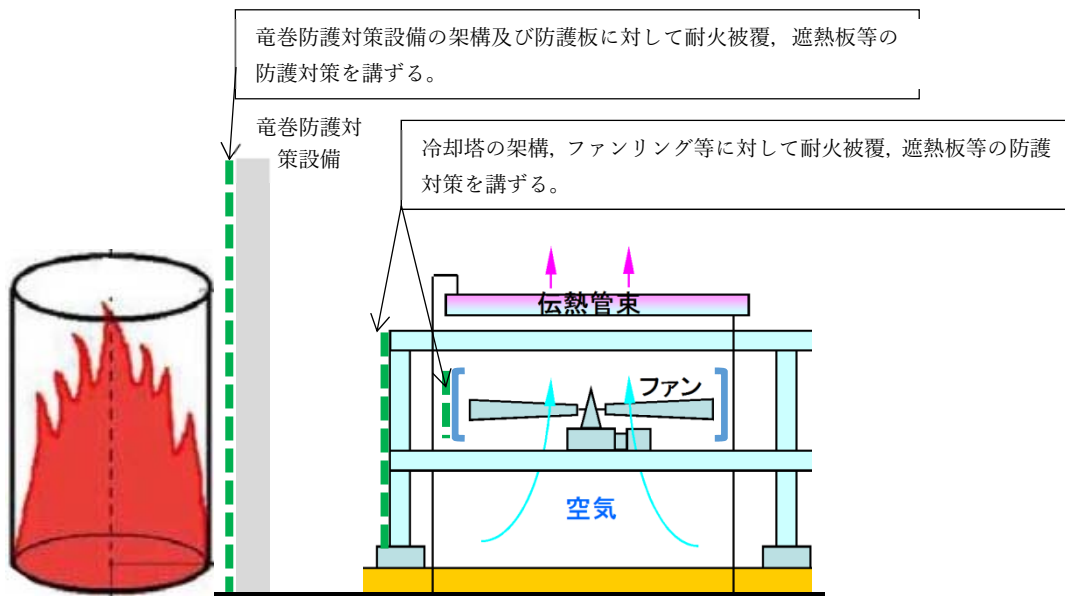
再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bの外殻となる竜巻防護対策設備は、火災からの輻射熱を直接受熱した場合においても、竜巻防護対策設備を構成する部材の温度を許容温度である 450℃以下とすることにより、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔Bに、波及的影響を及ぼすことのない設計としている。

それぞれの部材の温度が許容温度を超える場合には、耐火被覆、遮熱板等の防護対策を講ずることとしている。防護対策のイメージを第1図に示す。

許容温度を超える部材に塗布する耐火被覆の厚さの設定については、安全上重要な施設である(許容温度 325℃)に対しては耐火被覆mm, 竜巻防護対策設備(許容温度 450℃)に対しては耐火被覆 2 mmとしている。

別紙-2「塗装厚さの考え方について」に記載したとおり、既往の耐火試験データ等を用いて耐火塗料塗布後の鋼材温度評価を実施し、耐火性能の有効性を確認した結果から耐火被覆の厚さの設定の妥当性を示した。

本資料は、工事施工上の参考情報の取得を目的として実施した耐火試験の結果から、火災による熱影響の緩和効果を確認する。また、耐火塗料塗布後の鋼材温度評価の結果と比較することで、鋼材温度評価の結果が十分保守的な結果となっていることを確認する。



第1図 竜巻防護対策設備及び冷却塔の場合の防護対策のイメージ

2. 試験の概要

火炎から輻射熱を直接受熱する飛来物防護板(SUS製)を代表例とし評価した結果と比較するために、耐火被覆3mm(許容温度325℃)及び耐火被覆2mm(許容温度450℃)を塗布した試験体を用いた耐火試験を実施した。

試験条件は、別紙-2「塗装厚さの考え方について」において鋼材の温度評価を実施したのと同様な条件とし、第1表のとおりとする。

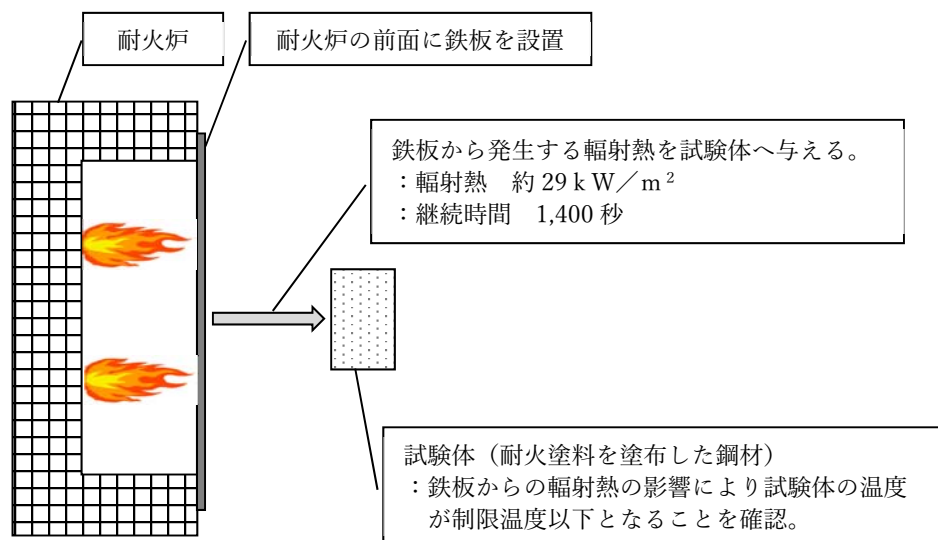
第1表 試験条件

項目	単位	値
火炎の輻射強度	W/m ²	294,00
燃焼時間	s	1,400
試験体	材質	SUS材
	厚さ	9mm
	形状	平板

本試験にあたっては、加熱炉の前面に鉄板を設置して一定温度の発熱面とし、火炎の輻射熱量が一定となる条件を模擬する。試験概要図を第2図に示す。

火炎側の輻射熱は一定として試験を行っても試験体温度が上昇するにしがって現実には受熱量が変動するが、塗料を断熱材として想定した鋼材温度評価においても、温度変化による受熱量の変動を見込んでいることから試験を実施するにあたって影響は少ない。

また、試験体の周囲温度等の環境要因によって放熱が発生するが、鋼材温度評価が放熱のない保守的な評価結果としていることから、鋼材温度評価の結果を大きく超えるような温度上昇はないと想定される。よって、鋼材温度評価の結果を超えない試験結果が得られれば、鋼材温度評価の妥当性の確認ができる。



第2図 試験概要図

3. 耐火塗料の条件

(1) 仕様

耐火塗料は、鋼材等を対象とした耐火被覆材の一つである。耐火塗料は、火災時の温度上昇に伴い熱膨張し、熱伝導性の低い断熱層を形成する。この断熱層が耐火被覆材として火災による加熱から鋼材等を防護する働きをする。

使用する耐火塗料は、建築基準法における耐火構造としての認定を受けたものを選定する。

(2) 施工

施工は耐火塗料の最低必要膜厚が安全上重要な施設 3 mm、竜巻防護対策設備 2 mm とし、設工認に関する使用前検査と同様に、安全上重要な施設 3 mm に対して施工誤差 - 0 mm 以上、竜巻防護対策設備 2 mm に対して施工誤差 - 0 mm 以上を判断基準とし管理する。

4. 耐火試験の結果

(1) 安全上重要な施設の耐火試験の結果

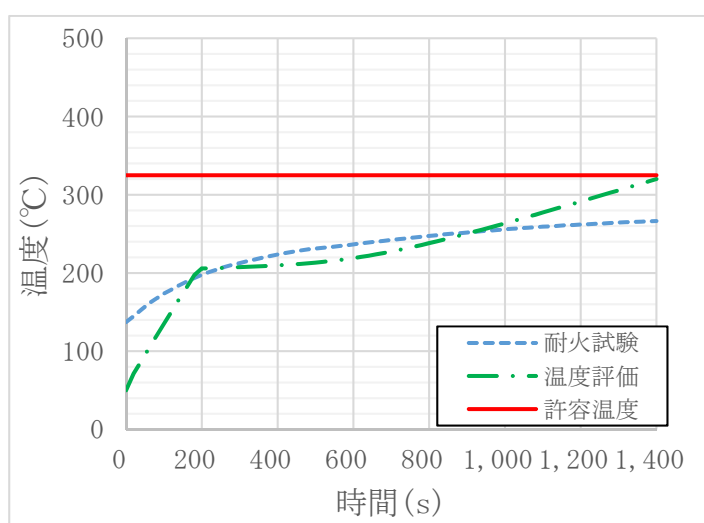
安全上重要な施設の耐火試験の結果を第3図に示す。塗料を 3 mm 厚さで塗布することで、火災発生から 1,400 秒後の鋼材温度が 260°C 程度であり許容温度である 325°C 以下となり、火災による熱影響の緩和効果を確認した。

また、上記の耐火試験の結果と比較し、別紙-2「塗装厚さの考え方について」にて示した、安全上重要な施設の耐火塗料塗布後の鋼材温度評価の結果が 310℃であり、鋼材温度評価の結果が十分保守的な結果を与えていることを確認した。

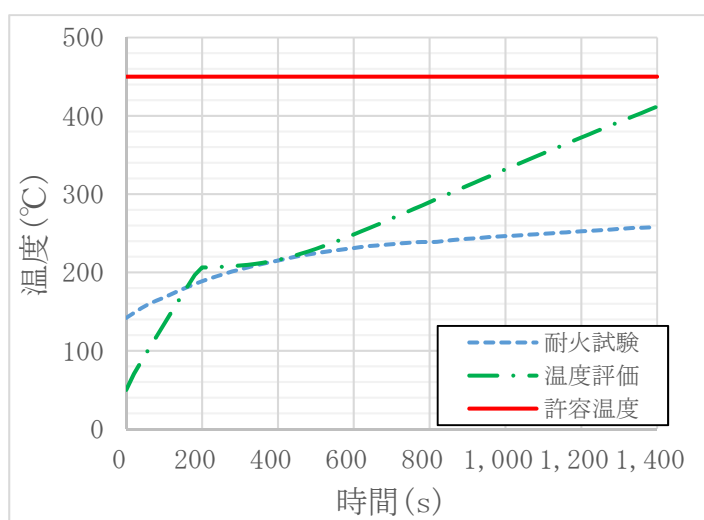
(2) 竜巻防護対策設備の耐火試験の結果

竜巻防護対策設備の耐火試験の結果を第4図に示す。加熱開始から 1,400 秒後の鋼材温度は 270℃程度であり、許容温度である 450℃以下となり、熱影響の緩和効果を確認した。

また、別紙-2「塗装厚さの考え方について」にて示す同条件にお鋼材温度評価の結果が 410℃であり、鋼材温度評価の結果が十分保守的な結果を与えていることを確認した。



第3図 安全上重要な施設の耐火試験の結果



第4図 竜巻防護対策設備の耐火試験の結果

令和3年2月12日 RO

【耐火試験について】

別紙-3

目 次

1.	はじめに	1
2.	試験の概要	2
3.	耐火塗料の条件	3
4.	耐火試験の結果	3

1. はじめに

屋外に設置する設計対処施設のうち、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B は、外部火災影響により安全機能を損なわない設計としている。また、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B の外殻となる竜巻防護対策設備は、外部火災影響により再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B に波及的影響を及ぼすことのない設計としている。

航空機墜落による火災は、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B の外殻となる竜巻防護対策設備の至近で発生することを想定し、その火災からの輻射熱を直接受熱した場合においても、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B を構成する部材の温度を許容温度である 325℃以下とすることにより、安全機能を損なわない設計としている。

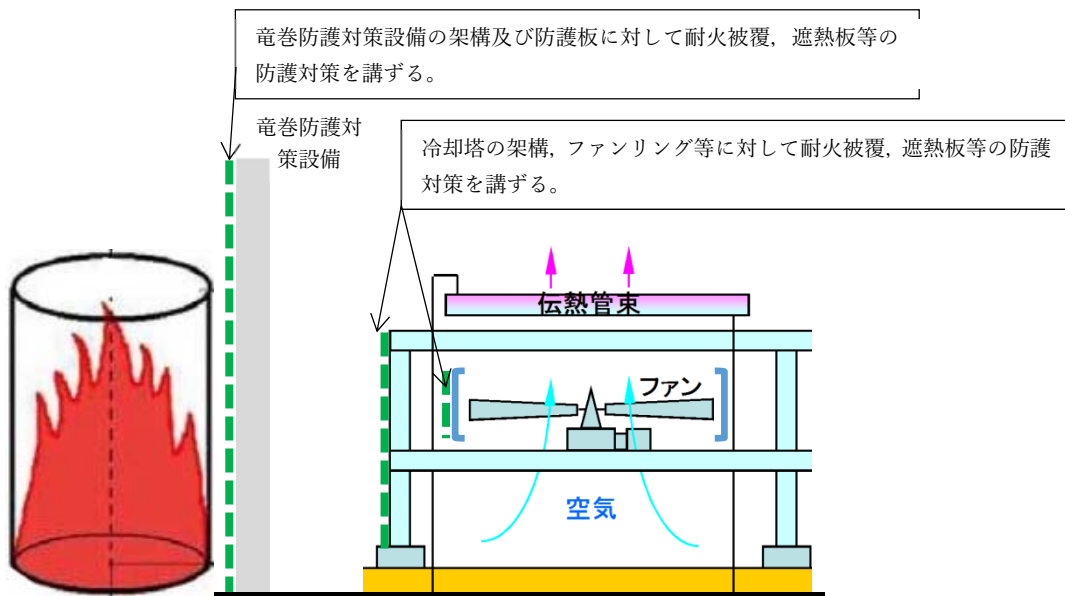
再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B の外殻となる竜巻防護対策設備は、火災からの輻射熱を直接受熱した場合においても、竜巻防護対策設備を構成する部材の温度を許容温度である 450℃以下とすることにより、再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B に、波及的影響を及ぼすことのない設計としている。

それぞれの部材の温度が許容温度を超える場合には、耐火被覆、遮熱板等の防護対策を講ずることとしている。防護対策のイメージを第 1 図に示す。

許容温度を超える部材に塗布する耐火被覆の厚さの設定については、安全上重要な施設である(許容温度 325℃)に対しては耐火被覆 mm, 竜巻防護対策設備(許容温度 450℃)に対しては耐火被覆 2 mm としている。

別紙-2「塗装厚さの考え方について」に記載したとおり、既往の耐火試験データ等を用いて耐火塗料塗布後の鋼材温度評価を実施し、耐火性能の有効性を確認した結果から耐火被覆の厚さの設定の妥当性を示した。

本資料は、工事施工上の参考情報の取得を目的として実施した耐火試験の結果から、火災による熱影響の緩和効果を確認する。また、耐火塗料塗布後の鋼材温度評価の結果と比較することで、鋼材温度評価の結果が十分保守的な結果となっていることを確認する。



第1図 竜巻防護対策設備及び冷却塔の場合の防護対策のイメージ

2. 試験の概要

火炎から輻射熱を直接受熱する飛来物防護板（SUS製）を代表例とし評価した結果と比較するために、耐火被覆3mm（許容温度325℃）及び耐火被覆2mm（許容温度450℃）を塗布した試験体を用いた耐火試験を実施した。

試験条件は、別紙-2「塗装厚さの考え方について」において鋼材の温度評価を実施したのと同様な条件とし、第1表のとおりとする。

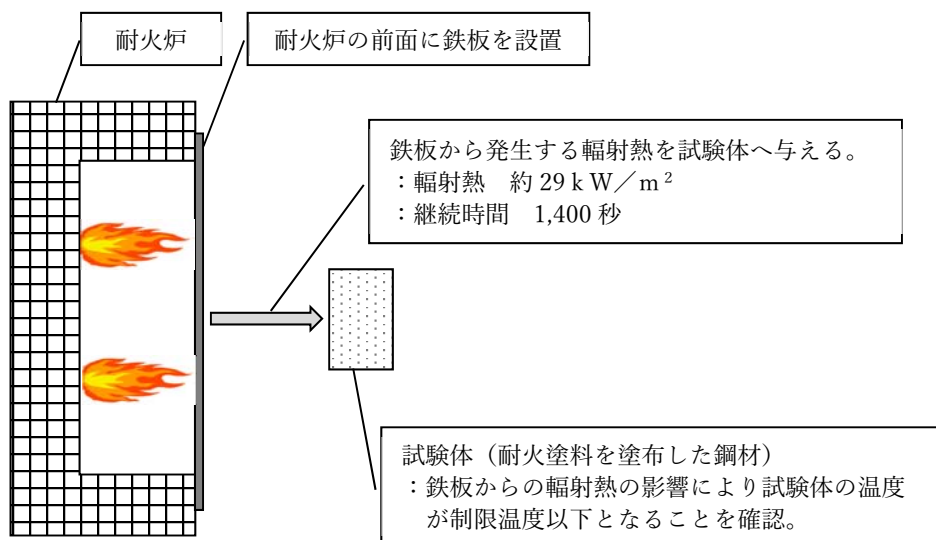
第1表 試験条件

項目	単位	値
火炎の輻射強度	W/m ²	294,00
燃焼時間	s	1,400
試験体	材質	SUS材
	厚さ	9mm
	形状	平板

本試験にあたっては、加熱炉の前面に鉄板を設置して一定温度の発熱面とし、火炎の輻射熱量が一定となる条件を模擬する。試験概要図を第2図に示す。

火炎側の輻射熱は一定として試験を行っても試験体温度が上昇するにしがって現実には受熱量が変動するが、塗料を断熱材として想定した鋼材温度評価においても、温度変化による受熱量の変動を見込んでいることから試験を実施するにあたって影響は少ない。

また、試験体の周囲温度等の環境要因によって放熱が発生するが、鋼材温度評価が放熱のない保守的な評価結果としていることから、鋼材温度評価の結果を大きく超えるような温度上昇はないと想定される。よって、鋼材温度評価の結果を超えない試験結果が得られれば、鋼材温度評価の妥当性の確認ができる。



第2図 試験概要図

3. 耐火塗料の条件

(1)仕様

耐火塗料は、鋼材等を対象とした耐火被覆材の一つである。耐火塗料は、火災時の温度上昇に伴い熱膨張し、熱伝導性の低い断熱層を形成する。この断熱層が耐火被覆材として火災による加熱から鋼材等を防護する働きをする。

使用する耐火塗料は、建築基準法における耐火構造としての認定を受けたものを選定する。

(2)施工

施工は耐火塗料の最低必要膜厚が安全上重要な施設 3 mm、竜巻防護対策設備 2 mm とし、設工認に関する使用前検査と同様に、安全上重要な施設 3 mm に対して施工誤差 - 0 mm 以上、竜巻防護対策設備 2 mm に対して施工誤差 - 0 mm 以上を判断基準とし管理する。

4. 耐火試験の結果

(1)安全上重要な施設の耐火試験の結果

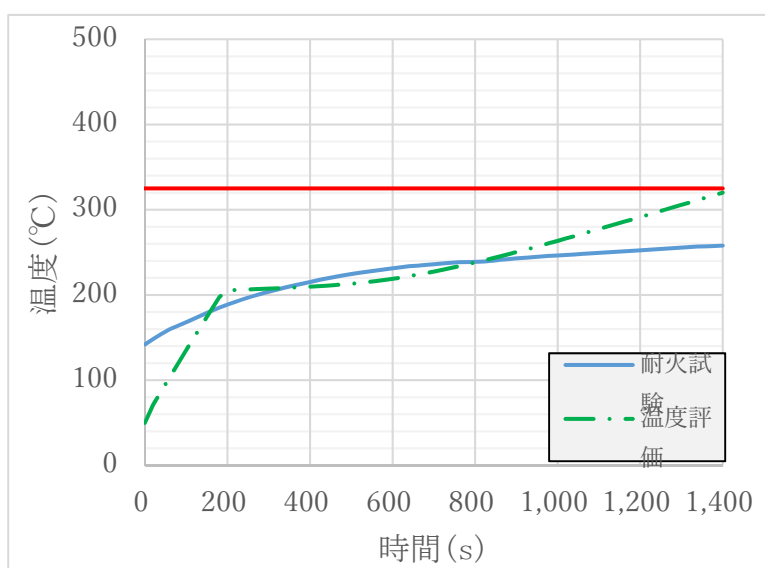
安全上重要な施設の耐火試験の結果を第3図に示す。塗料を 3 mm 厚さで塗布することで、火災発生から 1,400 秒後の鋼材温度が 260°C 程度であり許容温度である 325°C 以下となり、火災による熱影響の緩和効果を確認した。

また、上記の耐火試験の結果と比較し、別紙-2「塗装厚さの考え方について」にて示した、安全上重要な施設の耐火塗料塗布後の鋼材温度評価の結果が 310℃であり、鋼材温度評価の結果が十分保守的な結果を与えていることを確認した。

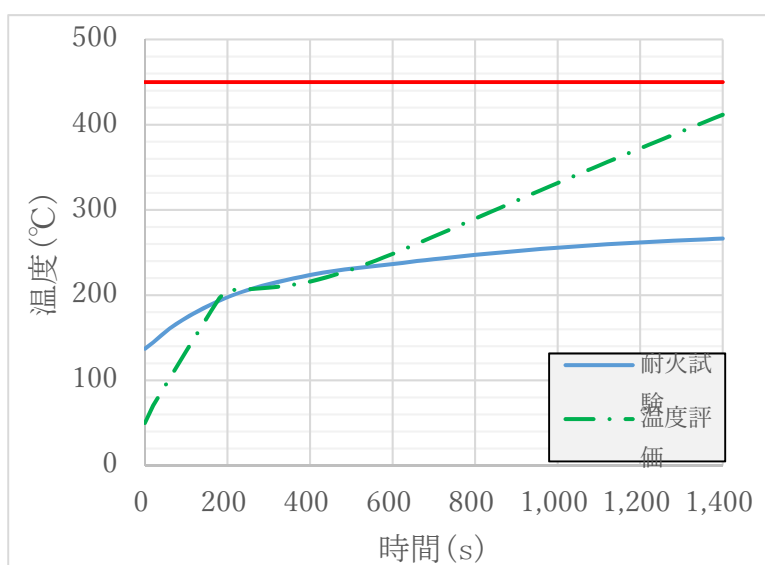
(2) 竜巻防護対策設備の耐火試験の結果

竜巻防護対策設備の耐火試験の結果を第4図に示す。加熱開始から 1,400 秒後の鋼材温度は 270℃程度であり、許容温度である 450℃以下となり、熱影響の緩和効果を確認した。

また、別紙-2「塗装厚さの考え方について」にて示す同条件にお鋼材温度評価の結果が 410℃であり、鋼材温度評価の結果が十分保守的な結果を与えていることを確認した。



第3図 安全上重要な施設の耐火試験の結果



第4図 竜巻防護対策設備の耐火試験の結果

令和3年2月12日 RO

【必要離隔距離の算出の対象とする
代表部材の選定について】
別紙-4

目 次

1. はじめに 1
2. 部材の形状の選定 1

1. はじめに

本資料は、耐火塗料の塗装範囲を設定する際の必要離隔距離の算出において、部材形状を平板で代表としたことの妥当性を説明するものである。

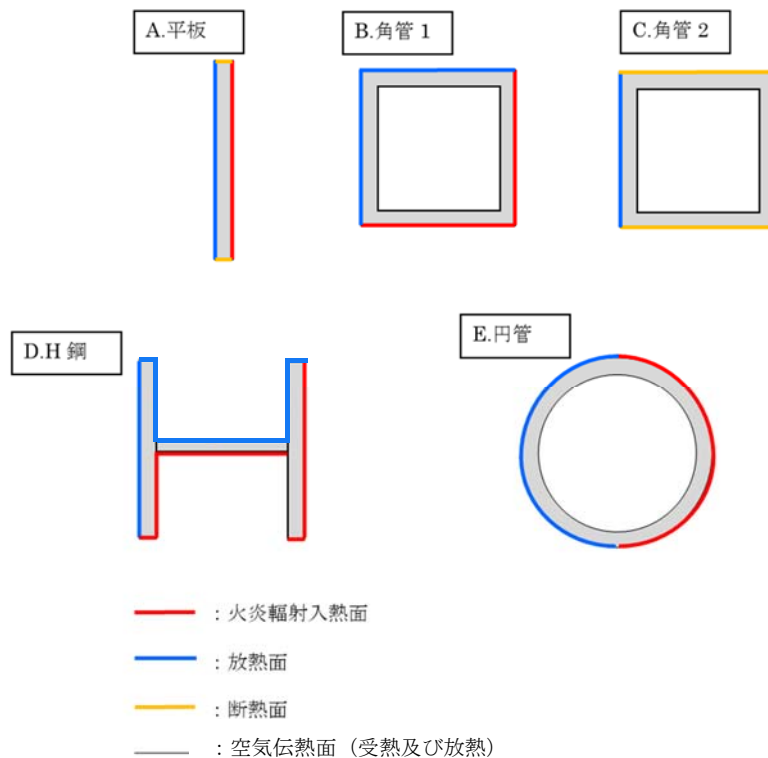
2. 部材の形状の選定

(1) 部材に対する熱的条件の想定

必要離隔距離を算出する上で、材質、板厚、形状は評価結果に大きな影響を与える。このうち、輻射を与えた場合に温度上昇が最大となる形状で離隔距離を評価することは保守的な結果を与えることから、屋外に設置する外部火災防護対象施設及び竜巻防護対策設備を構成する部材を調査し確認された形状から代表となる形状を選定する。調査した結果、確認された形状を第1図に示す。

また、想定する熱的条件は、温度評価の結果が最も厳しくなる条件とし、以下に示すとおりとする。

- ・入熱面には、ガイドに基づく水平輻射入熱を考慮することとし、入熱面の温度上昇に伴う入熱緩和は考慮せず、熱流束は一定とする。
- ・入熱面からの放熱は考慮しない。
- ・入熱面の裏面からの自然対流熱伝達を考慮する。
- ・輻射入熱面、放熱面、断熱面及び輻射・空気伝熱面は、第1図のとおり部材の形状毎に考慮する。



第1図 部材の形状毎に想定する熱的条件

(2) 部材の温度上昇についての検討結果

部材の温度上昇は、比熱と重量の積である熱容量、入熱面積及び放熱面積に依存する。

部材の入熱面積と放熱面積が同じであれば、熱容量が小さいほど温度上昇が大きくなり、熱容量が大きいほど温度上昇が小さくなる。

第1図に示すとおり、入熱面と放熱面は全ての部材で等しいことから、熱容量の大きさにより、離隔距離の評価上、厳しい形状を決定する。

熱容量は比熱と重量の積から算出される。ここで、全ての形状の材質及び板厚を同等と見なした場合、単位長さあたりの重量が最も軽いのは平板であり、熱容量が最も小さくなることから、平板を代表とし、必要離隔距離を算出することは妥当であると判断する。