

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外外火 04 R1
提出年月日	令和 3 年 6 月 4 日

設工認に係る補足説明資料

外部火災防護設計の基本方針に関する補足説明資料

航空機墜落による火災の防護設計について

(再処理施設及びMOX燃料加工施設)

目 次

1. 概要	1
2. 設計の基本的な考え方	1
3. 評価対象部位の抽出	2
4. 設計方針	2
4.1 設計の分類	3
4.2 設計方針	3
5. 評価方針	5
5.1 評価方針	5
6. 評価条件の設定	6
6.1 航空機墜落地点の設定	6
6.2 航空機墜落火災と他の事象の組合せについて	7
6.3 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定	8
6.4 航空機墜落火災に対する防護設計の火災条件	8
6.5 許容温度の設定	9
7. 設計結果	9
7.1 評価結果	9
7.2 耐火被覆	10
7.3 遮熱版	16

■: 商業機密の観点から公開できない箇所

1. 概要

本資料は、再処理施設及びMOX燃料加工施設の設計基準対処施設に対する、後次回申請を含めた航空機墜落による火災の防護設計を補足説明するものであり、第1回設工認申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「IV-1-1-1-4-5 外部火災防護における評価方針」
- ・再処理施設 添付書類「IV-1-1-1-4-6 外部火災防護における評価条件および評価結果」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-5 外部火災防護における評価方針」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-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」

本資料では、考慮すべき外部火災の一つである航空機墜落火災について、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成26年6月19日 原子力規制委員会)」(以下「外部火災影響評価ガイド」という。)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)」を参考として、航空機墜落火災に対する防護対象施設の設計の考え方のうち、航空機墜落火災における評価方針及び評価条件を補足する。

2. 設計の基本的な考え方

外部火災防護対象施設に対する、航空機墜落火災の防護設計の基本的な考え方を以下に示す。

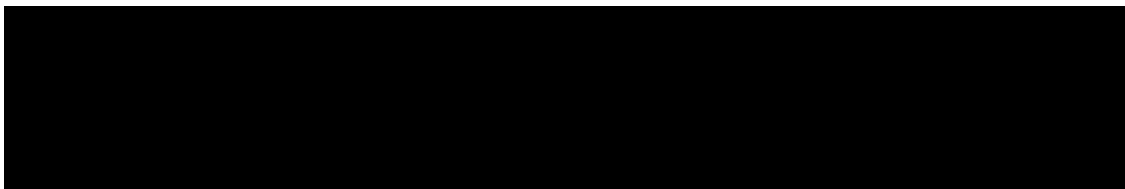
- ①航空機墜落火災に対する設計は、建屋等の至近で火災が発生した場合を想定し、以下のとおりとする。
 - ・屋外の外部火災防護対象施設である冷却塔、主排気筒及び屋外ダクトは、それらの有する安全機能を損なわない設計とする。
 - ・波及的影響を及ぼし得る施設である飛来物防護ネットは、冷却塔に対して波及的影響を及ぼさない設計とする。
 - ・外部火災防護対象施設を収納する建屋は、内包する外部火災防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。
- ②屋外の外部火災防護対象施設である冷却塔、主排気筒及び屋外ダクト並びに波及的影響を及ぼし得る施設である飛来物防護ネットは、航空機墜落火災からの輻射を受け、部材が温度上昇しても、許容温度以下とする設計とする。
- ③許容温度（支持架構については、許容温度を満足するための必要隔離距離）を満足しない部材に対しては、耐火被覆又は遮熱板を用いた防護対策により、許容温度以下とする。防護対策は、以下の基本的な考えに基づいた設計とする。
 - ・設定した条件に基づき評価した結果、許容温度を満足できない部位を対象とする。

- ・支持架構の耐震性向上のため、積載重量の低減が図れること、および施工の容易さから、耐火被覆の施工を航空機墜落火災の防護対策の基本とする。
 - ・摺動部や耐火被覆が施工できない材質を有する部位は、耐火被覆の施工が困難であることから、輻射を遮るため、遮熱板を設置する。
- ④再処理施設の航空機墜落火災は建屋等の至近での火災を想定するという特徴を考慮したものとする。
- ⑤外部火災防護対象施設を収納する建屋は、外壁の内部温度がコンクリートの許容温度200℃以上である領域の有無を確認する。許容温度以上になる領域がある場合には想定される破損、強度低下による影響を確認し、建屋外壁が要求される機能を損なわない設計とする。
- ⑥航空機墜落火災に対する防護設計は、許容温度を満足できる部材で構成するのではなく、耐火被覆および遮熱板も交えた合理的な設計とする。

3. 評価対象部位の抽出

航空機墜落火災において、安全冷却水B冷却塔（以下、「冷却塔」という）に要求される機能を踏まえ、その機能維持に必要な設計対象部位を抽出する。抽出過程は別紙－1参照。

(1) 冷却塔



(2) 飛来物防護ネット

安全上重要な施設である冷却塔を竜巻飛来物から防護する機能を有する飛来物ネットは、航空機墜落火災に対し、冷却塔への波及的影響を及ぼさない設計とする必要があることから、以下を評価対象とする。

- ・支持架構

(3) 建屋

外壁及び建屋内の温度上昇により建屋内の外部火災防護対象施設の安全機能を損なわない及び建屋外壁が要求される機能を損なわない必要があることから、以下を評価対象とする。

- ・設計対処施設の建屋

4. 設計方針

火炎から生じる輻射は火災源からの距離が増すと指数関数的に輻射強度が低下する性質を持つため、火災源から距離が確保されていれば、その温度上昇は限定的なものとな

る。

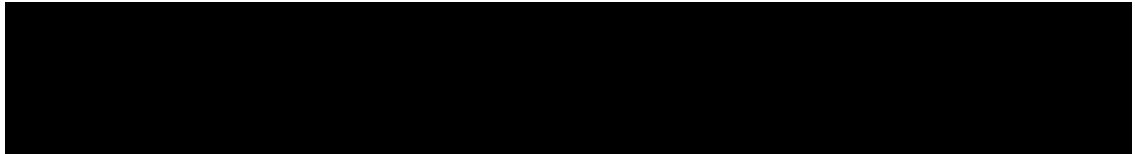
ただし、再処理施設における航空機墜落火災は、施設の至近での発生を想定することとしているため、十分な距離を確保することができない部位も生じる。

十分な距離を確保することができない場合であっても、十分な厚さを持つ部材であれば熱容量の関係から許容温度以下となるものも存在する。また、防護対策である耐火被覆や遮熱板を施工することで、鋼材の温度上昇を緩和し、許容温度以下とすることも可能であることから、火災と施設の距離の確保および防護対策の組み合わせにより許容温度以下とする設計とする。

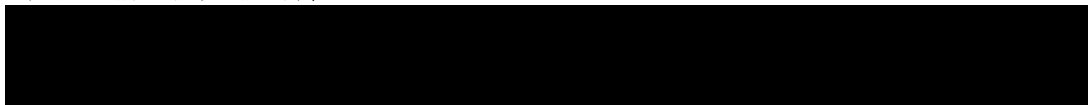
4. 1 設計の分類

航空機墜落火災に対する設計方針を以下の通り分類する。

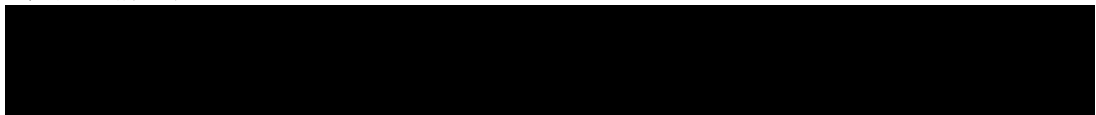
(1) 冷却塔の冷却水



(2) 支持構造物以外の部位

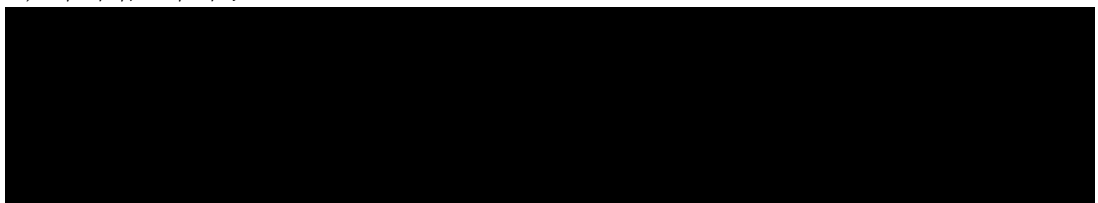


(3) 支持構造物

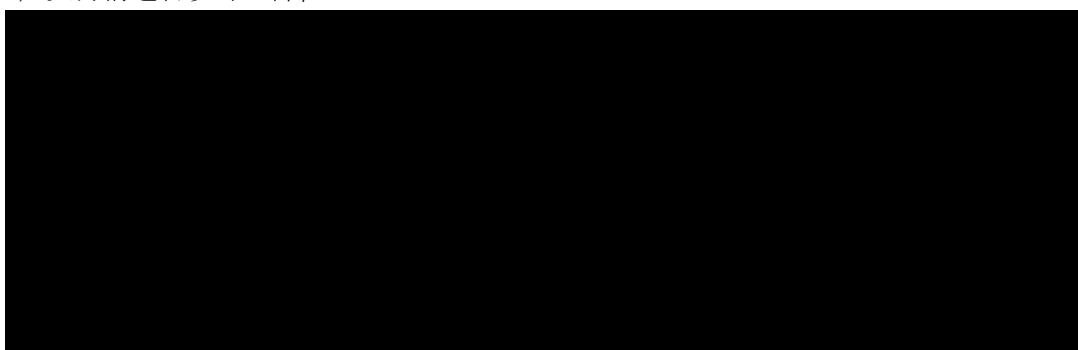


4. 2 設計方針

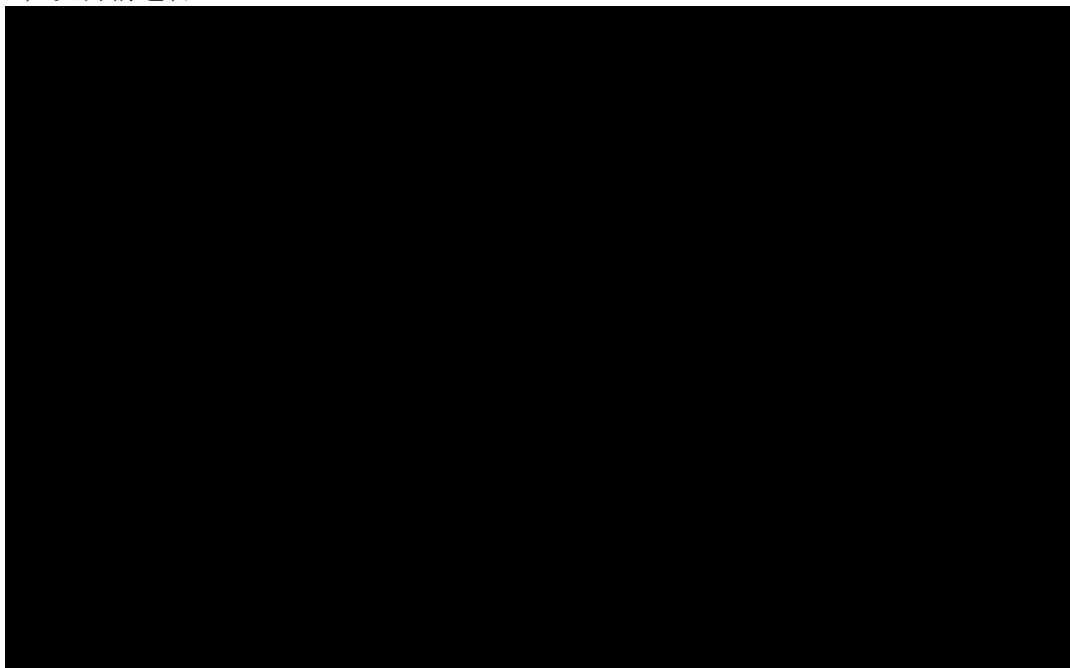
(1) 冷却塔の冷却水



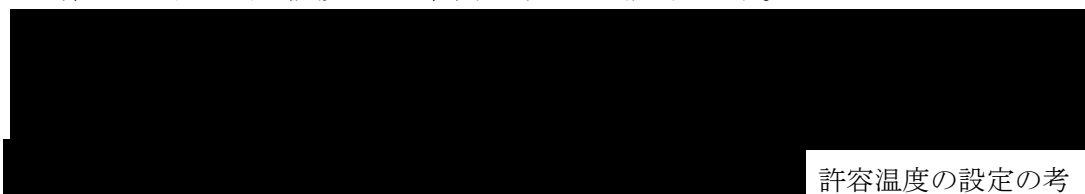
(2) 支持構造物以外の部位



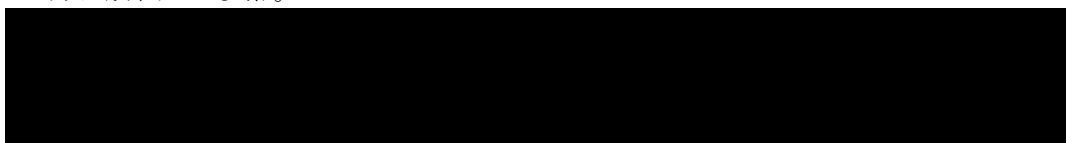
(3) 支持構造物

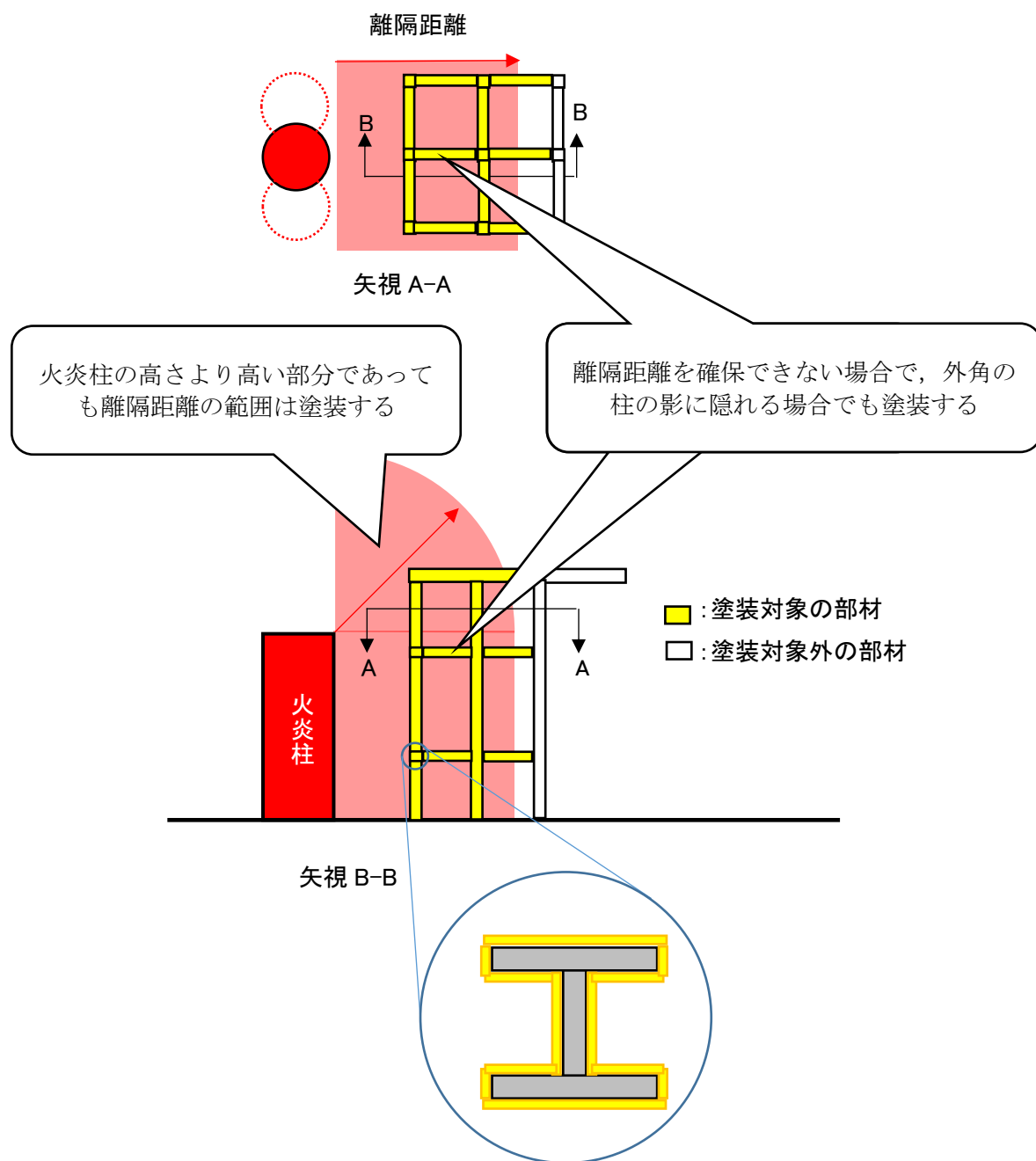


第4-1図に耐火被覆の施工範囲の考え方の概要を示す。



え方は別紙-2参照。





第4-1図 耐火被覆の施工範囲の概要

4. 3 その他の考慮

航空機墜落火災により発生する高温空気による影響についても、冷却塔の冷却性能に影響を及ぼすことはないことを確認した。(別紙-5 参照)

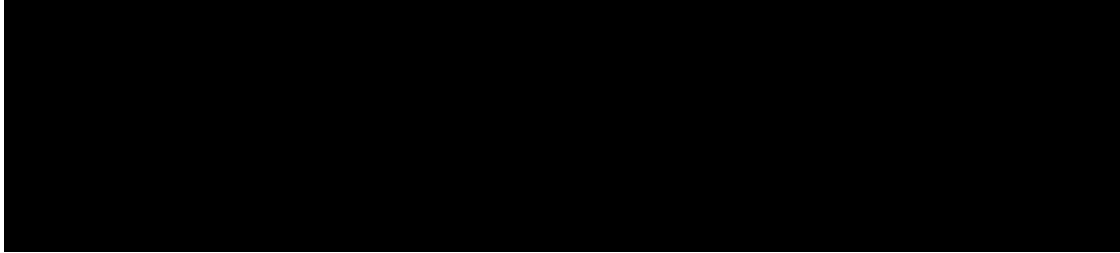
また、許容温度を超えるおそれのある部材に対しては、全面に耐火被覆を施工することから、部材間に極端な温度差が生じることは考えられない。

5. 評価方針

5. 1 評価方針

「4. 2 設計方針」で設定した設計を達成するため、航空機墜落火災から受ける輻射に対する評価を実施する。評価の詳細は別紙-2, 3, 4参照。

(1) 冷却塔の冷却水



(2) 支持構造物



(3) 建屋

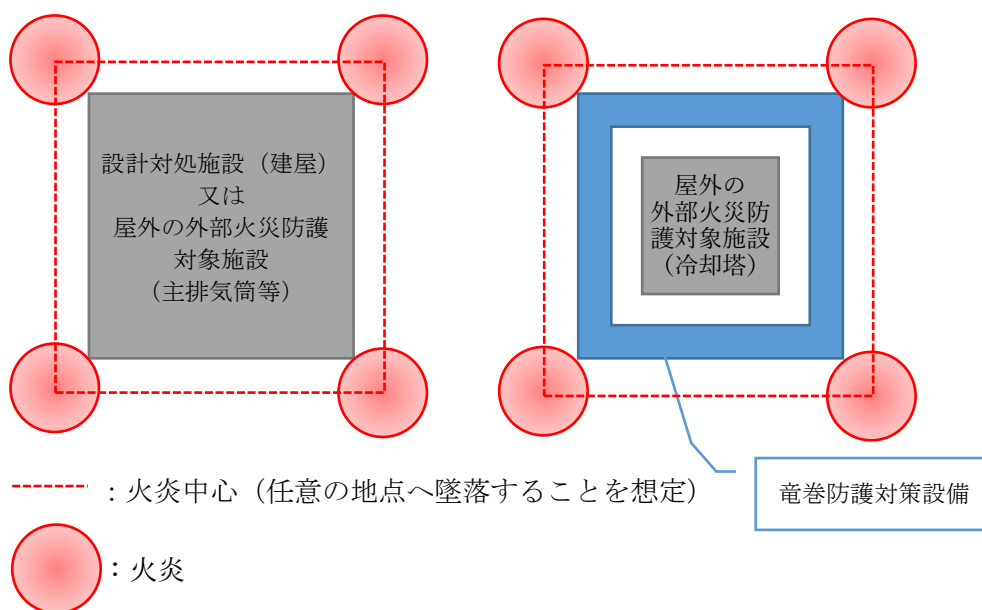
航空機墜落火災による建屋外壁の内部温度の変化を算出し、温度上昇により建屋内に収納する外部火災防護対象施設の安全機能を損なわないこと、建屋外壁が要求される機能を損なわないことを確認する。

6. 評価条件の設定

航空機墜落火災に対する評価条件を設定する。

6. 1 航空機墜落地点の設定

航空機の墜落地点については、建屋等の直近の熱影響が厳しいどのような地点への墜落した場合でも、安全機能を有する施設の安全機能を損なわない設計とすることから、第6-1図のように、屋外の外部火災防護対象施設又は設計対処施設に接する任意の位置に円筒火炎を設定する。



第6-1図 設計上想定する航空機の墜落地点のイメージ (平面図)

6. 2 航空機墜落火災と他の事象の組合せについて

航空機墜落火災と地震、竜巻及び火山の組み合わせについて考慮する必要があるかを検討する。検討にあたっては、航空機墜落火災と組合せを考慮する自然現象の年超過確率を評価し、重畳する年超過確率が十分低いことを確認する。

第6-1表に航空機墜落火災の年超過確率と組合せを考慮した自然現象の年超過確率を示す。

第6-1表 航空機墜落火災と組合せを考慮した自然事象の年超過確率

事象	年超過確率 (回/年)
航空機墜落火災	4.6×10^{-8}
地震	$10^{-4} \sim 10^{-6}$
竜巻	1.86×10^{-8}
火山	5.5×10^{-8}

各事象の年超過確率は十分低く、これらの事象について重畳を考慮する必要はない。

また、航空機墜落火災の発生後、その影響が及ぶ期間において、地震、竜巻及び火山の発生を考慮する必要があるかを検討する。

検討にあたっては、航空機墜落火災の影響が及ぶ期間において、これらの事象による影響を受ける年超過確率が十分低いことを確認する。

第6-2表に航空機墜落火災の影響が及ぶ期間内に地震、竜巻及び火山の影響を

受ける年超過確率を示す。

第6-2表 航空機墜落火災の影響が及ぶ期間中に地震、竜巻、火山が発生する確率

事象	発生確率 (回/年)
地震	1.26×10^{-14}
竜巻	4.28×10^{-16}
火山	6.93×10^{-16}

第6-2表に示す通り、航空機墜落火災の影響が及ぶ期間内に地震、竜巻及び火山の影響を受ける年超過確率は十分低く、考慮する必要はない。航空機墜落火災と他の自然現象の組み合わせに関する検討の詳細は別紙-2参照。

6. 3 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定

航空機墜落火災において、評価対象とする航空機を選定する。評価対象とする航空機は、以下の手順で対象を選定する。

- ①航空機落下評価ガイドの落下事故の分類を踏まえ、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する航空機から選定する。
- ②①のうち、外部火災ガイドに基づき、燃料積載量が最大の航空機と航空機墜落の発生する可能性が高い航空機を選定する
- ③②のうち、火災条件を同等に揃えた場合、施設への影響が大きい、燃焼時間が最も長い航空機を評価対象の航空機とする。

上記のステップで航空機を選定した結果、F-16を評価対象航空機として選定した。抽出過程の詳細は別紙-5参照。

6. 4 航空機墜落火災に対する防護設計の火災条件

「6. 3 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定」にて選定した評価対象航空機から、外部火災ガイドに基づき第6-3表のとおり航空機墜落火災における火災源のモデルを設定した。

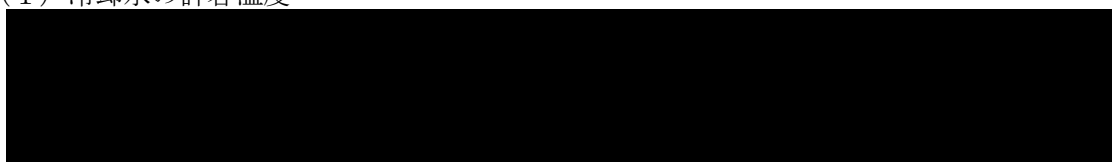
- ①航空機の墜落によって燃料に着火し、火災が起こることを想定する。
- ②気象条件は無風状態とする。
- ③火災は円筒火災をモデルとし、火災の高さは燃焼半径の3倍とする。
- ④半径が1.5m以上の場合で火災の高さを半径の3倍にした円筒火災モデルを採用する。

第6-3表 航空機墜落による火災源の設定

	設定条件	備考
対象航空機	F-16	
評価モデル	円筒火炎	外部火災ガイドによる
円筒半径[m]	5.4	燃料タンクの面積から算出
円筒高さ[m]	16.2	外部火災ガイドによる
燃焼時間[s]	1,400	積載燃料から算出

6. 5 許容温度の設定

(1) 冷却水の許容温度



(2) 鋼材の許容温度

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ことから、文献等を用いて設定した。

長期許容応力度相当を満足することで、航空機墜落火災において、防護対象施設が求められる機能は維持できるが、安全機能を有する冷却塔は、その施設の重要度を考慮し、より厳しい評価となるよう設計強度に影響を及ぼさない温度を許容温度として設定する。鋼材の許容温度の設定に関する考え方の詳細は別紙-2参照。

第6-4表に、設定した許容温度を示す。

第6-4表 設定した許容温度

施設	許容温度
安全上重要な施設	325°C
安全上重要な施設に波及的影響を及ぼし得る施設	450°C

(3) コンクリートの許容温度

「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」に基づき、常温時のコンクリートの強度が維持される温度（200°C）を許容温度として設定する。コンクリートの許容温度の設定に関する考え方の詳細は別紙-2参照。

7. 設計結果

7. 1 評価結果

(1) 冷却水温度



(2) 支持構造物

支持構造物が許容温度を満足することを確認するための離隔距離表を第7-1表に示す。離隔距離を満足していない部材は耐火被覆を施工する。

第7-1表 離隔距離表

7. 2 耐火被覆

(1) 耐火被覆の設計

耐火被覆は、火災の熱により数mm厚の塗膜が、火災時には数十倍に発泡して断熱層を形成し、鉄骨の倒壊を防ぐことを目的に開発された塗料である。

耐火被覆の設計に対する基本的な考え方を以下の通り。耐火被覆の詳細は別紙-7参照。

- ・耐火被覆は、第7-1表に示す板厚毎に評価した離隔距離を満足しない部材に対し、塗装することとする。
- ・ただし、火炎柱からの輻射が完全に遮断されている範囲については、塗装対象外とする（遮熱板の裏側等）。
- ・耐火被覆は、外部火災防護対象施設の有する安全機能を維持するために、許容温度に基づき設定した必要厚さを塗装する。

安全上重要な施設である冷却塔は3mm、波及的影響を考慮する飛来物防護ネットは2mmとする。塗装厚さの設定に関する詳細は別紙-8参照。

(2) 塗装対象範囲

冷却塔および飛来物防護ネットの塗装範囲図を第7-1図に示す。

耐火塗装は離隔距離を確保できない支持構造物及び防護板に施工する。また、竜巻防護ネットへの塗装にあたっては、ネットの作動に影響を与えない範囲に塗装する。

ネットの作動に影響を与えないこととするため、ネット自体への塗装はしない設計とする。航空機墜落火災が発生した場合にはネットの損傷が考えられるが、「7. 2 航空機墜落火災と他の事象の組み合わせ」で示した通り、ネットの保修に6か月を要したとしても、その期間内に竜巻の影響を受ける年超過確率は十分低い

ことを確認した。

(3) 施工管理

耐火塗装が設計通りの機能を発揮するためには、施工時の品質を確保しつつ、設定した厚さ以上の塗膜厚さを確保する設計とする。一方で耐震性能を担保するため、厚さに上限を設ける設計とする。

そのため、作業環境として温度や湿度の条件を定めるほか、塗膜厚さの測定管理方法を定めて施工することとする。

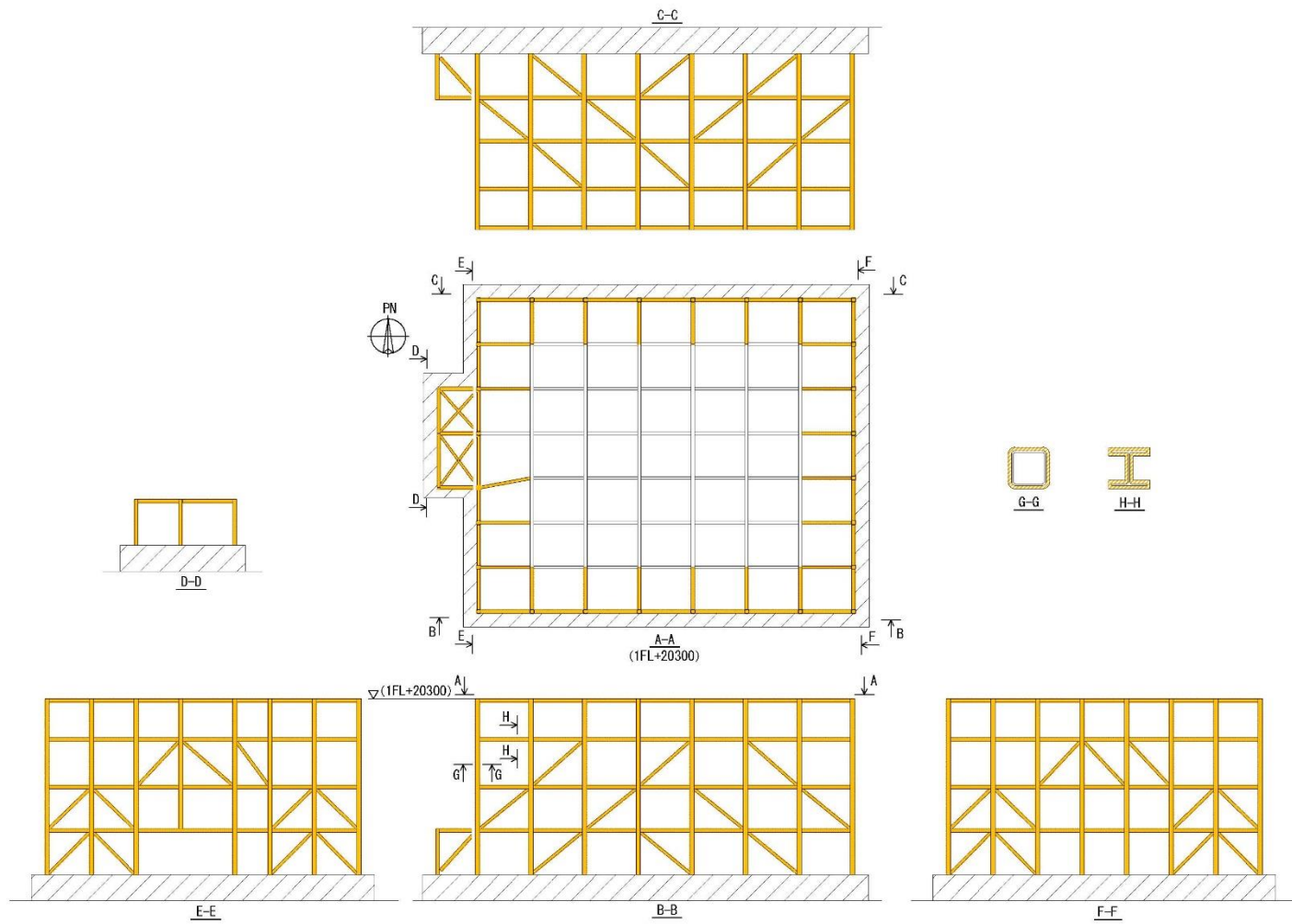
詳細を別紙-11に示す。

(4) 維持管理

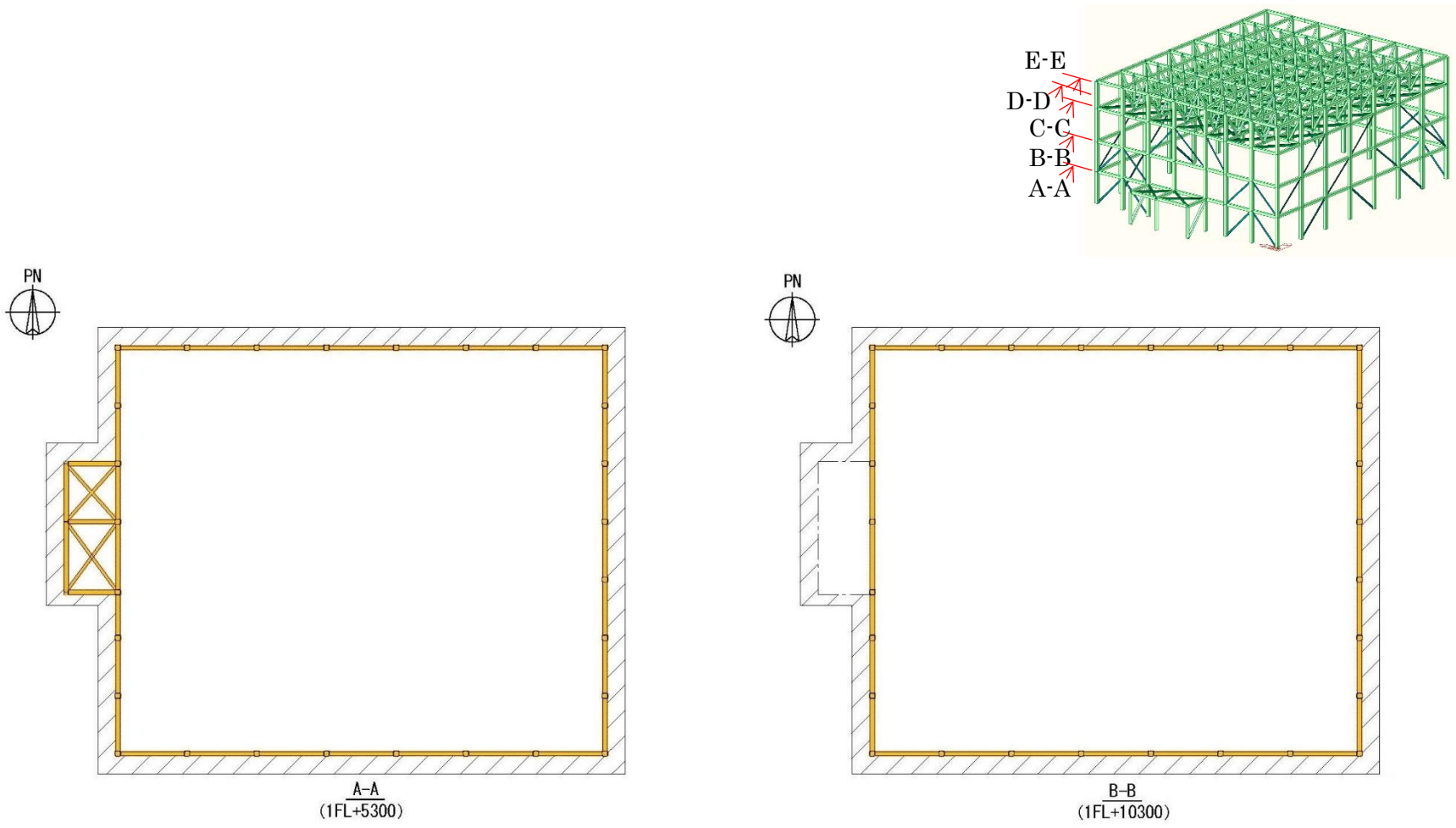
施工後に耐火被覆が設計通りの機能を維持するためには、耐火被覆の維持管理が重要となる。

耐火被覆の施工実績を調査した結果、耐火被覆特有の損傷事例は確認されていないことから、一般的な塗料における損傷事例とその原因を踏まえた、維持管理方法とする。

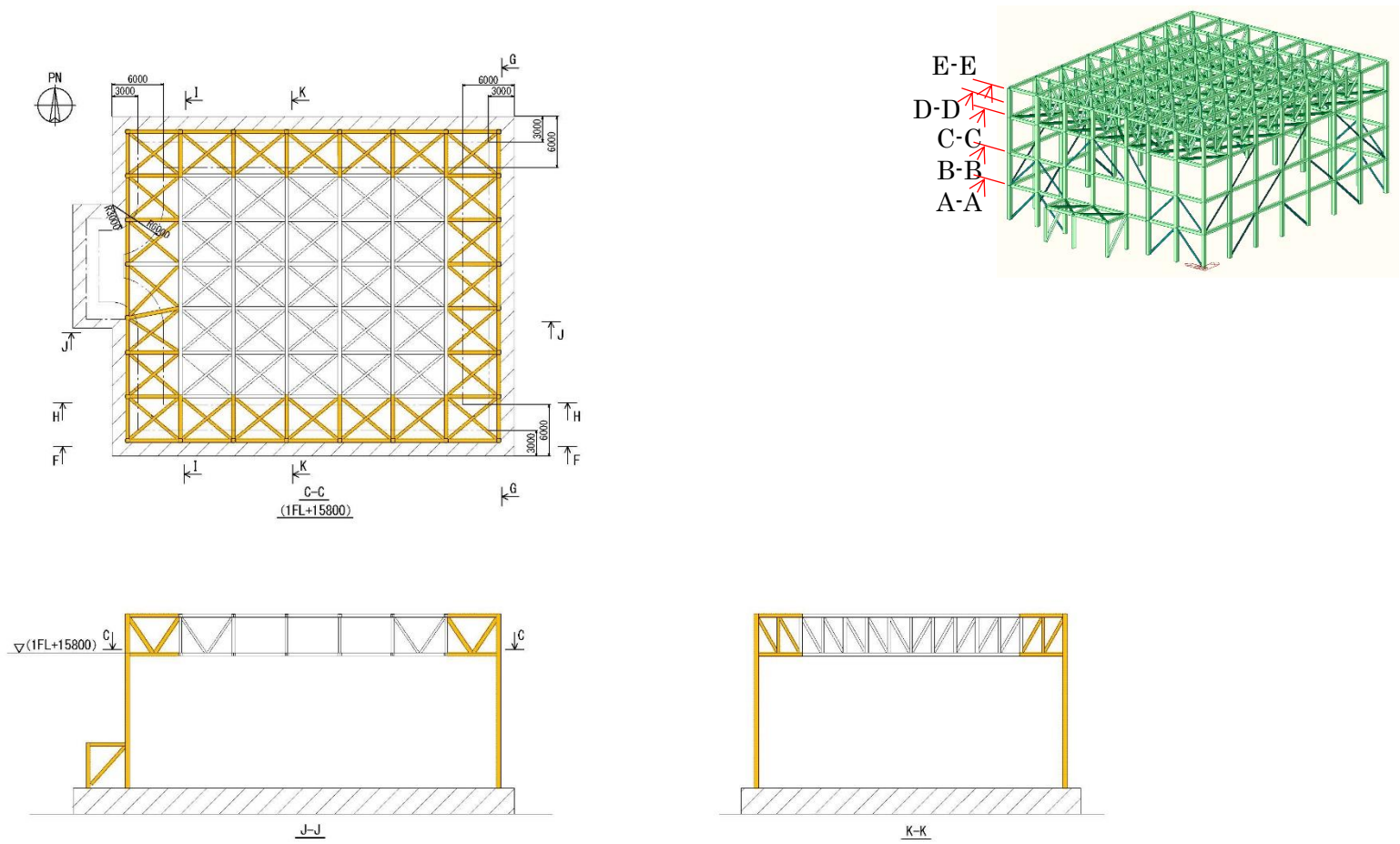
詳細を別紙-12に示す。



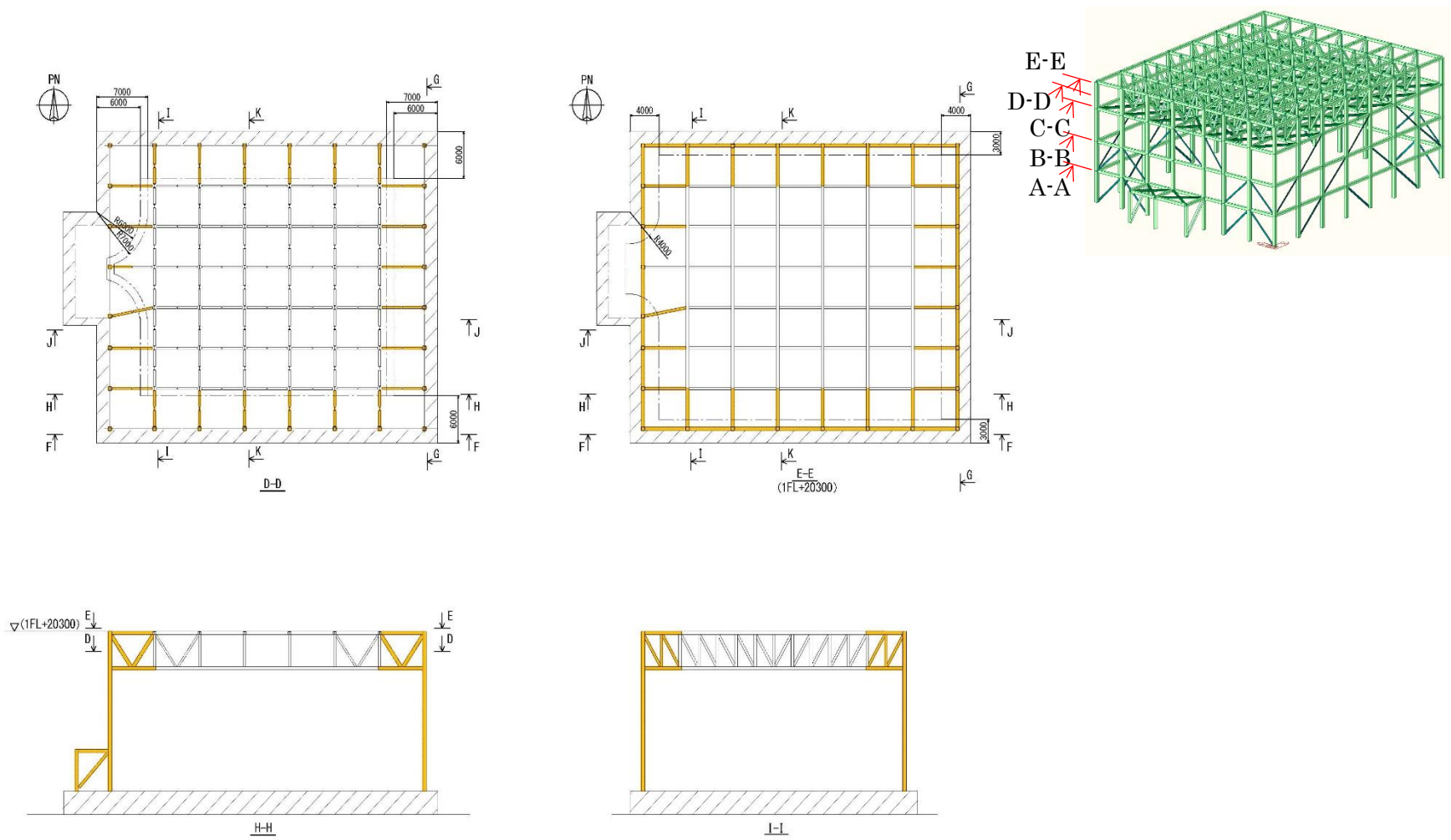
第6-1図 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット (1/4)



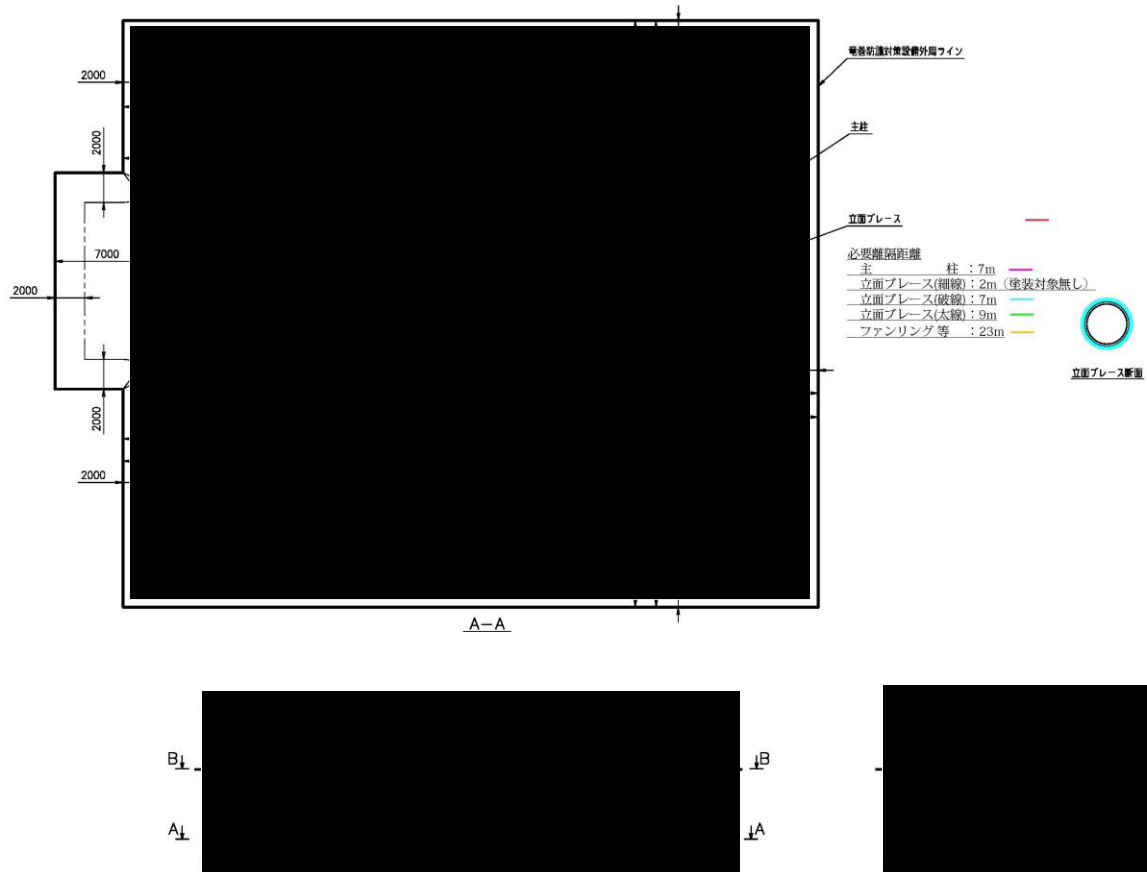
第6-2図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット (2/4)



第6-2図 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット (2/4)

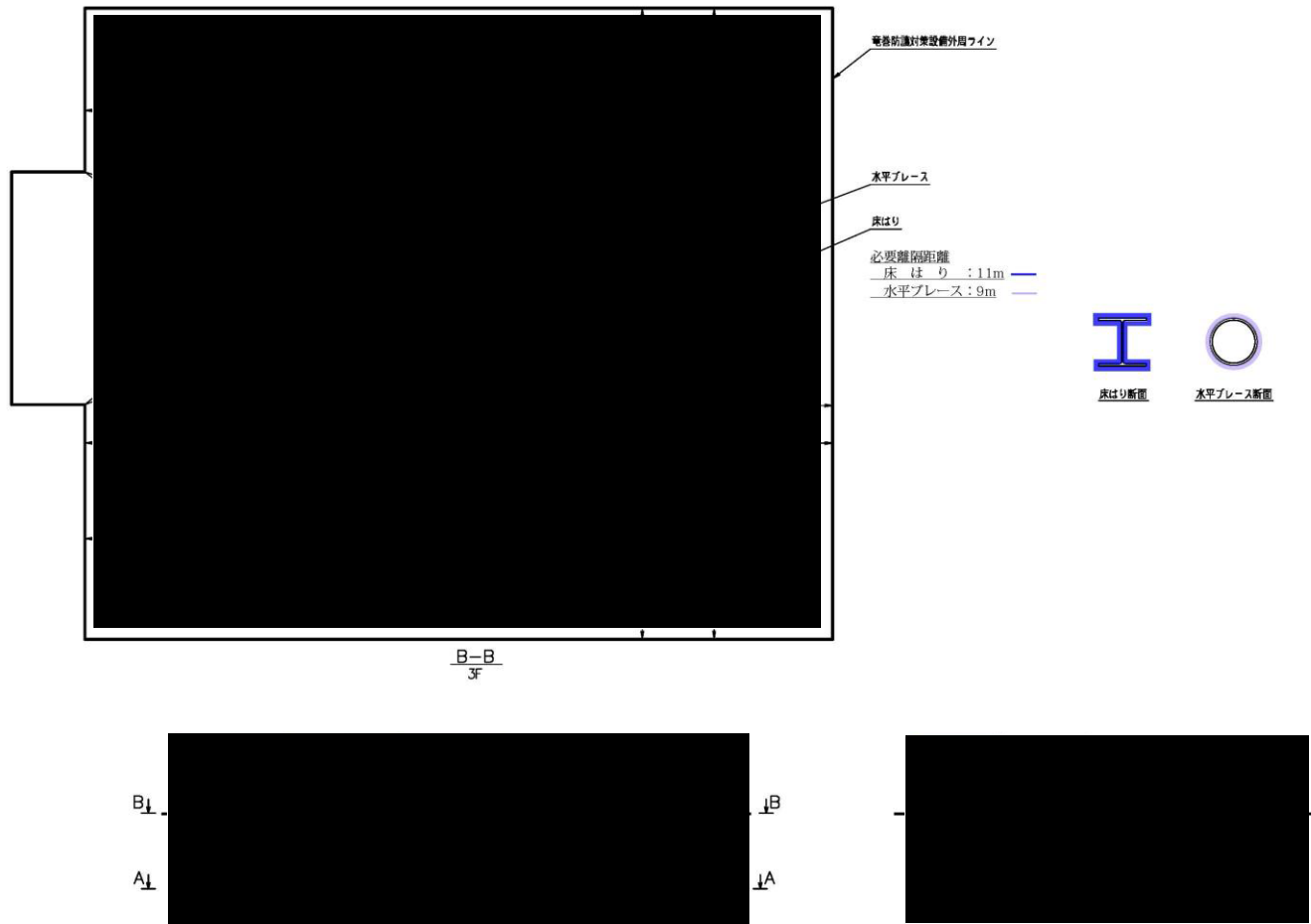


第6-4図 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット (4/4)



第7-5図 安全冷却水B冷却塔 (1/2)

外外火 04-16



第7-6図 安全冷却水B冷却塔 (2/2)

外外火 04-17

7. 3 遮熱板

(1) 遮熱板の設計の基本的な考え方

- ・防護対象部位に輻射が当たらないよう、斜め輻射も踏まえた範囲を設定する。
- ・冷却塔の冷却能力に影響を与えない範囲に設置する。

(2) その他

遮熱板の設計にあたっては、竜巻および地震により、安全機能の維持に必要な部位に影響を及ぼさない設計とする。

別紙

除外火 04 【航空機墜落による火災の防護設計について】

別紙				備考
資料 No.	名称	提出日	Rev	
別紙-1	評価対象部位の選定	6 / 4	0	
別紙-2	許容応力の考え方	6 / 4	0	
別紙-3	航空機墜落火災と他事象との重畳	6 / 4	0	
別紙-4	支持構造物の評価（離隔距離表の作成）	6 / 4	0	
別紙-5	冷却塔の評価	6 / 4	0	
別紙-6	建屋の評価	6 / 4	0	
別紙-7	評価対象航空機の選定	6 / 4	0	
別紙-8	耐火塗料の説明書	6 / 4	0	
別紙-9	耐火被覆厚さの設定の考え方	6 / 4	0	
別紙-10	対流熱伝達	6 / 4	0	
別紙-11	施工管理	6 / 4	0	
別紙-12	維持管理	6 / 4	0	
別紙-13				
別紙-14				
別紙-15				

令和3年6月4日 RO

別紙-1

評価対象部位の選定

目 次

1. 概要	1
2. 評価対象施設について	1
2. 1 安全冷却水B冷却塔	1
2. 2 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット	4
3. 評価対象部位の選定について	5
4. 評価対象部位の選定結果	5
4. 1 安全冷却水B冷却塔	5
4. 2 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット	10

1. 概要

本資料は、再処理施設の設計基準対象施設に対する評価対象部位の選定の方針について補足説明するものである。

ここでは、外部火災防護対象設備である安全冷却水B冷却塔及び安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネットに対し、航空機墜落による火災から防護する評価対象部位の選定について示す。

また、本資料は、第1回申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-4-3 外部火災防護における評価の基本方針」

2. 評価対象施設について

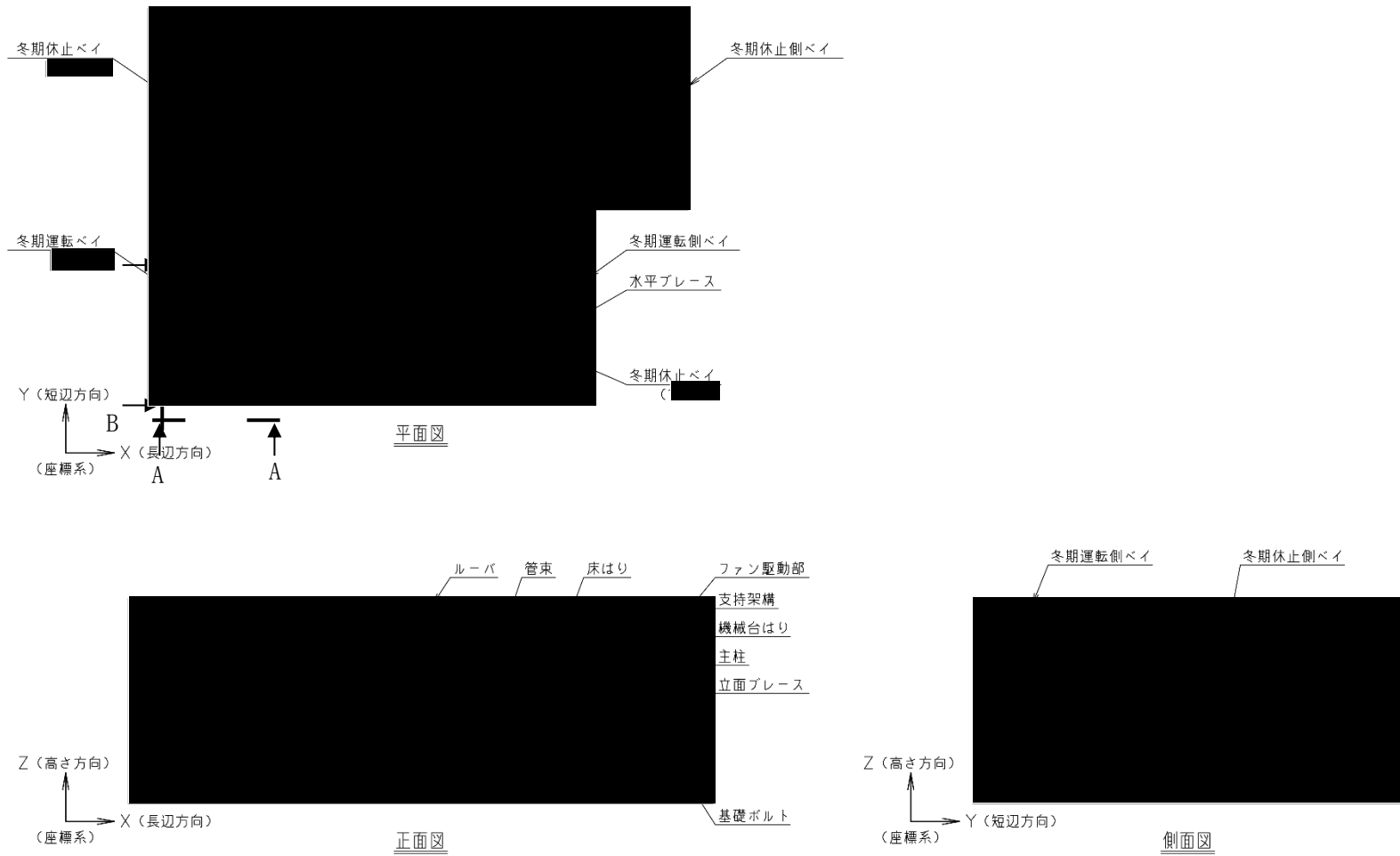
2. 1 安全冷却水B冷却塔

(1) 安全冷却水B冷却塔の機能について

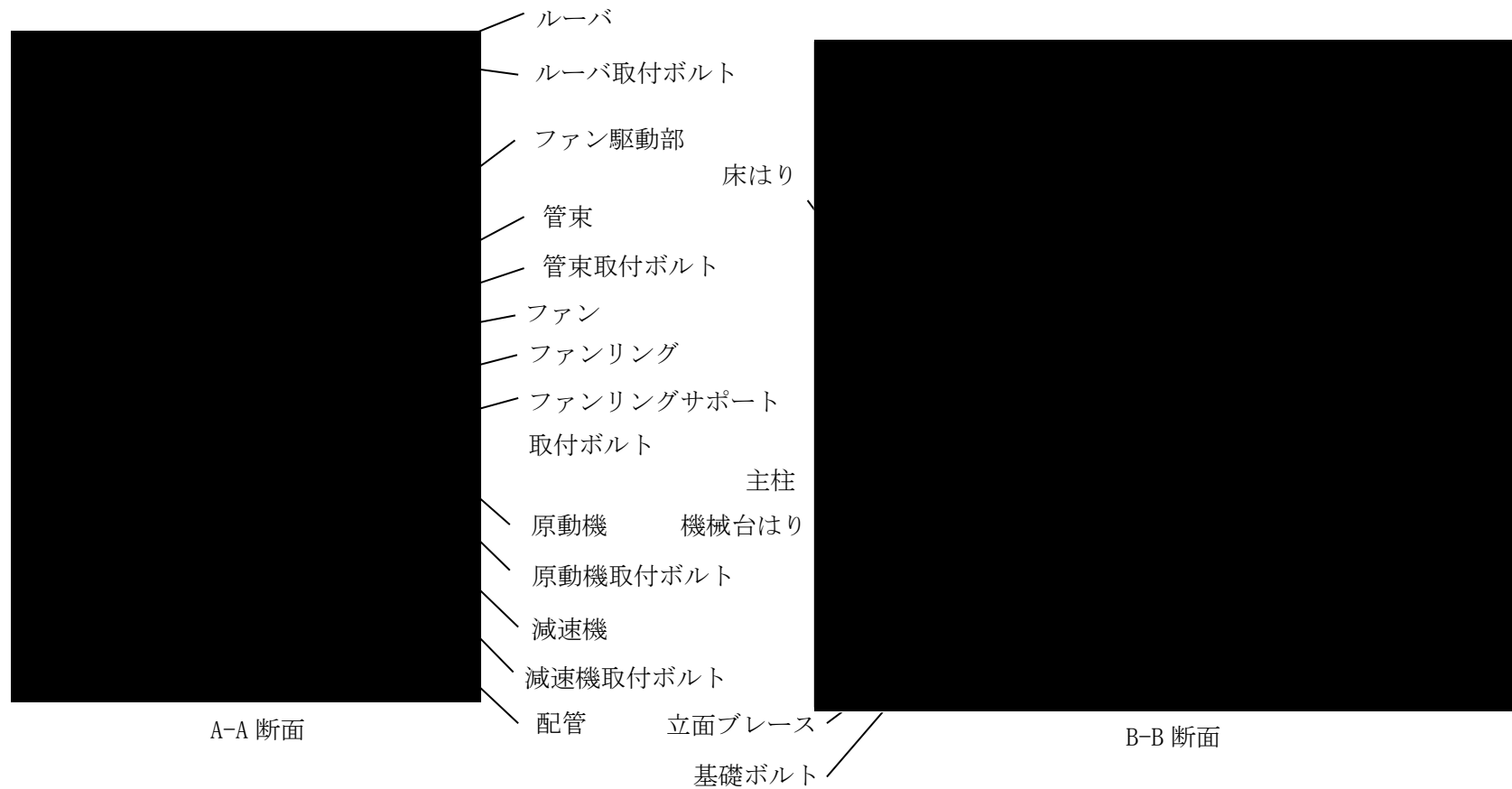
安全冷却水B冷却塔は、冷却水を除熱する設備であり、冷却水は崩壊熱により溶液が沸騰するおそれのある機器の崩壊熱を除去する機能を有しており、支持架構、ファン駆動部、管束及び配管により構成される。

(2) 安全冷却水B冷却塔の構造について

安全冷却水B冷却塔の概要図を第2-1図に示す。また、第2-1図に示したA-A、B-B断面について第2-2図に示す。



第2-1図 安全冷却水B冷却塔 概要図



第2-2図 安全冷却水B冷却塔 断面概要図

2. 2 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット

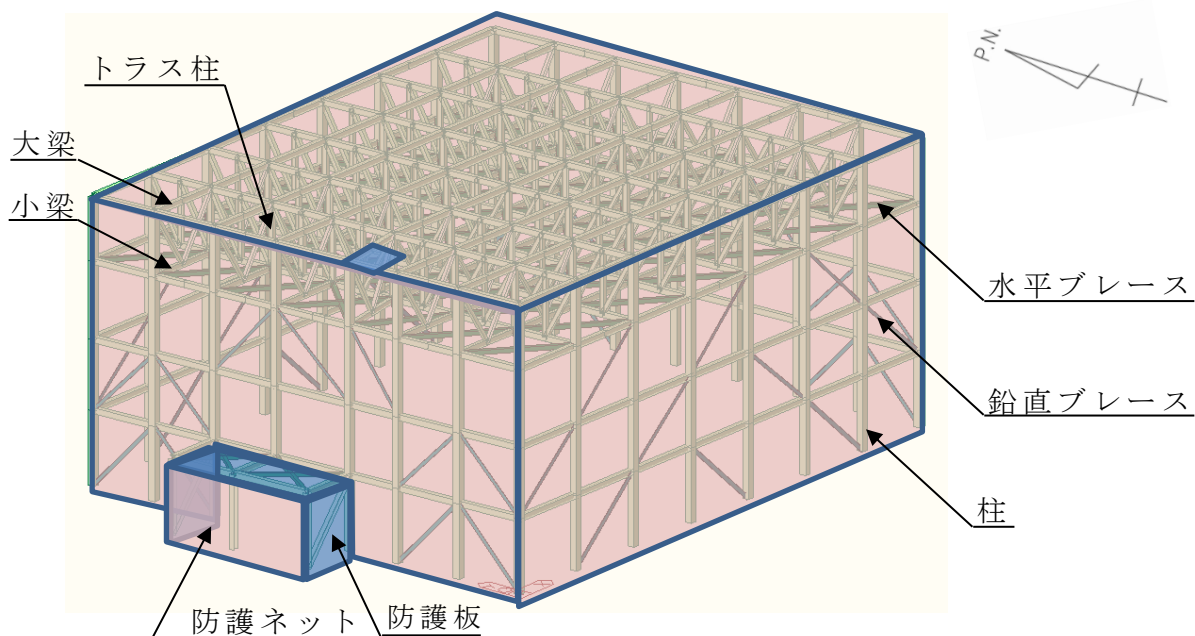
(1) 飛来物防護ネットの機能について

安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネットは、竜巻により発生する飛来物が安全冷却水B冷却塔に衝突することを防止する機能を有しており、防護ネット、防護板及びそれらを支持する支持架構で構成される。

安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネットは、安全冷却水B冷却塔に対して波及的影響を及ぼさない設計とする。

(2) 飛来物防護ネットの構造について

飛来物防護ネットの概要図を第2-3図に示す。



第2-3図 飛来物防護ネット 概要図

3 評価対象部位の選定について

また、冷却機能喪失に至らないことを確認するために、安全冷却水 B 冷却塔の配管の内部流体である冷却水を評価対象として選定する。

安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネットの評価対象は、それが損傷した場合に、冷却塔へ波及的影響を及ぼし得る部位のうち、遮熱板や他の部位により遮蔽されず、輻射を受熱する部位を選定する。

4 評価対象部位の選定結果

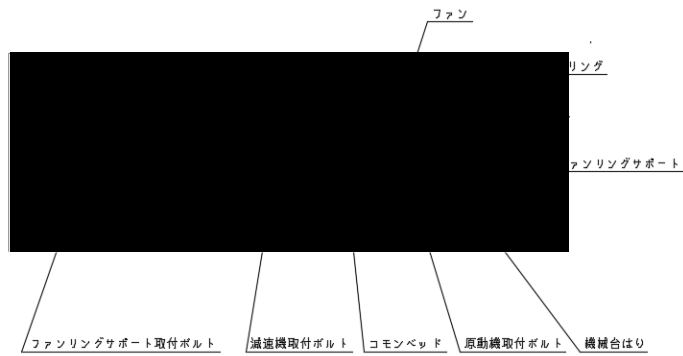
4. 1 安全冷却水 B 冷却塔

a. 支持架構

支持架構は、支柱，床はり，機械台はり，立面ブレース，水平ブレース及び基礎ボルトにより構成されている。(第 2-1 図参照)

b. ファン駆動部

ファン駆動部構造図を第 4-1 図に示す。また、ファン駆動部の評価対象部位の選定理由を第 4-1 表に示す。



第 4 - 1 図 ファン駆動部構造図

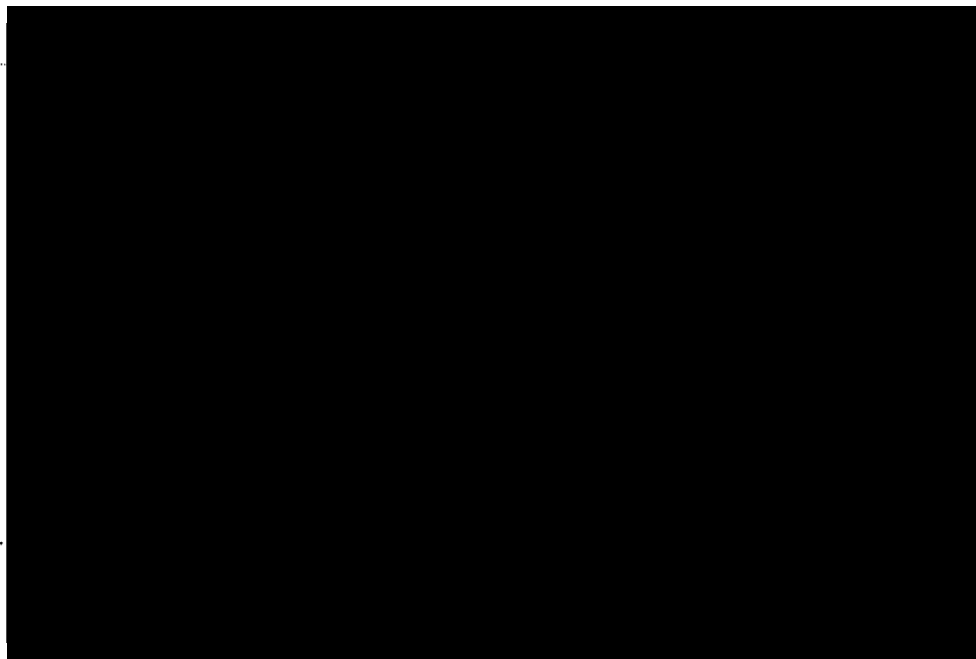
第 4 - 1 表 ファン駆動部の評価対象の選定

部位	評価対象の選定
ファンリング	
ファン	
減速機	
原動機	

※熱影響を受けることが明らかであり，耐火被覆又は遮熱板による防護対象とする場合を含む。

c. 管束

管束構造図を第4-2図に示す。また、管束の評価対象部位の選定理由を第4-2表に示す。



第4-2図 管束構造図

第4-2表 管束の評価対象の選定

部位	評価対象の選定
チューブサポ ート	[Redacted]
伝熱管	
管束フレーム	
ヘッダー	

※熱影響を受けることが明らかであり、耐火被覆又は遮熱板による防護対象とする場合を含む。

d. 配管

配管及び冷却水の評価対象部位の選定理由を第4-3表に示す。

第4-3表 配管の評価対象の選定

部位	評価対象の選定
配管	
冷却水 (配管の内部流体)	

e. まとめ

安全冷却水B冷却塔の評価対象部位の選定結果一覧を第4-4表に示す。

第4-4表 安全冷却水B冷却塔 評価対象の選定

機器	部位	評価対象	選定理由	評価内容・防護設計
支持架構	・主柱 ・床はり, 機械台はり ・水平ブレース, 立面ブレース ・基礎ボルト	○	[Redacted]	[Redacted]
ファン駆動部	ファンリング	○		
	ファン	○		
	原動機	○		
	減速機	○		
管束	フレーム	○		
	チューブサポート	—		
	伝熱管 (フィンチューブ)	—		
	ヘッダー	—		
配管	配管	—		
	冷却水 (配管の内部流体)	○		

<凡例> ○：評価対象部位，—：評価対象外

4. 2 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット

a. 支持架構

支持架構は、柱、梁（大梁、小梁）、トラス柱、鉛直ブレース、水平ブレースにより構成されている。

支持架構を構成する部位が損傷した場合、冷却塔へ波及的影響を及ぼすおそれがあることから、評価対象とする。

b. 防護ネット

航空機墜落火災により防護ネット自体が損傷したとしても、支持架構が健全であれば安全冷却水 B 冷却塔への波及的影響はないことから、評価対象外とする。

c. 防護板

支持架構天面に設置する防護板は、補強材を設けていること及び支持架構に支持されており、支持架構が健全であれば安全冷却水 B 冷却塔への波及的影響はないことから、評価対象外とする。

d. まとめ

安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネットの評価対象部位の選定一覧を第4-5表に示す。

第4-5表 飛来物防護ネット 評価対象部位の選定

機器	部位	評価対象	選定理由
支持架構	柱	○	損傷した場合、安全冷却水 B 冷却塔へ波及的影響を及ぼすおそれがあることから、評価対象とする。
	梁（大梁、小梁）		
	トラス柱		
	鉛直ブレース		
	水平ブレース		
防護ネット	—	—	防護ネットと防護板は支持架構に支持されており、支持架構が健全であれば安全冷却水 B 冷却塔への波及的影響はないため、評価対象外とする。
防護板	—	—	

<凡例> ○：評価対象部位，—：評価対象外

令和3年6月4日 RO

別紙-2

許容温度の考え方

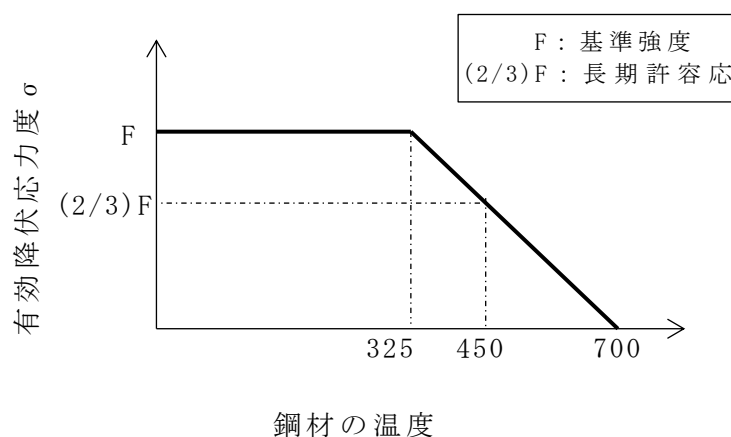
目 次

1. 鋼材の許容温度の設定の考え方…………… 1
2. コンクリートの許容温度…………… 2

1. 鋼材の許容温度の設定の考え方

一般的に、鋼材は温度上昇に伴い強度が低下する。しかし、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1-1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1-1図 鋼材の高温時の有効降伏応力度

航空機墜落火災と短期荷重の影響を考慮する必要のある自然事象の重畳は考慮する必要はないことから、長期許容応力度相当の強度を保つことができれば、航空機墜落火災時においても外部火災防護対象施設の機能維持や波及的影響を考慮すべき施設に求められる機能を維持することが可能となる。

建築基準法施行令第90条によれば、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、第9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°Cとなることから、450°Cを許容温度の基本として設定する。

一方、安全上重要な施設は、その施設の重要度を考慮し、より厳しい評価となるよう設計強度に影響を及ぼさない温度を許容温度として設定する。第1-1図からは、鋼材の強度に影響を及ぼ

さないよう、有効降伏応力度が常温時と変わらない強度を有する温度は 325℃となる。また、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。これらを踏まえ、安全上重要な施設は保守的に 325℃を許容温度として設定する。

第 1 - 1 表に、設定した許容温度を示す。

第 1 - 1 表 設定した許容温度

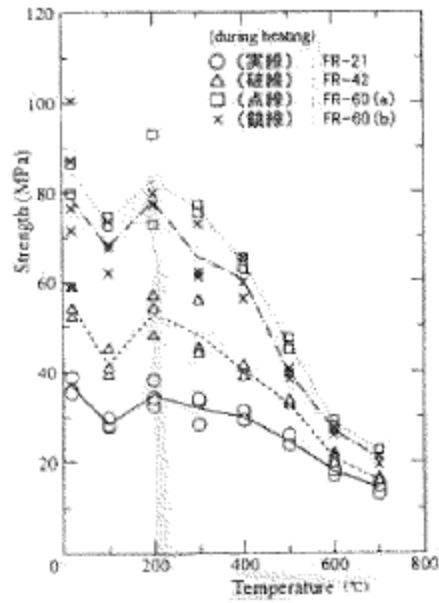
施設	許容温度
安全上重要な施設	325℃
安全上重要な施設に波及的影響を及ぼし得る施設	450℃

- [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

2. コンクリートの許容温度

「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」に基づき，常温時のコンクリートの強度が維持される温度（200℃）を許容温度とする。

温度変化によるコンクリートの圧縮強度の低下については，常温から 100℃でやや圧縮強度が低下しているものの，200℃では常温とほぼ同じ強度まで回復し，その後温度の上昇とともに圧縮強度が低下している。これより建屋の強度に対する許容温度については，コンクリート外壁表面温度 200℃とした。温度変化によるコンクリートの圧縮強度の低下を第 2 - 1 図に示す。



出典：高温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 163-168 1999年1月)

第2-1図 温度変化によるコンクリート圧縮強度の低下

令和3年6月4日 RO

別紙-3

航空機墜落火災と他事象との重畳

目 次

1. 耐火被覆厚さの設計について…………… 1
2. 航空機墜落火災の影響が及ぶ期間における他の自然現象の組み合わせについて…… 1

1. 航空機墜落火災と他の自然現象の組み合わせについて

航空機墜落火災と他の自然現象の組み合わせについては、各事象の発生頻度、施設に及ぼす影響モード等を考慮して設定するのが基本である。したがって、年超過確率がごく低頻度である事象に対して、同じくごく低頻度の事象が同時に発生することを考える必要はない。航空機墜落火災の年超過確率は航空機墜落の年超過確率と同等とすると 4.6×10^{-8} 回/年、地震の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 回/年、竜巻の年超過確率は、 1.86×10^{-8} 回/年、火山の年超過確率は 5.5×10^{-6} 回/年であることから、これらの事象の同時発生は考慮する必要はない。

2. 航空機墜落火災の影響が及ぶ期間における他の自然現象の組み合わせについて

航空機墜落火災の発生後、その影響が及ぶ期間において、ごく低頻度の事象が発生することについて検討する。

航空機墜落火災が発生しても、その継続時間は 1400 秒（約 24 分）であり、時間の経過とともに支持架構の温度は常温に戻り、強度も元通りの状態となることから、地震、火山によって安全冷却水 B 冷却塔の安全機能を損なうことはなく、飛来物防護ネットが安全冷却水 B 冷却塔に波及的影響を及ぼすこともない。仮に航空機墜落火災が発生してから安全冷却水 B 冷却塔及び飛来物防護ネットの支持架構が常温に戻るまでに 1 日程度の時間を要するとしても、航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に地震又は火山の影響がもたらされる年超過確率は以下のとおりであり、その可能性は十分に小さい。

- ・（航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に地震が発生する年超過確率）
＝（航空機墜落確率）×（1 年のうち航空機墜落火災の影響が及ぶ期間の比率）×（地震の年超過確率）

$$= 4.6 \times 10^{-8} \times \frac{1}{365} \times 1 \times 10^{-4}$$

$$= 1.26 \times 10^{-14}$$

- ・（航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に火山の影響が発生する年超過確率）
＝（航空機墜落確率）×（1 年のうち航空機墜落火災の影響が及ぶ期間の比率）×（火山の年超過確率）

$$= 4.6 \times 10^{-8} \times \frac{1}{365} \times 5.5 \times 10^{-6}$$

$$= 6.93 \times 10^{-16}$$

次に、航空機墜落火災が発生した場合で、飛来物防護ネットのネット部分の損傷により、飛来物に対する防護機能が損なわれる場合を想定する。1回の航空機墜落火災によって影響を受けるネットは数枚～十数枚程度と考えられるため、その復旧に6か月程度を要すると仮定すると、その期間に竜巻が発生する年超過確率は以下のとおりであり、その可能性は十分に小さい。

- ・（航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に竜巻の影響が発生する年超過確率）

$$= (\text{航空機墜落確率}) \times (1\text{年のうち航空機墜落火災の影響が及ぶ期間の比率}) \times (\text{竜巻の年超過確率})$$

$$= 4.6 \times 10^{-8} \times \frac{6}{12} \times 1.86 \times 10^{-8}$$

$$= 4.28 \times 10^{-16}$$

以上のことから、航空機墜落火災の発生後、その影響が及ぶ期間において地震、竜巻または火山の事象が発生することを考慮する必要はない。

令和3年6月4日 RO

別紙-4

支持構造物の評価（離隔距離表の作成）

目 次

1. 支持構造物の評価の方針について	1
2. 必要離隔距離を算出する際の代表形状	1
3. 必要離隔距離の算出条件	2
4. 必要離隔距離の算出方法	3
4. 1 輻射強度の算出	3
4. 2 必要離隔距離の算出	5
5. 必要離隔距離の算出結果	7

1. 支持構造物の評価の方針について

許容温度を超える部材に対しては、耐火被覆又は遮熱板による防護対策を施すが、防護対策の範囲を特定するにあたり、航空機墜落火災による円筒火炎に対して鋼材の板厚毎に許容温度以下となる離隔距離（「必要離隔距離」という）を算出することとする。

必要離隔距離の算出は、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主要な形状、材質及び板厚を踏まえ、保守的な代表形状の選定、評価条件を設定し実施する。

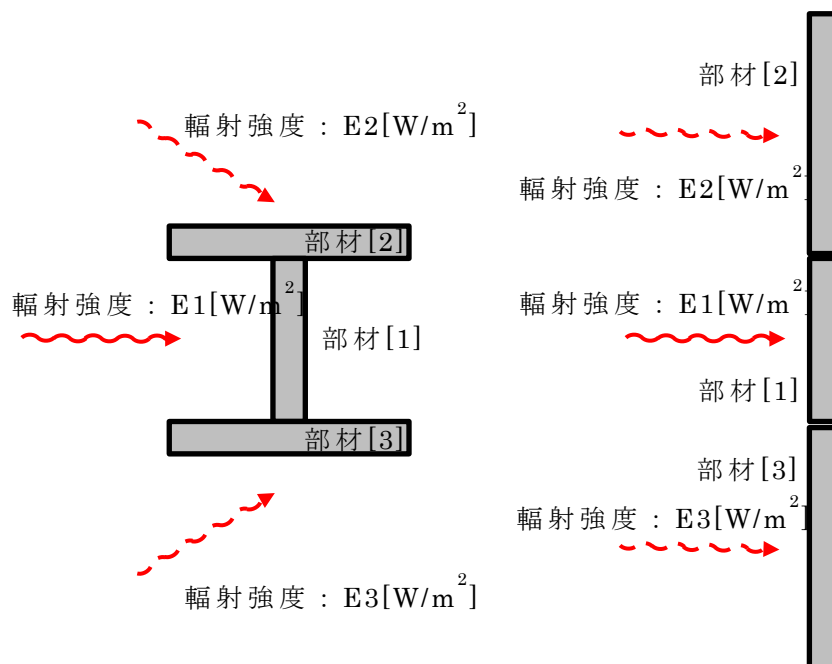
2. 必要離隔距離を算出する際の代表形状

必要離隔距離を算出する上で、形状は評価結果に大きな影響を与えるため、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。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平板、角管、円管及びH鋼形状代表となる形状を選定する。

同じ板厚で温度上昇が最大となる形状を考えた場合、熱容量が最も少なく、かつ、入熱面積に対して放熱面積が等価となる平板が代表となる。一方でH鋼や角形鋼などは斜め輻射の影響を受けることとなる。そこでH鋼を例に斜め輻射の影響を整理した。

H鋼に入射する輻射は第2-1図の左図のように、火炎柱から発生する輻射のうち受熱面を見込むすべての輻射を合成した輻射強度 E_1 、斜め方向からの輻射成分のみの輻射強度 E_2 、 E_3 となる。この場合、 $E_1 < E_2$ 及び E_3 の関係となる。そのため、H鋼を右図のように展開し、平板として考えると、輻射強度の関係から部材[1]から部材[2]及び部材[3]への温度勾配が発生することとなり、平板を E_1 で評価した場合と比べて平板の温度は低下することとなる。この考え方は角管、円管においても同様となる。

以上のことから、平板で代表することによりH鋼、角管及び円管も保守的に評価することができる。



第 2 - 1 図 代表形状の考え方

3. 必要離隔距離の算出条件

第 3 - 1 表から第 3 - 3 表に, 必要離隔距離の算出に必要な条件を示す。

第 3 - 1 表 支持構造物の部材の条件

項目	条件	備考
形状	平板	
材質	炭素鋼, ステンレス鋼	
板厚 (炭素鋼) [mm]	36, 28, 22, 19, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 6.5, 6.4, 6, 4.5, 3.91, 3.9, 3.2, 2.3, 2.11, 1.2	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 材を調査した結果から
板厚 (ステンレス鋼) [mm]	20, 16, 12, 9	

第 3 - 2 表 輻射強度算出条件

項目	記号	数値	備考
輻射発散度 [W/m ²]	<i>Rf</i>	58,000	「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） [W/m ²]	<i>Es</i>	400	
低減率	ϵ	1	
燃焼面積 [m ²]	<i>A_b</i>	90	

第 3 - 3 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[°C]	<i>Tc0</i>	50	
周囲雰囲気温度[°C]	<i>Ta</i>	29	
燃焼時間[s]	<i>t</i>	1,400	

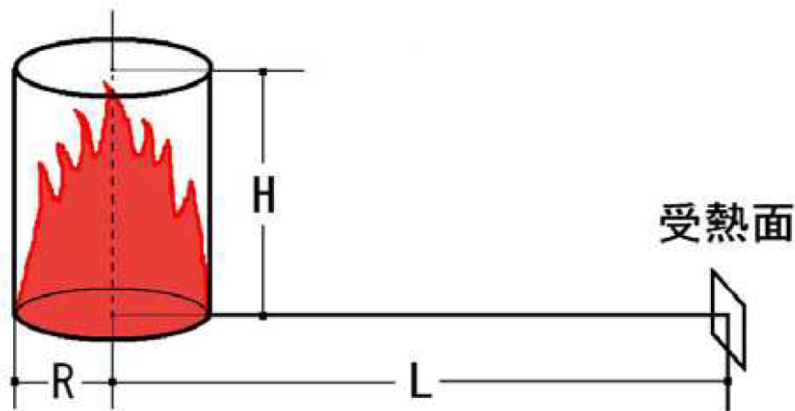
4. 必要離隔距離の算出方法

4. 1 輻射強度の算出

航空機墜落火災における輻射強度を算出するため、評価モデルを設定する。評価モデルは、外部火災ガイドに基づき、以下のとおり設定する。

- ・航空機墜落による火災は、円筒火炎を生ずるものとすることから、円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は、航空機の燃料タンクの投影面積に等しいものとする。
- ・航空機は、燃料を満載した状態を想定する。

形態係数及び輻射強度の算出は、外部火災影響評価ガイドと同様に受熱面が輻射帯の底部と同一平面状にあると仮定し実施する。航空機墜落による火災の想定模式図を第 4 - 1 図に示す。



受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

第4-1図 航空機墜落による火災の想定模式図

a. 形態係数の算出

輻射強度を求める際に必要となる形態係数は、外部火災ガイドを参考として下式より算出する。

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

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)

上記の形態係数の算出式は、想定する火炎柱から発生する輻射のうち受熱面を見込む全ての輻射を、水平方向からの輻射として保守的に評価できるものである。

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、下式より算出する。

後述する4.2の必要離隔距離の評価においては、任意の距離を入力とした下式から導出される輻射強度を用いる。

$$E = Rf \cdot \phi$$

ここで、

E : 輻射強度 (W/m^2)

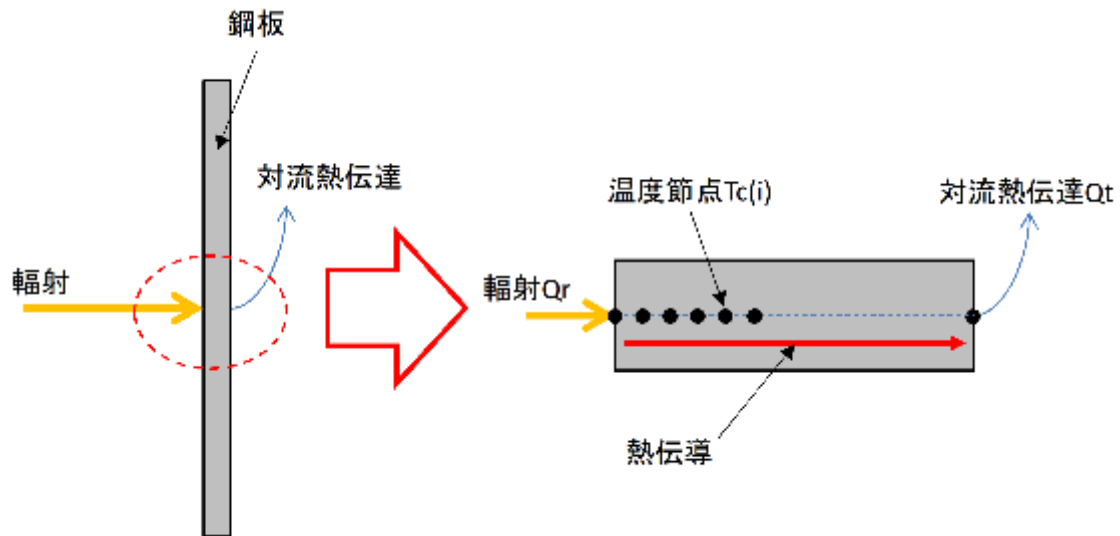
Rf : 輻射発散度 (W/m^2)

ϕ : 形態係数 (-)

4. 2 必要離隔距離の算出

任意の距離に応じた輻射強度を考慮し、部材の材質及び板厚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。

計算モデルを第4-2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4-2図 計算モデル

(輻射)

$$Qr = E \cdot A$$

ここで、

Qr : 火炎からの輻射熱伝達 [W]

E : 輻射強度 [W/m^2]

A : 対象鋼板の面積 [m^2] (=1 単位面積)

(対流熱伝達)

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

ここで、

A : 対象鋼板の面積 [m²] (=1 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)
 $Tc(i)$: 平板の温度 [°C] 節点 i , 節点数 N
 Ta : 周囲雰囲気温度 [°C] (=29)

(平板の温度)

$i=1$ (表面温度)

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

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

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

$i=2 \sim N-1$ (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]
 A : 対象鋼板の面積 [m²] (=1 単位面積)
 Qt : 裏面での対流熱伝達 [W]
 $Tc(i)$: 平板の温度 [°C] 節点 i , 節点数 N
 Q : 区分区間への熱量 [W]
 λ_c : 鋼板の熱伝導率 [W / (m · K)]

ρc : 鋼板の密度 [k g / m³]

Cc : 鋼板の比熱 [J / (k g · K)]

Lc : 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] (i=1~N)

dt : ステップ間隔 [s] (=0.01)

5. 必要離隔距離の算出結果

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主要な材質及び板厚並びに保守的な代表形状を設定し算出した、必要離隔距離の結果を第5-1表に示す。

第5-1表 必要離隔距離の算出結果

材料	板厚 (mm)	必要離隔距離(m)	
		安全上重要な 施設	波及的影響を 及ぼし得る施設
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	8
	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	20	15	
2.3	23	16	
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

令和3年6月2日 RO

別紙-5

冷却塔の評価

目 次

1. 目的	1
2. 冷却水の温度上昇の算出	1
2. 1 評価条件	1
2. 2 評価結果	2

1. 目的

航空機墜落火災による再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B（以下「冷却塔」という。）へ通水している冷却水の温度上昇について評価し、冷却塔の崩壊熱除去機能へ影響を及ぼさないことを確認する。

2. 冷却水の温度上昇の算出

2. 1 評価条件

(1) 熱影響評価の対象航空機

熱影響評価の対象とする航空機は、熱影響が厳しい F-16 を選定する。

(2) 燃焼半径の算出

円筒火災モデルとして評価を実施するため、燃焼半径は燃焼面積を円筒の底面と仮定して（1）式から算出する。算出結果を第 2-1 表に示す。

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \dots (1)$$

ここで、 R ：燃焼半径（m）

S ：燃焼面積（ m^2 ）

(3) 形態係数の算出

以下の条件において（2）式から形態係数を算出する。計算モデルの概略を第 2-1 図及び第 2-2 図に示す。また、算出結果を第 2-2 表に示す。

- ・受熱面の姿勢は、鉛直受熱面とする。
- ・受熱面の高さは、形態係数が最大となる火柱の中央高さで代表する。
- ・冷却塔本体による遮熱は考慮しない。
- ・火炎に近い母管位置において、それぞれの中央位置までの離隔から形態係数を求め、それらの平均値を温度評価に用いる。

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

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

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)

(4) 輻射強度の算出

(3)で求めた形態係数を用いて(3)式より輻射強度 E を算出する。
なお、輻射強度 E の算出に当たっては保守的な評価となるように太陽輻射を加えた。算出結果を第2-2表に示す。

$$E = Rf \times \phi + E_0 \dots (3)$$

ここで、 E : 輻射強度 (W/m²)

Rf : 輻射発散度 (W/m²)

ϕ : 形態係数

E_0 : 太陽の影響による輻射強度 (W/m²)

(5) 冷却水温度の算出

通常運転中の冷却水出口温度に対して、火炎からの輻射による冷却水温度の上昇を以下の(4)式により算出する。また、計算に用いた諸元を第2-3表に示す。

$$\Delta T = \frac{E \times A}{C_p \times \rho \times G} \dots (4)$$

ここで、 ΔT : 火炎からの輻射による出口温度上昇 (K)

E : 火炎からの輻射強度 (W/m²)

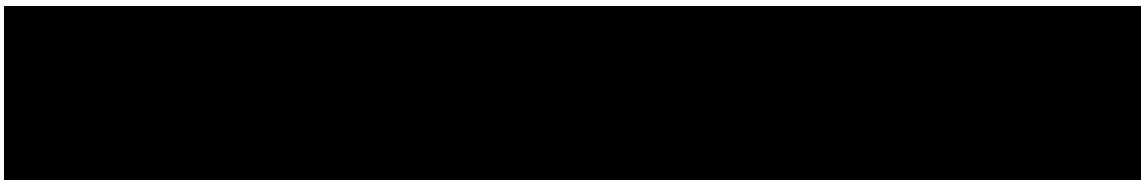
A : 配管の受熱面積 (m²)

G : 冷却水流量 (m³/s)

ρ : 冷却水密度 (kg/m³)

C_p : 冷却水比熱 (J/kg・K)

2.2 評価結果



第 2 - 1 表 対象航空機，燃焼面積及び燃焼半径

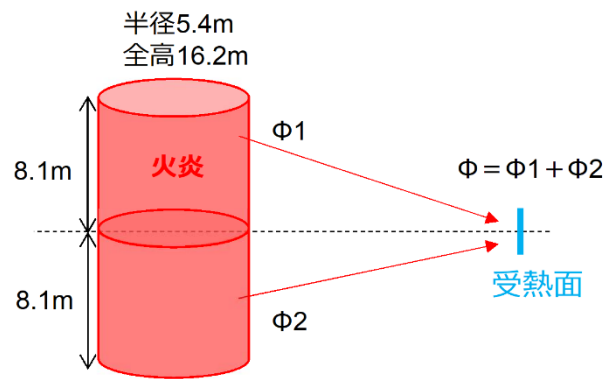
対象航空機	燃焼面積 (m^2)	燃焼半径 (m)
F - 1 6	約 90	5.4

第 2 - 2 表 形態係数及び輻射強度の算出結果

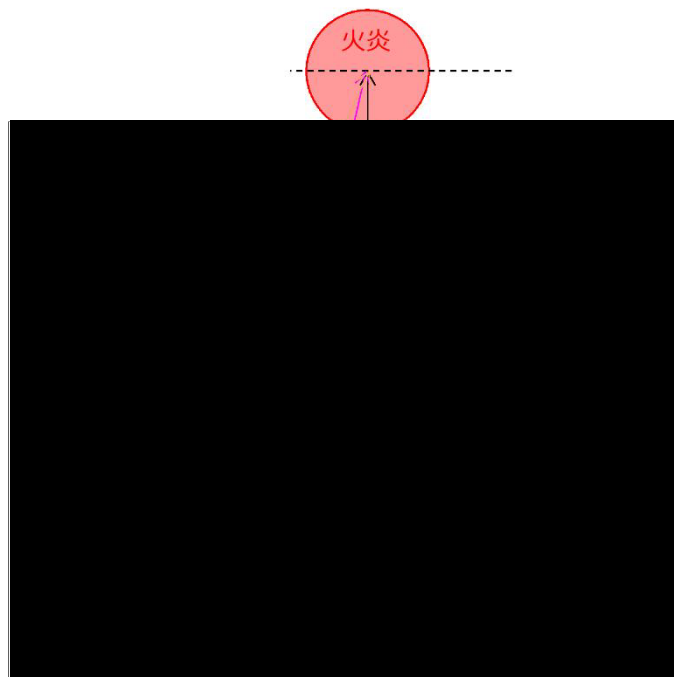
形態係数 (-)	輻射発散度 (W/m^2)	太陽の影響による輻射強度 (W/m^2)	輻射強度 (W/m^2)
0.091	58,000	400	5678

第 2 - 3 表 熱影響評価に用いた諸元

項目	数値
配管の受熱面積 (m^2)	
冷却水流量 (m^3/s)	
冷却水密度 (kg/m^3)	
冷却水比熱 ($J/(kg \cdot K)$)	



第 2 - 1 図 火炎と受熱面の高さ



第 2 - 2 図 形態係数を求める母管位置

令和3年6月4日 RO

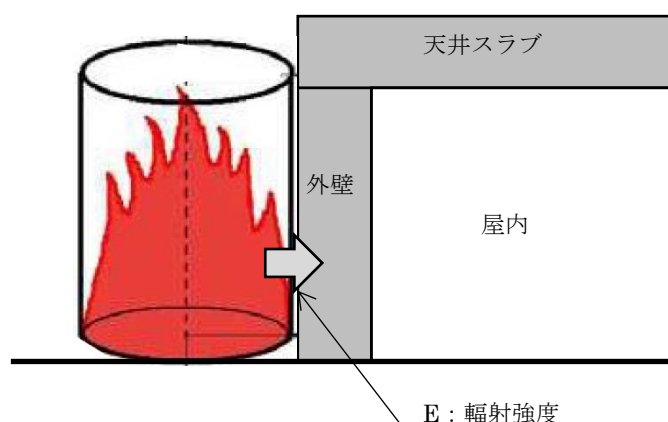
別紙-6
建屋の評価

目 次

1. 建屋外壁の熱影響評価	1
2. 外壁に許容温度を超える領域がある場合の評価	1
2. 1 評価条件	1
2. 2 外壁に許容温度を超える領域がある場合の評価	4
3. 評価結果	4

1. 目的

設計対処施設のうち外部火災防護対象施設を収納する建屋（以下「対象建屋」という。）については、航空機の墜落地点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、火炎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1-1図に示す。



第1-1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建屋内に収納する外部火災防護対象施設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設計となっていることを確認する。

2. 建屋外壁の熱影響評価

2.1 評価条件

(1) 熱影響評価の対象航空機

熱影響評価の対象とする航空機は、熱影響が厳しいF-16を選定する。

(2) 燃焼半径の算出

円筒火災モデルとして評価を実施するため、燃焼半径は燃焼面積を円筒の底面と仮定して(1)式から算出する。

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \dots (1)$$

ここで、R：燃焼半径(m)

S：燃焼面積(m²)

(3) 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)式により算出する。

- ・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。
- ・燃焼面積は、航空機の投影面積と等価な円を仮定する。

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

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

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)

(4) 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2-1表より物性値の近いガソリン・ナフサの値を用いる。

また、輻射強度は太陽光の入射を考慮し、400W/m²を加算する。

$$E = Rf \cdot \phi \dots (3)$$

ここで、

- E : 輻射強度 (W/m²)
- Rf : 輻射発散度 (W/m²)
- ϕ : 形態係数

第2-1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/m², 括弧内はkcal/m²・h)
外部火災ガイドより抜粋

(5) 燃焼時間

燃焼時間は、(4)式より算出する。

燃焼範囲は航空機の投影面積から設定し、KC-767は1500m²、F-2は110m²、F-16は90m²及びF-35は110m²となる。

燃料量は、KC-767は145.1m³、F-2は10.4m³、F-16は9.8m³及びF-35は10.8m³である。

上記データ及び(4)式より、燃焼時間はKC-767及びF-2が約1200秒、F-16が約1400秒及びF-35が約1300秒である。

$$t = \frac{V}{A \times v} \quad \dots (4)$$

ここで

t : 燃焼時間 (s)

V : 燃料量 (m³)

A : 燃料範囲 (m²)

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

(5) 建屋外壁の温度上昇

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下式に基づき算出する。

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

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)

燃料加工建屋外壁に対する熱影響評価の計算条件を第2-2表に示す。

第2-2表 設計対処施設の外壁を対象とした影響評価の計算条件

項目	記号	数値	単位
初期温度	T_0	50	°C
燃焼時間	t	1400	s
輻射強度	E	30 ¹⁾	kW/m ²
コンクリート熱伝導率	λ	1.74	W/m·K
コンクリート密度	ρ	2150 ²⁾	Kg/m ³
コンクリート比熱	c	963	J/kg·K

1) : 太陽光の入射を考慮し, 0.4kW/m²を加算。

2) : 遮蔽設計の最小値

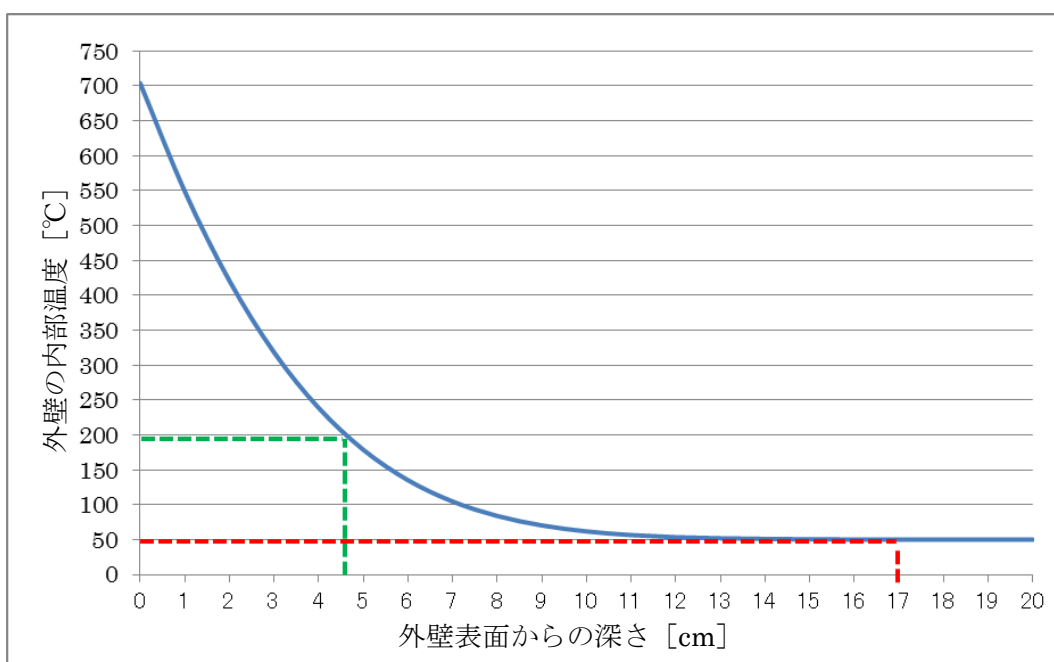
2. 2 外壁に許容温度を超える領域がある場合の評価

外壁の許容温度を超える領域については, 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及びコンクリート強度低下が想定される。

外壁の内部温度の評価についてはコンクリートの深さ方向の温度上昇を確認し, 許容温度を超える領域のコンクリート強度低下を考慮したとしても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。

3. 評価結果

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3-1図に示す。



第3-1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 17cm 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，燃料加工建屋の外壁厚は 1.2m 以上であることから，建屋内に収納する外部火災防護対象施設の安全機能は損なわれない。

また，内部温度は外壁表面から深さ約 5 cm の領域においてはコンクリートの許容温度 200°C (3) 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，外壁表面から深さ約 5 cm 未満まで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 500~600°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 以上内側 (設計かぶり厚さ：外壁 6 cm，屋根 5 cm) 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。

令和3年6月4日 RO

別紙-7

評価対象航空機の選定

目 次

1. はじめに	1
2. 評価対象航空機の選定	1
2. 1 選定の考え方	1
2. 2 評価対象航空機の選定結果	3
3. 熱影響評価の対象航空機の選定	3
3. 1 燃焼継続時間の算出	4
3. 2 輻射強度の算出	6
3. 3 熱影響評価の対象航空機の選定結果	9

1. はじめに

本資料は、航空機墜落火災において、熱影響評価の対象航空機について選定の考え方及び選定の結果について説明する。

2. 評価対象航空機の選定

2. 1 選定の考え方

熱影響評価の対象航空機の選定に当たっては、航空機落下評価ガイドの落下事故の分類を踏まえ、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する航空機から、複数の評価対象航空機を選定する。

評価対象航空機の選定に当たっては、以下を考慮する。

①積載燃料が最大の航空機：

外部火災影響評価ガイドに基づき、航空機墜落評価の対象航空機のうち燃料積載量が最大の機種を選定する。

②航空機墜落：

航空機墜落火災の発生する可能性が高い航空機として、自衛隊機又は米軍機の航空機のうち、訓練飛行回数が最も多い航空機を選定する。

(1) 積載燃料が最大の航空機

外部火災ガイドでは、「航空機は、当該発電所における航空機墜落評価の対象航空機のうち燃料積載量が最大の機種とする。」とされていることから、自衛隊が保有する機種を代表として用途別に燃料積載量等の諸元を調査した。結果を第2-1表に示す。

第2-1表より、燃料積載量が最大となるKC-767を選定した。

(2) 航空機墜落

現地において目視および飛行音で飛来状況を確認し、訓練飛行回数を計測するとともに当該訓練機種の判別を行った。調査結果を第2-2表に示す。調査結果から、航空機墜落による火災の対象航空機としては、自衛隊機のF-2及び米軍機のF-16を選定する。

第 2 - 1 表 主要航空機の保有数・性能諸元

所属	形式	機種	用途	全長(m)	全幅(m)	燃料積載量(ℓ)
陸上自衛隊	固定翼	LR-2	連絡偵察	14	18	2,040
	回転翼	AH-1S	対戦車	14	3	980
		OH-6D	観測	7	2	242
		OH-1	観測	12	3	953
		UH-1J	多用途	13	3	833
		CH-47J/JA	輸送	16	4/5	7,828 ^{*4}
		UH-60JA	多用途	16	3	2,722
AH-64D	戦闘	18	6	1,421		
海上自衛隊	固定翼	P-1	哨戒	38	35	≦ KC-767 ^{*1}
		P-3C	哨戒	36	30	34,820
	回転翼	SH-60J	哨戒	20	16	1,361
		SH-60K	哨戒	20	16	1,361
		MCH-101	掃海・輸送	23	19	5,250
航空自衛隊	固定翼	F-15J/DJ	戦闘	19	13	6,100
		F-4EJ/EJ改	戦闘	19	12	12,100 ^{*5}
		F-2A/B	戦闘	16	11	10,400 ^{*5}
		F-35A	戦闘	16	11	10,800
		RF-4E/EJ	偵察	19	12	7,569
		C-1	輸送	29	31	15,709
		C-2	輸送	44	44	≦ KC-767 ^{*1}
		C-130H	輸送	30	40	26,344
		KC-767	空中給油・輸送	49	48	145,100
		KC-130H	空中給油・輸送	30	40	≦ KC-767 ^{*2}
		E-2C	早期警戒	18	25	7,002
		E-2D	早期警戒	18	25	7,002
	E-767	早期警戒管制	49	48	55,963 ^{*3}	
回転翼	CH-47J	輸送	16	5	3,899	

出展：令和元年度 防衛白書等

- ※ 1 P-1 及び C-2 の燃料量は不明であるが、両機種共に KC-767 より寸法が小さく空中給油機能を備えていないことから、KC-767 に比べて燃料量は少ないと想定される。
- ※ 2 KC-130H の燃料量は不明であるが、ベースとなっている C-130H の最大離陸重量等から推定した結果、KC-767 に比べて燃料量は少ないと想定される。
- ※ 3 E-767 のベースとなったボーイング 767-200ER を参考に燃料積載量を推定した。(Paul Jackson, Jane's all the World's Aircraft.1997-98.)
- ※ 4 CH-47JA の燃料積載量を示す。
- ※ 5 外部燃料タンクも付加した場合の値。

第 2 - 2 表 自衛機又は米軍機の訓練飛行回数の調査結果

	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度
調査回数	10,452 回	8,274 回	5,477 回	7,830 回	5,951 回
訓練回数	2 万回	2 万回	1 万回	2 万回	1 万回
F-2 及び F-16 の出現割合	97.4%	98.7%	98.0%	97.4%	99.3%

2. 2 評価対象航空機の選定結果

選定結果を第 2 - 3 表に示す。また、上記 (1) 及び (2) に加え、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、評価対象航空機として選定することとする。

第 2 - 3 表 選定した航空機と燃料積載量

評価対象航空機	燃料積載量 (m ³)
K C - 767	145.1 ^[1]
F - 2	10.4 ^{[2][3]}
F - 16	9.8 ^{[5][3]}
F - 35	10.8 ^{[3][4]}

[1] 佐瀬亨, 航空情報 特別編集 世界航空年鑑 2018-2019 年版, せきれい社, 2019.

[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] John. W. R. Taylor. ed. Jane's All the World's Aircraft 1987-88. Jane's Publishing Company Limited, 1987.

3. 熱影響評価の対象航空機の選定

上記 2. で選定された複数の評価対象航空機から、熱影響評価の対象とする航空機を選定する。

選定に当たっては、各評価対象航空機の燃焼面積、燃料積載量及び燃焼速度を設定し燃焼継続時間を算出するとともに、形態係数及び輻射発散度を設定し輻射強度を算出する。

算出した燃焼継続時間及び輻射強度から、熱影響評価の対象航空機を選定する。

3. 1 燃焼継続時間の算出

(1) 燃焼面積の設定

燃焼面積については、米国サンディア研究所で実施された実物航空機の衝突実験において、搭載燃料の模擬のためタンクに充填した「水」の飛散範囲を参考とした。水は第3-1図のとおり同縮尺で併せて示す実物航空機(破線囲)の投影面積に比して広範囲に飛散しているが、大量に水がたまっていた部分と航空機の面積が同程度であることがわかる。よって、燃焼面積は機体投影面積とする。第3-2図に機体投影面積のイメージを、第3-1表に評価対象航空機の投影面積を示す。

第3-1表 選定航空機の燃焼面積^{[1][2][3][4]}

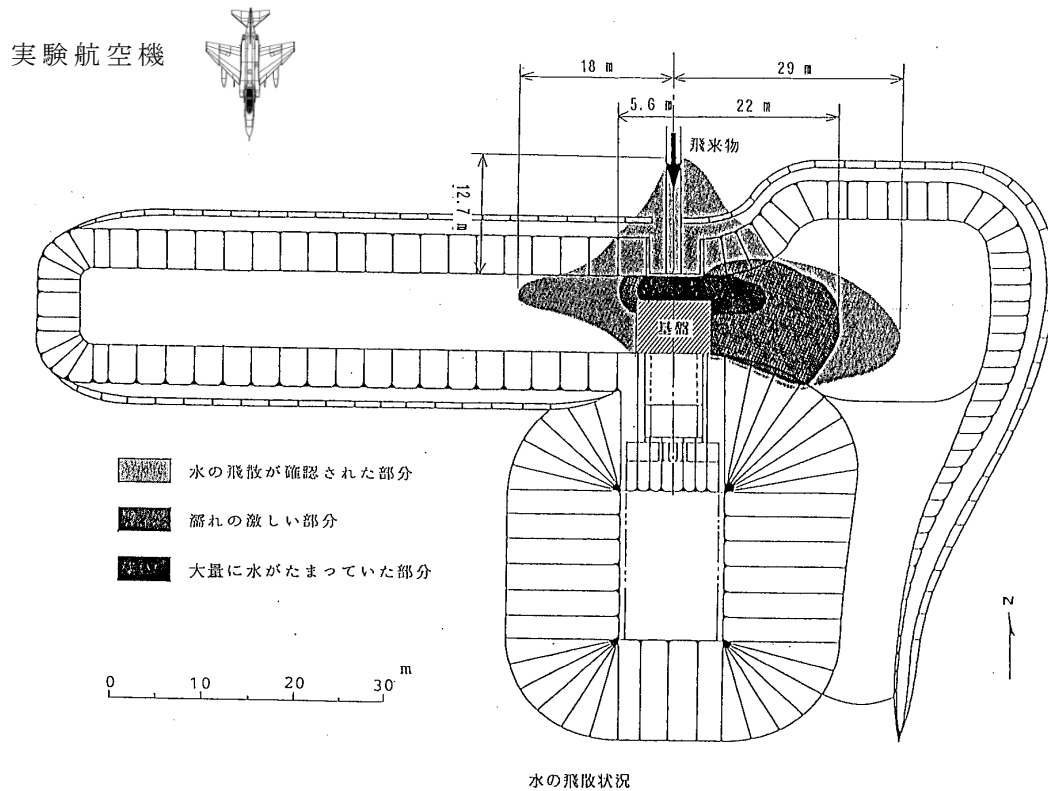
	投影面積 [m ²]
KC-767	約 1500
F-2	約 110
F-16	約 90
F-35	約 110

[1] John.W.R.Taylor. ed. Jane's All the World's Aircraft 1987-88. Jane's Publishing Company Limited, 1987.

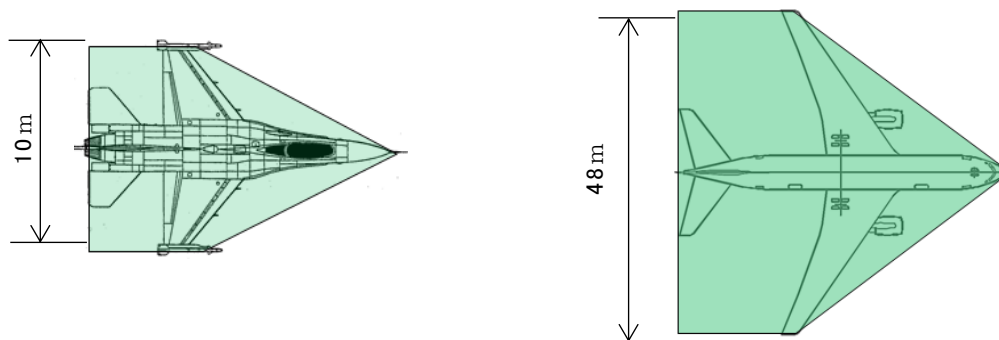
[2] Paul.Jackson. ed. Jane's All the World's Aircraft 1997-98. Jane's Information Group, 1997.

[3] Paul, Jackson. Jane's All The World's Aircraft: Development & Production 2017-2018. HIS Markit, 2017.

[4] ボーイング社ホームページ資料. 767 Airplane Characteristics for Airport Planning.



第3-1図 実物航空機の衝突実験時の模擬燃料（水）



第3-2図 航空機の機体投影面積（左図：F-16，右図：KC-767）

(2) 燃焼時間の算出

燃焼時間は、下式より算出する。燃焼速度については、文献^[1]から油面降下速度 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とする。燃焼範囲は、上記(1)の航空機の投影面積からKC-767は $1,500 \text{ m}^2$ 、F-2は 110 m^2 、F-16は 90 m^2 及びF-35は 110 m^2 と設定する。

燃料量は第2-3表と同様に，KC-767は145.1m³，F-2は10.4m³，F-16は9.8m³及びF-35は10.8m³である。

上記データ及び下式より，第3-2表に示すように，燃焼時間はKC-767及び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。

$$t = \frac{V}{A \times v}$$

ここで，

t ：燃料時間（s）

V ：燃料積載量（m³）

A ：燃焼面積（m²）

v ：燃焼速度（m/s）（ガソリンの燃焼速度4.8mm/minより算出）

第3-2表 対象航空機の燃焼に関する条件

対象航空機	燃焼面積 (m ²)	燃焼半径 R [m]	燃料積載量 (m ³)	燃焼速度 (m/s)	燃焼時間 (s)
KC-767	約1,500	約22	145.1	8.0×10 ⁻⁵	約1,200
F-2	約110	約6	10.4		約1,200
F-16	約90	約5	9.8		約1,400
F-35	110	約6	10.8		約1,300

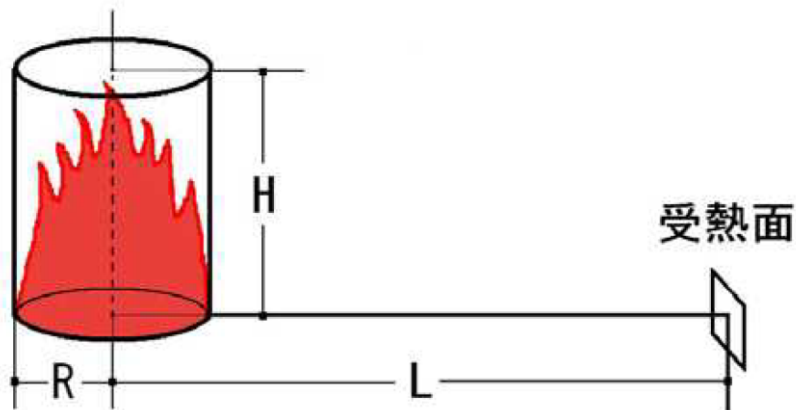
[1] 日本火災学会編．火災便覧 新版，共立出版，1984．

3.2 輻射強度の算出

航空機墜落火災における輻射強度を算出するため，評価モデルを設定する。評価モデルは，外部火災影響評価ガイドに基づき，以下のとおり設定する。

- ・航空機墜落による火災は，円筒火炎を生ずるものとする。ことから，円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は，航空機の燃料タンクの投影面積に等しいものとする。
- ・航空機は，燃料を満載した状態を想定する。

形態係数及び輻射強度の算出は，外部火災影響評価ガイドと同様に受熱面が輻射帯の底部と同一平面状にあると仮定し実施する。航空機墜落による火災の想定模式図を第3-3図に示す。



受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

第3-3図 航空機墜落による火災の想定模式図

a. 形態係数の算出

輻射強度を求める際に必要となる形態係数は，外部火災影響評価ガイドを参考として下式より算出する。

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

ただし，

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

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)

上記の形態係数の算出式は，想定する火炎柱から発生する輻射のうち受熱面を見込む全ての輻射を，水平方向からの輻射として保守的に評価できるものである。

b. 受熱面における輻射強度の算出

輻射強度は外部火災影響評価ガイドを参考として、下式より算出する。

算出結果を第3-3表に示す。

$$E = Rf \cdot \phi$$

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3-3表 対象航空機の輻射強度

対象航空機	形態係数 (-)	輻射強度 (W/m^2)
KC-767	0.5	58×10^3
F-2		
F-16		
F-35		

3. 3 熱影響評価の対象航空機の選定結果

第3-4表で整理したとおり，輻射強度はどの対象航空機も共通であり，燃焼時間が異なる。輻射強度が同じ場合，輻射の照射される時間が長いほど部材の温度が上昇するため，最も燃焼時間が長いF-16を評価対象航空機として選定する。

第3-4表 対象航空機の輻射強度及び燃焼時間の比較

対象航空機	形態係数 (-)	輻射強度 (W / m ²)	燃焼時間 (s)
KC-767	0.5	58 × 10 ³	約 1,200
F-2			約 1,200
F-16			約 1,400
F-35			約 1,300

令和3年6月4日 RO

別紙-7

評価対象航空機の選定

目 次

1. はじめに	1
2. 評価対象航空機の選定	1
2. 1 選定の考え方	1
2. 2 評価対象航空機の選定結果	3
3. 熱影響評価の対象航空機の選定	3
3. 1 燃焼継続時間の算出	4
3. 2 輻射強度の算出	6
3. 3 熱影響評価の対象航空機の選定結果	9

1. はじめに

本資料は、航空機墜落火災において、熱影響評価の対象航空機について選定の考え方及び選定の結果について説明する。

2. 評価対象航空機の選定

2. 1 選定の考え方

熱影響評価の対象航空機の選定に当たっては、航空機落下評価ガイドの落下事故の分類を踏まえ、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する航空機から、複数の評価対象航空機を選定する。評価対象航空機の選定に当たっては、以下を考慮する。

①積載燃料が最大の航空機：

外部火災影響評価ガイドに基づき、航空機墜落評価の対象航空機のうち燃料積載量が最大の機種を選定する。

②航空機墜落：

航空機墜落火災の発生する可能性が高い航空機として、自衛機又は米軍機の航空機のうち、訓練飛行回数が最も多い航空機を選定する。

(1) 積載燃料が最大の航空機

外部火災ガイドでは、「航空機は、当該発電所における航空機墜落評価の対象航空機のうち燃料積載量が最大の機種とする。」とされていることから、自衛隊が保有する機種を代表として用途別に燃料積載量等の諸元を調査した。結果を第2-1表に示す。

第2-1表より、燃料積載量が最大となるKC-767を選定した。

(2) 航空機墜落

現地において目視および飛行音で飛来状況を確認し、訓練飛行回数を計測するとともに当該訓練機種の判別を行った。調査結果を第2-2表に示す。調査結果から、航空機墜落による火災の対象航空機としては、自衛隊機のF-2及び米軍機のF-16を選定する。

第2-1表 主要航空機の保有数・性能諸元

所属	形式	機種	用途	全長(m)	全幅(m)	燃料積載量(ℓ)
陸上自衛隊	固定翼	LR-2	連絡偵察	14	18	2,040
	回転翼	AH-1S	対戦車	14	3	980
		OH-6D	観測	7	2	242
		OH-1	観測	12	3	953
		UH-1J	多用途	13	3	833
		CH-47J/JA	輸送	16	4/5	7,828 ^{*4}
		UH-60JA	多用途	16	3	2,722
AH-64D	戦闘	18	6	1,421		
海上自衛隊	固定翼	P-1	哨戒	38	35	≦KC-767 ^{*1}
		P-3C	哨戒	36	30	34,820
	回転翼	SH-60J	哨戒	20	16	1,361
		SH-60K	哨戒	20	16	1,361
		MCH-101	掃海・輸送	23	19	5,250
航空自衛隊	固定翼	F-15J/DJ	戦闘	19	13	6,100
		F-4EJ/EJ改	戦闘	19	12	12,100 ^{*5}
		F-2A/B	戦闘	16	11	10,400 ^{*5}
		F-35A	戦闘	16	11	10,800
		RF-4E/EJ	偵察	19	12	7,569
		C-1	輸送	29	31	15,709
		C-2	輸送	44	44	≦KC-767 ^{*1}
		C-130H	輸送	30	40	26,344
		KC-767	空中給油・輸送	49	48	145,100
		KC-130H	空中給油・輸送	30	40	≦KC-767 ^{*2}
		E-2C	早期警戒	18	25	7,002
		E-2D	早期警戒	18	25	7,002
		E-767	早期警戒管制	49	48	55,963 ^{*3}
	回転翼	CH-47J	輸送	16	5	3,899

出展：令和元年度 防衛白書等

- ※1 P-1及びC-2の燃料量は不明であるが、両機種共にKC-767より寸法が小さく空中給油機能を備えていないことから、KC-767に比べて燃料量は少ないと想定される。
- ※2 KC-130Hの燃料量は不明であるが、ベースとなっているC-130Hの最大離陸重量等から推定した結果、KC-767に比べて燃料量は少ないと想定される。
- ※3 E-767のベースとなったボーイング767-200ERを参考に燃料積載量を推定した。(Paul Jackson, Jane's all the World's Aircraft.1997-98.)
- ※4 CH-47JAの燃料積載量を示す。
- ※5 外部燃料タンクも付加した場合の値。

第2-2表 自衛機又は米軍機の訓練飛行回数の調査結果

	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度
調査回数	10,452回	8,274回	5,477回	7,830回	5,951回
訓練回数	2万回	2万回	1万回	2万回	1万回
F-2及びF-16 の出現割合	97.4%	98.7%	98.0%	97.4%	99.3%

2.2 評価対象航空機の選定結果

選定結果を第2-3表に示す。また、上記(1)及び(2)に加え、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、評価対象航空機として選定することとする。

第2-3表 選定した航空機と燃料積載量

評価対象航空機	燃料積載量 (m ³)
KC-767	145.1 ^[1]
F-2	10.4 ^{[2][3]}
F-16	9.8 ^{[5][3]}
F-35	10.8 ^{[3][4]}

[1] 佐瀬亨, 航空情報 特別編集 世界航空年鑑 2018-2019年版, せきれい社, 2019.

[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] John.W.R.Taylor. ed. Jane's All the World's Aircraft 1987-88. Jane's Publishing Company Limited, 1987.

3. 熱影響評価の対象航空機の選定

上記2. で選定された複数の評価対象航空機から、熱影響評価の対象とする航空機を選定する。

選定に当たっては、各評価対象航空機の燃焼面積、燃料積載量及び燃焼速度を設定し燃焼継続時間を算出するとともに、形態係数及び輻射発散度を設定し輻射強度を算出する。

算出した燃焼継続時間及び輻射強度から、熱影響評価の対象航空機を選定する。

3. 1 燃焼継続時間の算出

(1) 燃焼面積の設定

燃焼面積については、米国サンディア研究所で実施された実物航空機の衝突実験において、搭載燃料の模擬のためタンクに充填した「水」の飛散範囲を参考とした。水は第3-1図のとおり同縮尺で併せて示す実物航空機(破線囲)の投影面積に比して広範囲に飛散しているが、大量に水がたまっていた部分と航空機の面積が同程度であることがわかる。よって、燃焼面積は機体投影面積とする。第3-2図に機体投影面積のイメージを、第3-1表に評価対象航空機の投影面積を示す。

第3-1表 選定航空機の燃焼面積^{[1][2][3][4]}

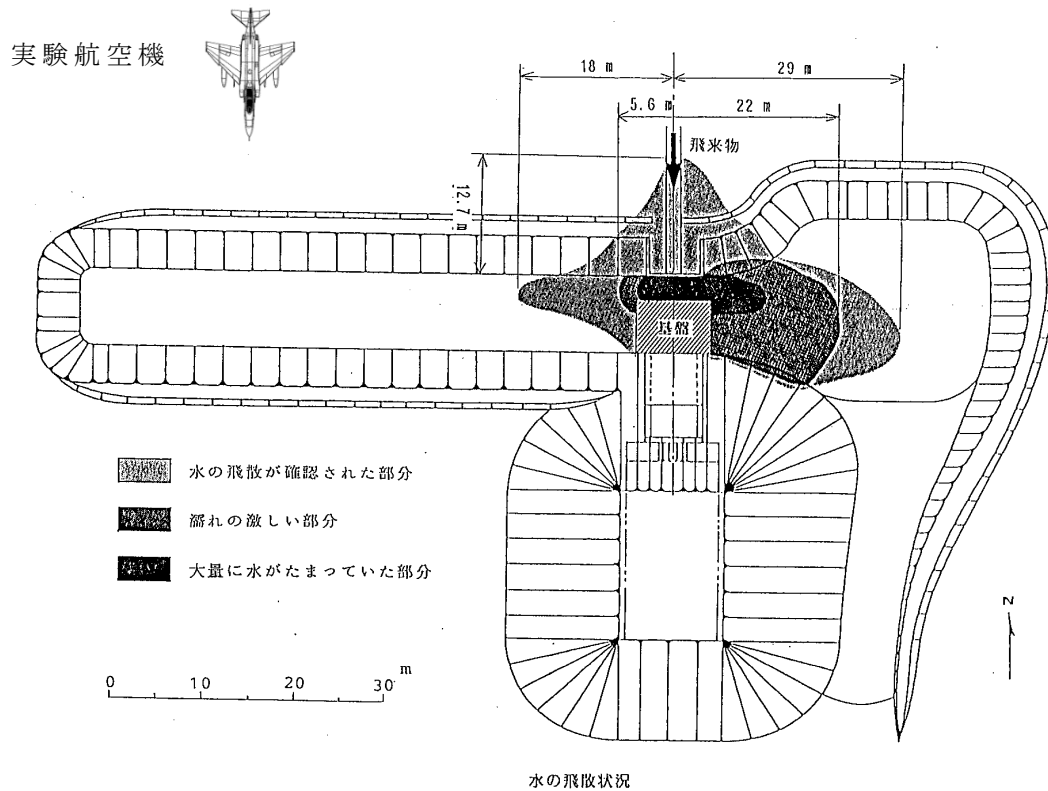
	投影面積 [m ²]
KC-767	約 1500
F-2	約 110
F-16	約 90
F-35	約 110

[1] John.W.R.Taylor. ed. Jane's All the World's Aircraft 1987-88. Jane's Publishing Company Limited, 1987.

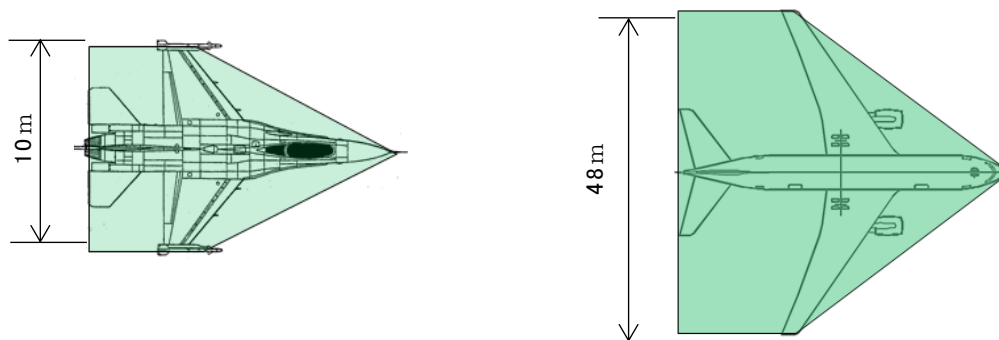
[2] Paul.Jackson. ed. Jane's All the World's Aircraft 1997-98. Jane's Information Group, 1997.

[3] Paul, Jackson. Jane's All The World's Aircraft: Development & Production 2017-2018. HIS Markit, 2017.

[4] ボーイング社ホームページ資料. 767 Airplane Characteristics for Airport Planning.



第3-1図 実物航空機の衝突実験時の模擬燃料（水）



第3-2図 航空機の機体投影面積（左図：F-16，右図：KC-767）

(2) 燃焼時間の算出

燃焼時間は、下式より算出する。燃焼速度については、文献^[1]から油面降下速度 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とする。燃焼範囲は、上記(1)の航空機の投影面積からKC-767は $1,500 \text{ m}^2$ 、F-2は 110 m^2 、F-16は 90 m^2 及びF-35は 110 m^2 と設定する。

燃料量は第2-3表と同様に，KC-767は 145.1m^3 ，F-2は 10.4m^3 ，F-16は 9.8m^3 及びF-35は 10.8m^3 である。

上記データ及び下式より，第3-2表に示すように，燃焼時間はKC-767及び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。

$$t = \frac{V}{A \times v}$$

ここで，

t ：燃料時間（s）

V ：燃料積載量（ m^3 ）

A ：燃焼面積（ m^2 ）

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

第3-2表 対象航空機の燃焼に関する条件

対象航空機	燃焼面積 (m^2)	燃焼半径 R [m]	燃料積載量 (m^3)	燃焼速度 (m/s)	燃焼時間 (s)
KC-767	約1,500	約22	145.1	8.0×10^{-5}	約1,200
F-2	約110	約6	10.4		約1,200
F-16	約90	約5	9.8		約1,400
F-35	110	約6	10.8		約1,300

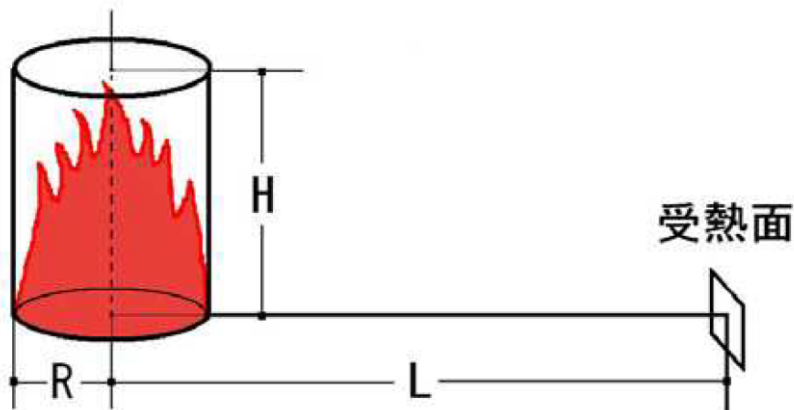
[1] 日本火災学会編．火災便覧 新版，共立出版，1984．

3. 2 輻射強度の算出

航空機墜落火災における輻射強度を算出するため，評価モデルを設定する。評価モデルは，外部火災影響評価ガイドに基づき，以下のとおり設定する。

- ・航空機墜落による火災は，円筒火炎を生ずるものとする。ことから，円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は，航空機の燃料タンクの投影面積に等しいものとする。
- ・航空機は，燃料を満載した状態を想定する。

形態係数及び輻射強度の算出は，外部火災影響評価ガイドと同様に受熱面が輻射帯の底部と同一平面状にあると仮定し実施する。航空機墜落による火災の想定模式図を第3-3図に示す。



受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

第3-3図 航空機墜落による火災の想定模式図

a. 形態係数の算出

輻射強度を求める際に必要となる形態係数は，外部火災影響評価ガイドを参考として下式より算出する。

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

ただし，

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

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)

上記の形態係数の算出式は，想定する火炎柱から発生する輻射のうち受熱面を見込む全ての輻射を，水平方向からの輻射として保守的に評価できるものである。

b. 受熱面における輻射強度の算出

輻射強度は外部火災影響評価ガイドを参考として、下式より算出する。

算出結果を第3-3表に示す。

$$E = Rf \cdot \phi$$

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3-3表 対象航空機の輻射強度

対象航空機	形態係数 (-)	輻射強度 (W/m^2)
KC-767	0.5	58×10^3
F-2		
F-16		
F-35		

3. 3 熱影響評価の対象航空機の選定結果

第3-4表で整理したとおり，輻射強度はどの対象航空機も共通であり，燃焼時間が異なる。輻射強度が同じ場合，輻射の照射される時間が長いほど部材の温度が上昇するため，最も燃焼時間が長いF-16を評価対象航空機として選定する。

第3-4表 対象航空機の輻射強度及び燃焼時間の比較

対象航空機	形態係数 (-)	輻射強度 (W / m ²)	燃焼時間 (s)
KC-767	0.5	58×10^3	約 1,200
F-2			約 1,200
F-16			約 1,400
F-35			約 1,300

令和3年6月4日 RO

別紙-8
耐火塗料の説明書

目 次

1. 耐火塗料とは	1
2. 耐火塗料の構成	1
3. 耐火被覆の発泡挙動	1

1. 耐火塗料とは

耐火塗料は、鉄骨部材等を対象とした耐火被覆材の一つである。耐火被覆は、数mm厚の塗膜が、火災時には20～30倍に発泡して熱伝導性の低い断熱層を形成し、鉄骨の倒壊を防ぐ働きをする。

耐火塗料を塗布した柱や梁等について耐火性能試験を実施し、建築基準法施行令第百七条に掲げる耐火性能に関する技術的基準に適合することを確認することにより、国土交通大臣の認定を受けた塗料である。

2. 耐火塗料の構成

本設計で用いる耐火被覆は、大臣認定を受けたもののうち、2種類の耐火塗料を用いる。2種類の耐火塗料の組成を第2-1表に示す。

2種類の耐火塗料は、ほとんど同じ組成で構成されているが、フォームを形成する主成分の樹脂に違いがある。しかし、樹脂の違いにより、断熱性能および発泡挙動に大きな差異がないことは、耐火性能試験にて確認している。(補足説明資料 外外火 05 耐火被覆の考え方について「4. 3 耐火被覆の塗装厚さの設計」)

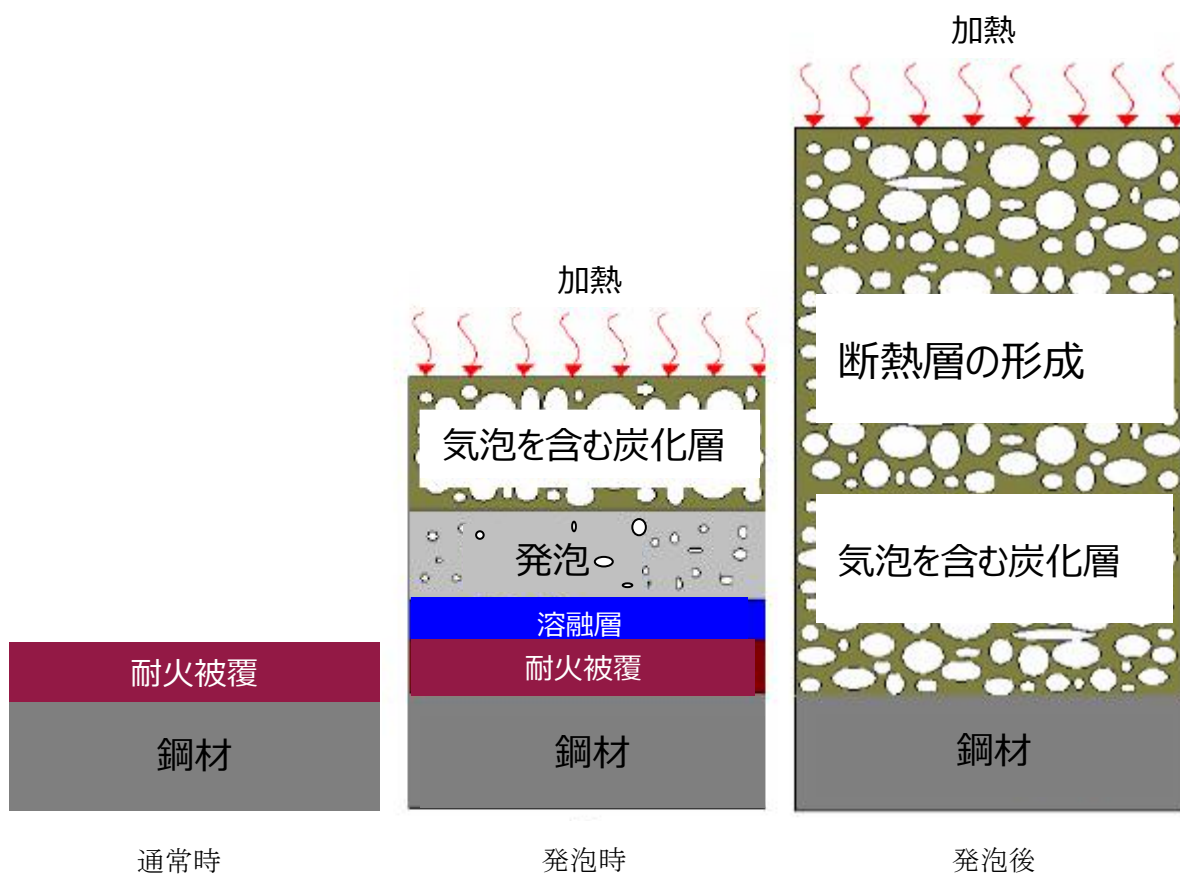
第2-1表 耐火塗料の組成

	耐火テクト	SKタイカコート
発泡剤	ポリリン酸アンモニウム	ポリリン酸アンモニウム
樹脂	ポリエーテル系	ウレタン系
炭化剤	多価アルコール系	多価アルコール系
着色顔料	酸化チタン系	酸化チタン系
添加剤	無機-有機高分子	無機-有機高分子

3. 耐火被覆の発泡挙動

耐火被覆は表面温度が200℃から300℃になった時点で、主成分である発泡剤(ポリリン酸アンモニウム)が分解し、りん酸によって多価アルコール類が分解し脱水作用によって炭化層を形成する。一方、樹脂の熔融と同時に発泡剤は分解を起こし、二酸化炭素、アンモニア、水蒸気等のガスを発生し、樹脂をフォーム状にして炭化層を膨らませて、元の被覆厚の数十倍にもなる断熱層を形成する。

輻射を受けた耐火被覆の発泡による変化を、第3-1図に示す。



第3-1図 加熱による耐火被覆の発泡による変化

令和3年6月4日 RO

別紙-9

耐火被覆厚さの設定の考え方

目 次

1. 耐火被覆厚さの設計について.....	1
-----------------------	---

1. 耐火被覆の塗装厚さの設計方針

防護対策として施工する耐火被覆は、施設毎に設定した許容温度を満足するために必要な塗装厚さを設定する必要がある。

耐火被覆は、以下の2点の考慮し、塗装厚さを部材毎ではなく、施設の重要度に応じて、施設毎に統一する。

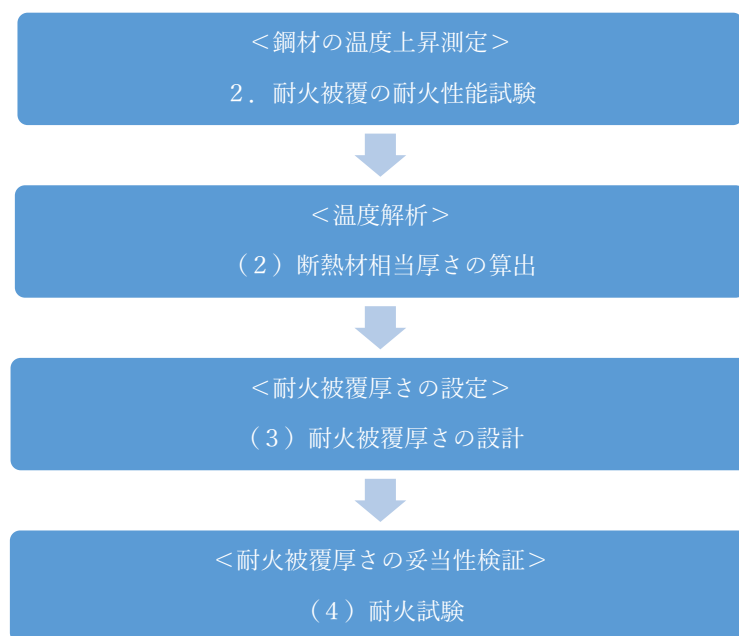
- ・耐火被覆は現場塗装する部材もあることから、管理方法を統一することが品質向上につながるため。
- ・耐火塗装厚さを統一することで使用前事業者検査の効率化につながるため。

そのため、耐火被覆の塗装厚さの設計においては、塗装厚さの設定が厳しくなるよう代表形状と評価条件を設定して設計する。

耐火被覆の塗装厚さの設定フローを第1-1図に示す。

鋼材の温度評価式において、耐火被覆のパラメータ設定が困難であることから、評価式への反映が可能な熱物性値が明らかになっている断熱材に置き換える。

断熱材への置き換えにあたっては、耐火性能試験から得られた鋼材の温度測定結果と評価式から算出される鋼材の温度を比較し、その差分を断熱材の相当厚さに換算することで、必要な耐火被覆の塗装厚さを設定する。設定した耐火被覆の厚さの妥当性については、耐火試験により検証する。



第1-1図 塗装厚さの設定フロー

2. 耐火被覆の耐火性能試験

耐火被覆の施工厚さを設定するためには、耐火被覆の断熱性能に関する物性値を取得する必要がある。物性値の取得にあたっては、耐火性能試験を用いて取得する。また、試験にあたっては、2種類の耐火被覆を用いて試験を実施し、その性能が同等であることも確認する。

a. 耐火性能試験の概要

耐火被覆の物性値を取得するためには、与えられた熱量および鋼材の温度上昇が測定可能であること、また、試験体である鋼材は、温度上昇が評価式にて算出可能であることが必要となる。耐火被覆材の製造メーカーが大臣認定のために実施した耐火性能試験は、これらの条件を満たしていることから、耐火性能試験の結果を用いて耐火被覆の断熱性能を評価する。

耐火性能試験は、建築基準法第二条第七号に基づき、「防耐火性能試験・評価業務方法書（一般財団法人 日本建築総合試験所制定）」（以下「耐火性能試験書」という。）の「4.1 耐火性能試験方法」に準拠して実施されている。

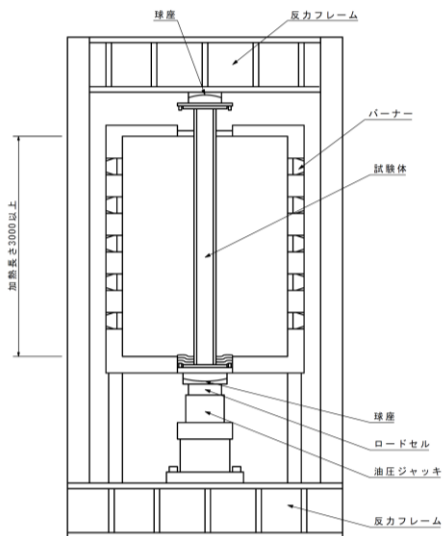
b. 耐火性能試験の方法および条件

耐火性能試験は耐火性能試験書に準拠して実施される。第2-1図に試験装置の概要を示す。試験体には、構造耐力上主要な部分の断面に長期許容応力度に相当する応力度が生じるように载荷しながら試験するものとする（防耐火性能試験・評価業務方法書より）。ただし、耐火被覆の断熱性能の評価においては、载荷による変形結果ではなく、鋼材の温度変化の結果を用いる。

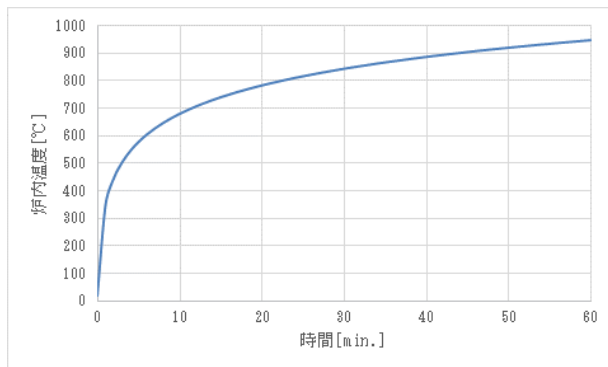
第2-2図に試験体に加える加熱曲線を示す。加熱曲線は、ISO 834にて示される標準加熱曲線とする。

第2-3図に試験体への加熱方法を示す。試験面の全面にほぼ一様に要求耐火時間である1時間加熱し、鋼材の温度を測定する。

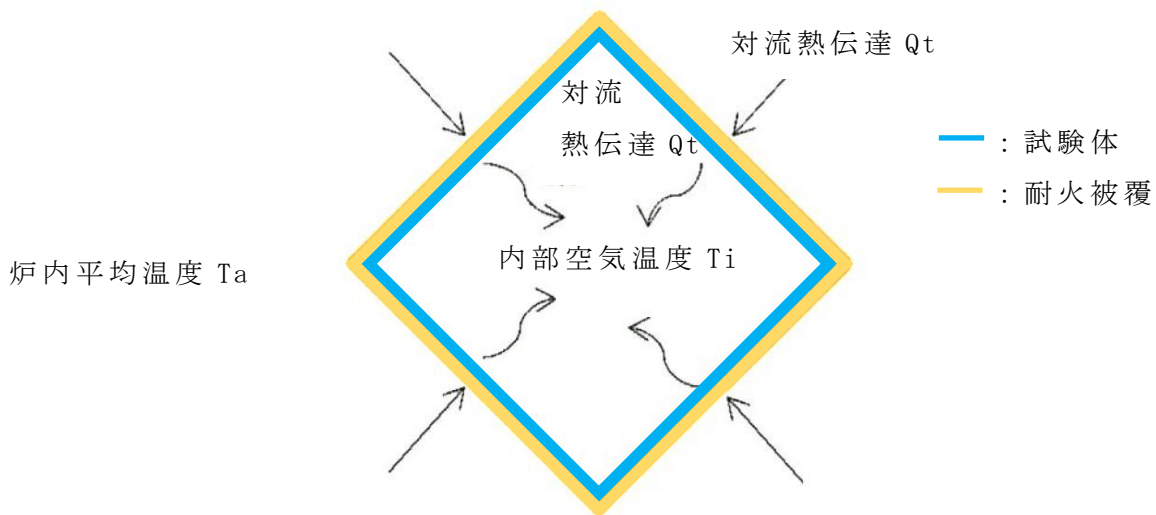
第2-1表に試験条件を示す。



第 2 - 1 図 試験装置
(断面図, 単位: mm)



第 2 - 2 図 IS0834 にて示される
標準加熱曲線による炉内の温度変化



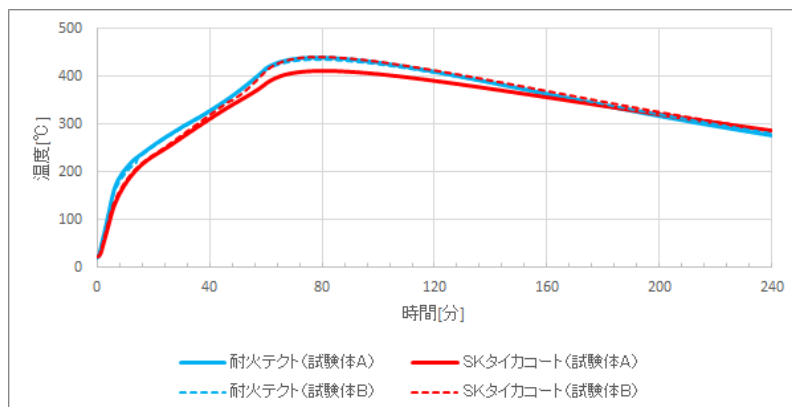
第 2 - 3 図 試験体への加熱の概要

第 2 - 1 表 試験条件

耐火被覆種類	耐火テクト / SKタイカコート	備考
試験体(寸法)	一般構造用角鋼管 (JIS G 3466 (STKR490)) (幅 : 300mm, 奥行 : 300mm, 高さ : 3500mm, 厚さ : 9 mm)	
耐火被覆厚さ	2 mm	
加熱面	角鋼管の 4 面 (試験面)	
加熱時間	60 分	要求耐火時間
試験荷重	2073.0 kN	今回の評価には関係しない
試験時間	240 分	要求耐火時間の 3 倍に対して, 保守的に 4 倍をみて 180 分を加熱しない状態としている。
試験体	4 体	耐火被覆毎に 2 体試験する。

c. 耐火性能試験の結果

耐火性能試験から得られた鋼材の温度測定結果を第 2 - 4 図に示す。2 種類の耐火被覆は同じような温度上昇カーブを描いており, 同等の耐火性能を有していることを確認した。



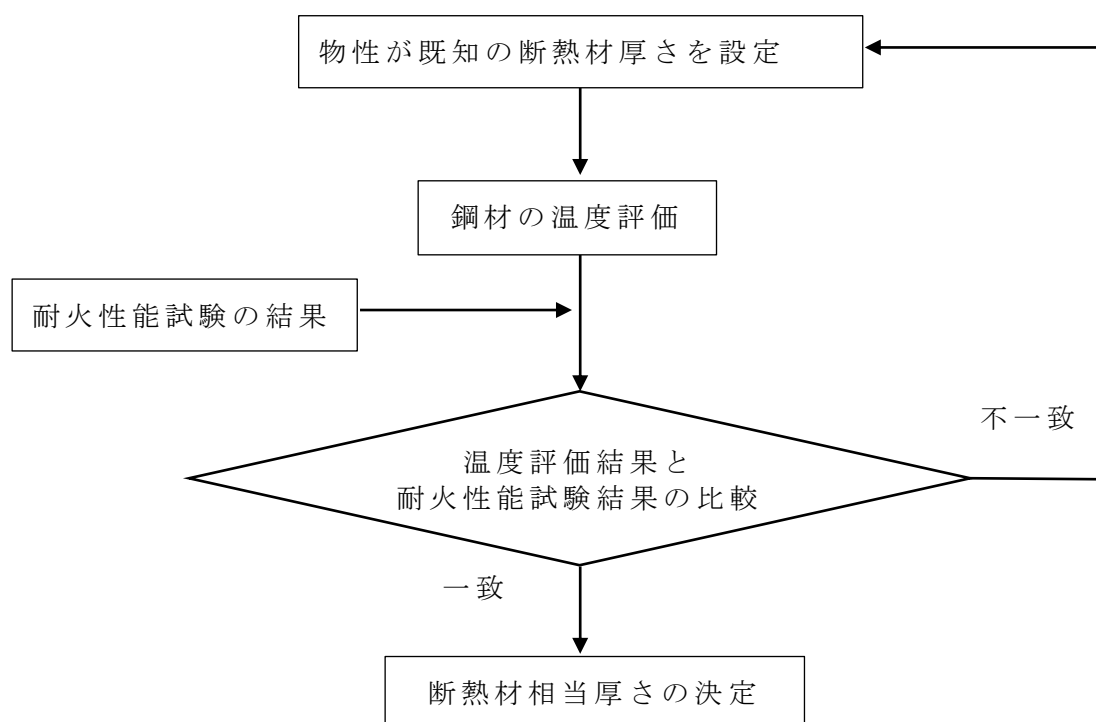
第 2 - 4 図 試験体の鋼材温度の時刻歴

3. 断熱材厚さの換算

a. 評価方針

「2. 耐火被覆の耐火性能試験」より得られた耐火被覆を施工した鋼材の温度測定結果と、熱物性が明らかになっている断熱材を用いて鋼材の温度を評価式より算出した結果を比較することで、耐火被覆を断熱材厚さに換算する。

評価の流れを第3-1図に示す。



第3-1図 評価の流れ

b. 評価条件

鋼材の温度評価においては、耐火性能試験の試験条件に合わせ、炉内から角鋼管へは輻射による加熱があるものとし、断熱材およ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3-1表に評価対象の仕様および加熱条件、第3-2表に断熱材の熱物性値を示す。鋼材の温度評価の条件は耐火性能試験に合わせて設定する。

第 3 - 1 表 評価対象の仕様および加熱条件

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
耐火被覆の塗装厚さ	2mm
炉内温度	IS0834 にて示される 標準加熱曲線による温度

第 3 - 2 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
℃	g / cm ³	k J (kg · K)	W / (m · 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

※ ニチアス ファインフレックス B I O ボード 5625-A

c. 評価方法

鋼材の温度評価の方法については、別紙-1 に示す。

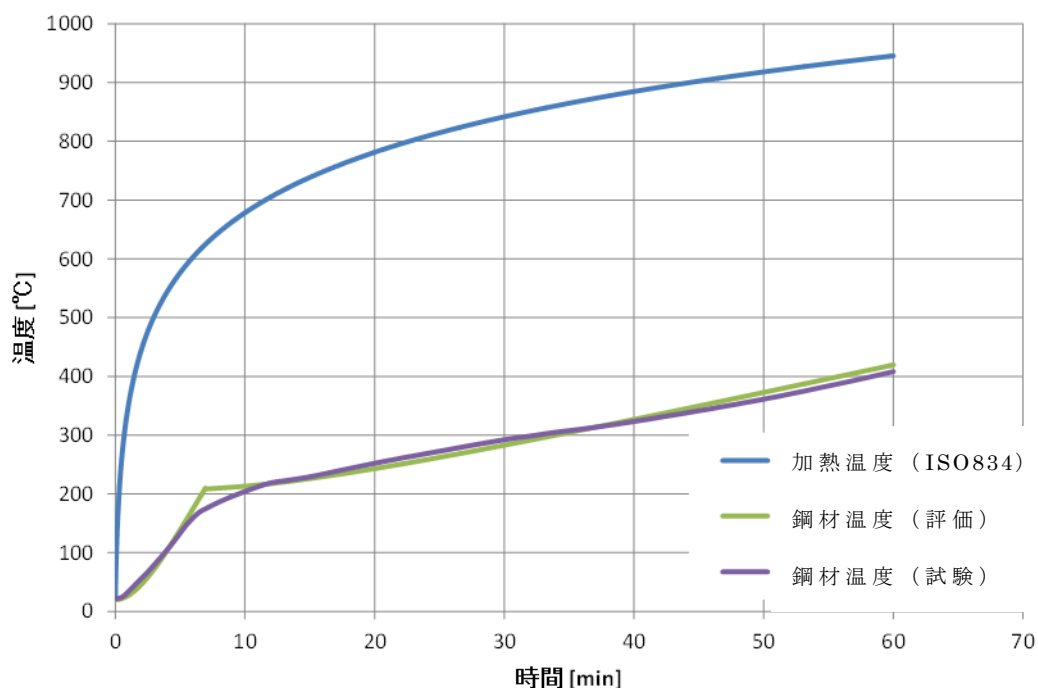
d. 比較結果

耐火被覆 2mm を施工して実施した耐火性能試験の結果で得られた鋼材温度の経時変化を基に、相当する断熱材の厚さを検討した。耐火性能試験の結果から耐火被覆は 210℃ を基点として断熱効果に変化がみられているため、加熱開始から 210℃ までの領域（「発泡前」という。）と、210℃ 以降の領域（「発泡後」という。）で断熱材の厚さが変化するモデルとした。

検討の結果、耐火被覆 2mm が、発泡前は厚さ 1mm の断熱材に相当し、発泡後は 25mm の断熱材に相当することが確認された。よって、必要な耐火被覆の厚さの計算においては、耐火被覆 1mm の断熱性能

が、発泡前においては断熱材 0.5 m m に相当し、発泡後では断熱材 12.5 m m に相当する設定とした。

「2. 耐火被覆の耐火性能試験」に示した 2 m m の耐火被覆における耐火性能試験の結果を基に、上記の断熱材厚さで評価した結果を重ねたものを第 3 - 2 図に示す。



第 3 - 2 図 耐火被覆 2 m m の試験結果に相当する断熱材厚さを適用して評価した鋼材温度の比較

4. 耐火被覆厚さの設定

「3. 断熱材厚さの換算」から得られた、耐火被覆の断熱性能に応じた断熱材厚さをを用いて、耐火被覆の必要厚さを設定する。

a. 設定の考え方

耐火被覆の厚さ設定における考え方を以下に示す。

- ・航空機墜落火災において、外部火災防護対象施設および波及的影響を及ぼし得る施設に求められる機能に応じて設定した許容温度を満足するために必要な塗装厚さを設定する。
- ・塗装厚さは、部位毎に厚さを変更するのではなく、施設の重要度に応じて厚さを設定する。
- ・塗装厚さは、施設毎に統一することから、代表部材にて設定する。代表部材は、以下のとおり検討し、最終的に飛来物防護ネットの防護板で S U S 3 0 4 の平板 (9 m m) とした。

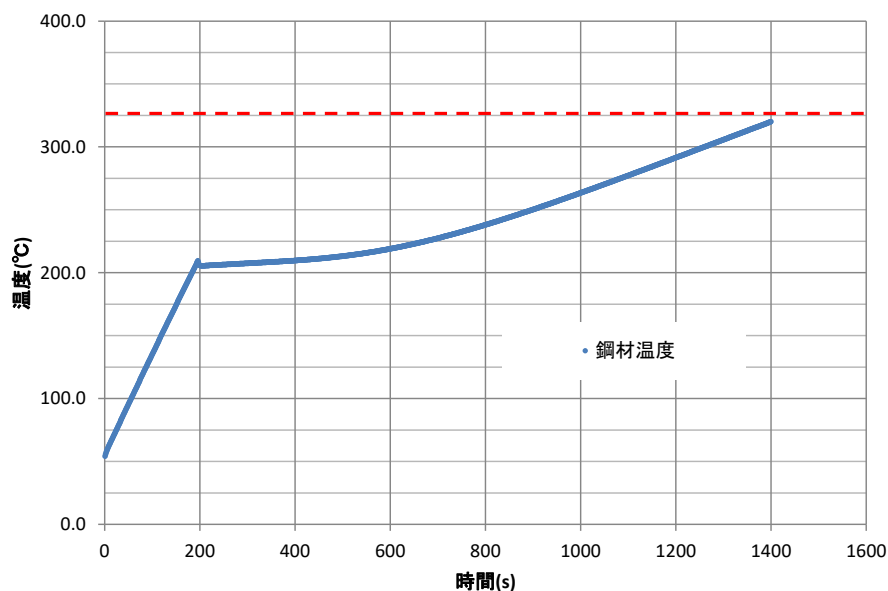
- ① 輻射強度最も強く、厳しい評価となることから、火炎に近い飛来物防護ネットから選定することとする。
 - ② 別紙—4 で設定した通り，平板を代表とする。
 - ③ 飛来物防護ネットのうち，もっとも薄い平板である防護板を代表に耐火塗装厚さを設計する。
- ・ 代表部材より薄い板厚を有する部材（角柱等）が存在することから、それらは個別に試験にて、設定した耐火被覆厚さを施工することで許容温度を満足していることを、耐火試験にて確認する。
耐火試験においては、火炎と部材の距離を考慮した輻射強度を照射する。

b. 解析結果

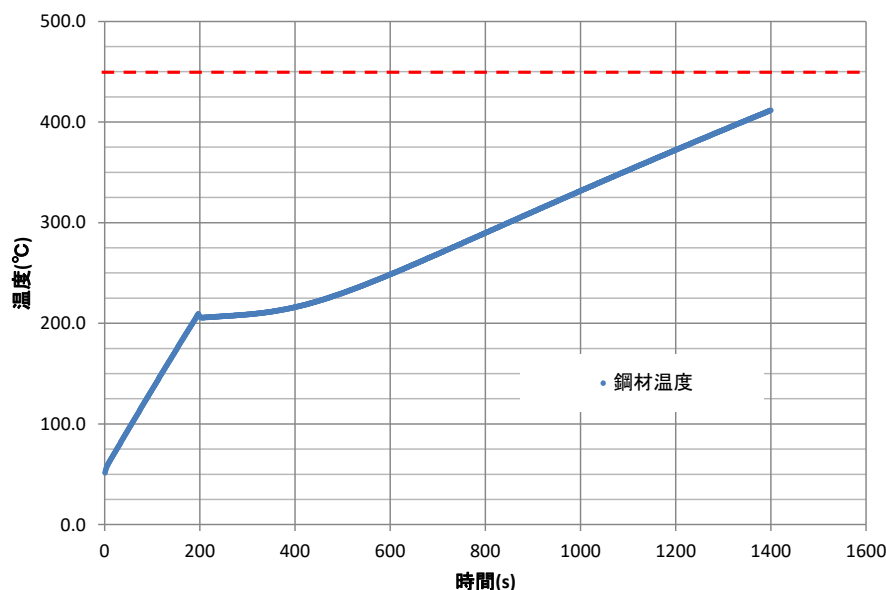
S U S 3 0 4 の 9 m m 平板を代表に，耐火被覆厚さを設定した結果を第 4 - 1 図および第 4 - 2 図に示す。

鋼材の温度評価は，添付資料「IV-1-1-1-4-5 外部火災防護における評価方針」の「4.4.3 航空機墜落火災に対する屋外施設（竜巻防護対策設備等）の熱影響評価」における式 4.4.3-6 に基づき評価する。

評価の結果，鋼材温度は 325℃以下とするためには 3 m m の耐火被覆厚さ、450℃以下とするためには 2 m m の耐火被覆厚さそれぞれ必要であることを確認した。



第 4 - 1 図 耐火被覆 3 m m の解析結果



第 4 - 2 図 耐火被覆 2 m m の解析結果

5. 耐火試験

「4. 耐火被覆厚さの設定」にて設定した耐火被覆厚さが妥当な設定であることを確認する。確認にあたっては、飛来物防護ネットの最小板厚である防護板にて設定をしたが、飛来物防護ネットの梁材のH鋼等において、9 m mを下回る板厚があることから、それらについても、試験にて許容温度を満足していることを確認する。

耐火試験においては、航空機墜落火災の至近で部材が受けるのと同等の輻射を試験体を与える。

a. 耐火試験の概要

本試験では、設定した耐火被覆を施工することにより、航空機墜落火災から輻射を受けたとしても、防護対象施設を構成する部材の温度が、設定した許容温度内であることを確認する。

そのため、試験においては、航空機墜落火災から受ける輻射強度と同等の輻射を部材に与え、鋼材の温度上昇を測定する。

b. 耐火試験の方法および条件

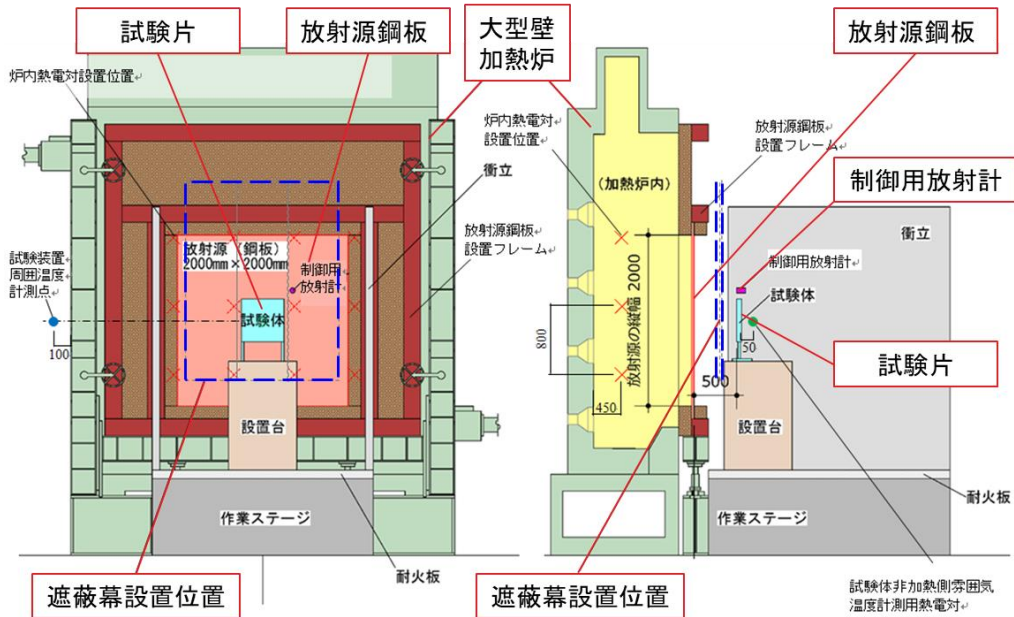
(a) 試験方法

本試験に用いる装置を第 5 - 1 図および第 5 - 2 図に示す。本試験では、加熱された鋼板（放射源鋼板）を放射源として試験体に放射熱流束を与える。そのため、大型壁加熱炉を用いて鋼板（放射源鋼板）を加熱し、鋼板から輻射熱を発生させる。

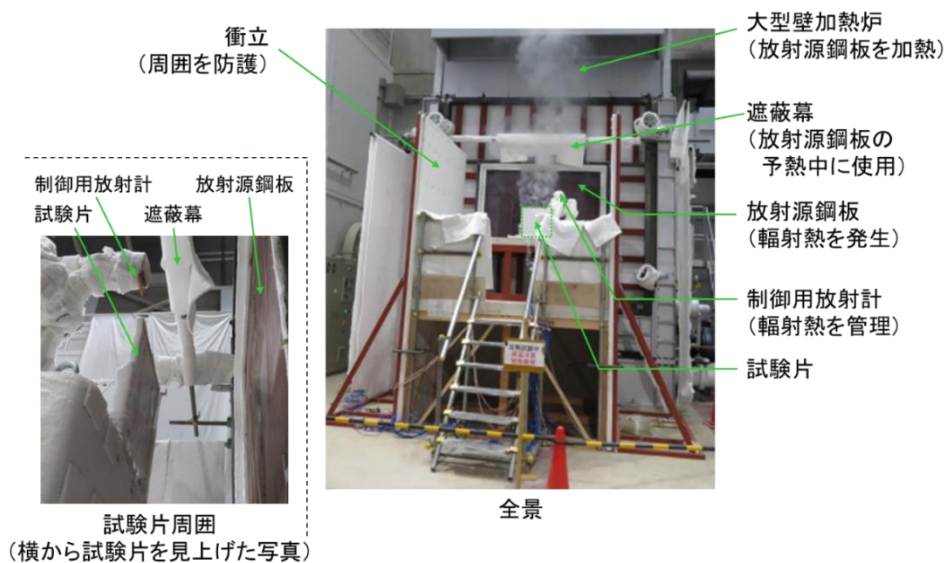
試験開始前に放射源鋼板を予熱し、輻射強度が所定の強度に達した時点で試験を開始した。予熱中は、試験片への入熱を軽減するため、試験片と放射源鋼板の前に遮蔽幕を設置した。試験片の近傍に設置した制御用放射計を用いて輻射熱を管理する。

(b) 試験条件

試験条件は第5-1表に示す。



第5-1図 試験設備 (図面)



第5-2図 試験設備写真

第 5 - 1 表 試験条件

項目		単位	値	
火炎の輻射強度		W/m ²	29,400	代表部材への輻射強度
			26,000	ファンリングへの輻射強度
燃焼時間		s	1,400	
試験体	材質	S U S 304		
	厚さ	9 m m		
	形状	平板		
	寸法	500 m m × 500 m m		

c. 耐火試験の結果

「4. 耐火被覆厚さの設定」にて代表部材として熱評価した S U S 304 (t 9 m m) について耐火試験を実施し、得られた試験結果を第 5 - 3 図および第 5 - 4 図に示す。

S U S 304 (t 9 m m) の耐火塗装厚 3 m m および 2 m m の耐火試験の結果から、許容温度を満足していることを確認した。

d. 考察

第 4 - 1 図及び第 4 - 2 図に示す解析による評価結果と、第 5 - 3 図及び第 5 - 4 図に示す耐火試験の結果を比較すると、加熱開始から 1400 秒後の温度に大きな差がみられる。これは、解析においては、鋼材の許容温度を満足するため、保守的な評価モデルとして鋼材からの放熱を無視したモデルを設定していることが主な要因と考えられる。実際には、周辺の状況に応じて鋼材からの放熱が見込めるが、これを無視することにより保守的に耐火被覆の厚さを設定でき、安全余裕を確保することができると考えられる。

また、解析と耐火試験では、加熱開始時の鋼材温度が異なっており、解析では 50℃、耐火試験では 100℃程度となっている。耐火試験では、加熱開始前に入熱を極力抑えるために遮蔽幕を設置しているが、それでも加熱開始時には鋼材の温度が高くなってしまっている。しかし、このことは、耐火試験としてはより厳しい試験条件を与えていることになるため、解析結果をもとに設定した耐火被覆の厚さが十分に保守的であることを確認するうえでは問題ないとする。

以上のことから、解析結果をもとに設定した耐火被覆の厚さは十分な安全余裕を有しており、妥当な設定であると考えられる。

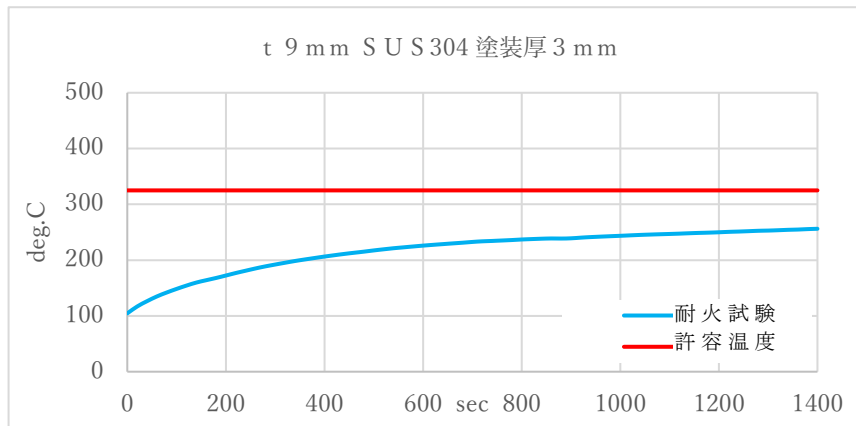
e. 代表部材厚に包絡できない部材の耐火試験

代表部材として選定し、温度解析で用いた S U S (t 9 m m) 平板より熱影響が厳しいことが懸念される部材について耐火試験を実施した。

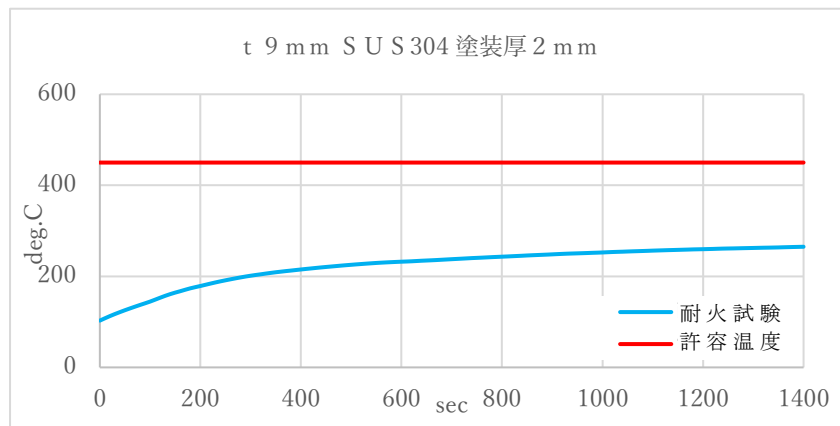
代表部材に包絡されない板厚は、冷却塔のファン駆動部のファンリグであり、その厚さは 3.2mm である。

試験においては、ファンリングと火炎の間の距離（3.5m）を踏まえた輻射強度を、耐火被覆 3 mm を施工した板厚 3.2mm の平板に照射した。試験結果を第 5 - 5 図に示す。

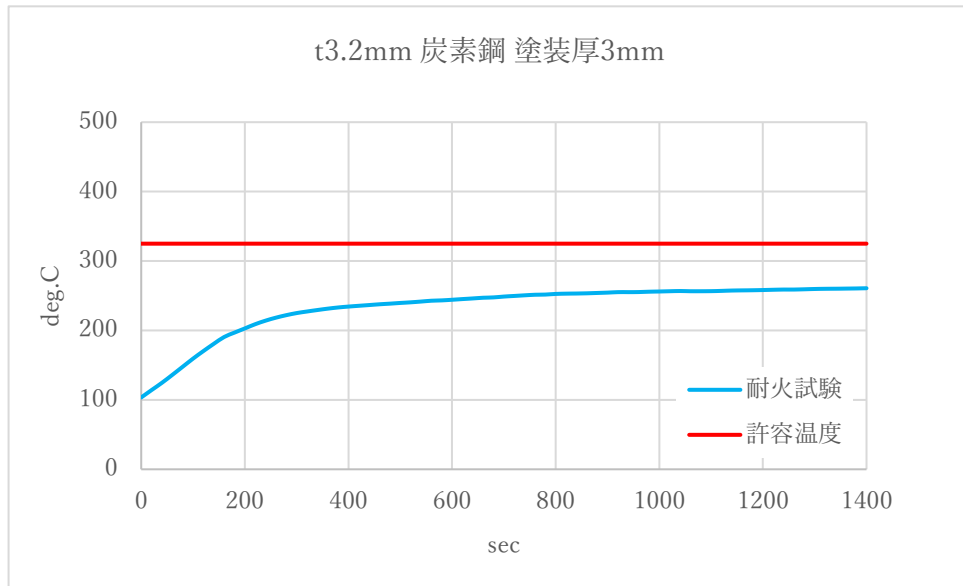
代表部材厚に包絡できない部材についても、耐火試験により許容温度を満足することを確認した。



第 5 - 3 図 t 9 m m S U S 304 耐火塗装厚 3 m m の耐火試験結果



第 5 - 4 図 t 9 m m S U S 304 耐火塗装厚 2 m m の耐火試験結果



第 5 - 5 t 3 . 2 m m 炭 素 鋼 耐 火 塗 装 厚 3 m m の 耐 火 試 験 結 果

令和3年6月4日 RO

別紙-10
対流熱伝達

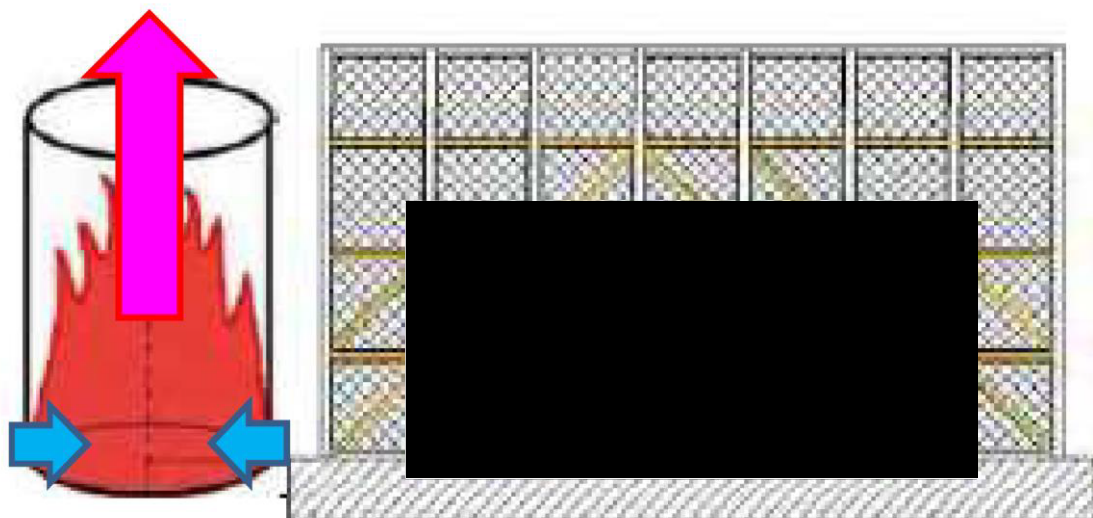
目次

1. はじめに	1
2. 影響の検討	1
3. 結論	4
4. 参考文献	5

1. はじめに

本資料は、航空機墜落火災により発生する高温空気が、冷却塔本体へ影響を与えないことを説明するものである。

第1-1図に、火災時の空気流れイメージを示す。火炎柱の中では、燃焼によって発生する高温のガスが上昇流となるとともに、火炎柱の外から空気を巻き込む流れを発生させる。



第1-1図 火災時の空気流れイメージ

2. 影響の検討

(1) 解析による影響検討

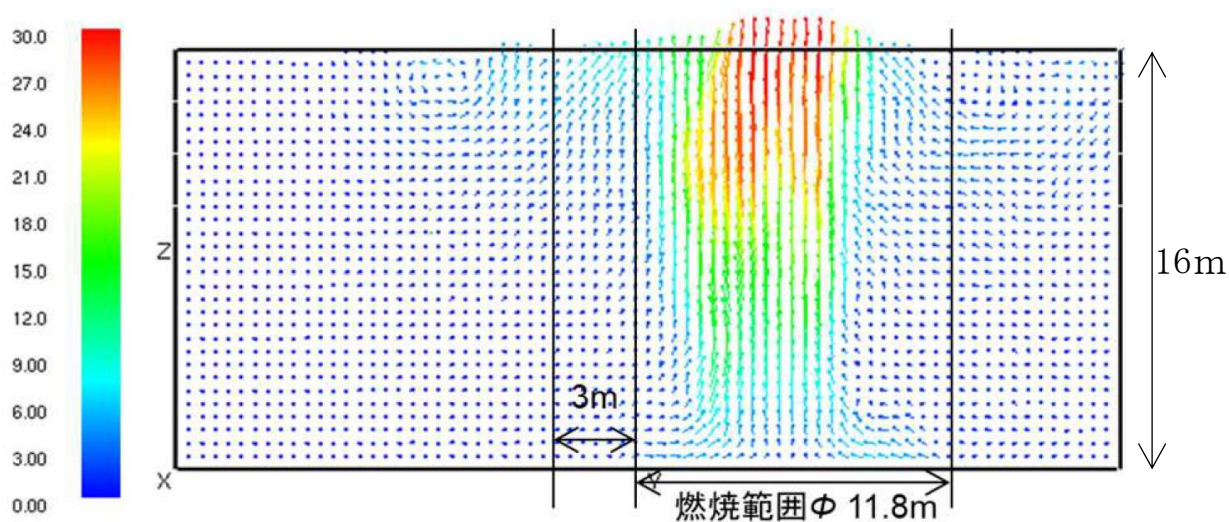
プール火災の周囲の風速と温度の分布について、Fire Dynamics Simulator (以下FDS, アメリカ国立標準技術研究所の開発した火災シミュレーションソフト) を用いた解析を実施している。本解析の解析条件を第2-1表に、着火後の火炎柱付近の風速データを抽出した結果を第2図に、火炎柱付近の温度データを抽出した結果を第2-2図に示す。

第2-1図より、火炎柱中心では 10m/s 以上、最大約 30m/s の上昇流が発生し、火炎柱に隣接する空間では、火炎柱に向かって周囲の空気を巻き込む流れが発生することが確認できる。また、火炎柱下部において、火炎柱から周辺に向かって降雨気の流れる傾向は見られない。これらのことから、高温空気が冷却塔に向かって流れ込むことは考えられず、影響を及ぼすことはないと考えられる。

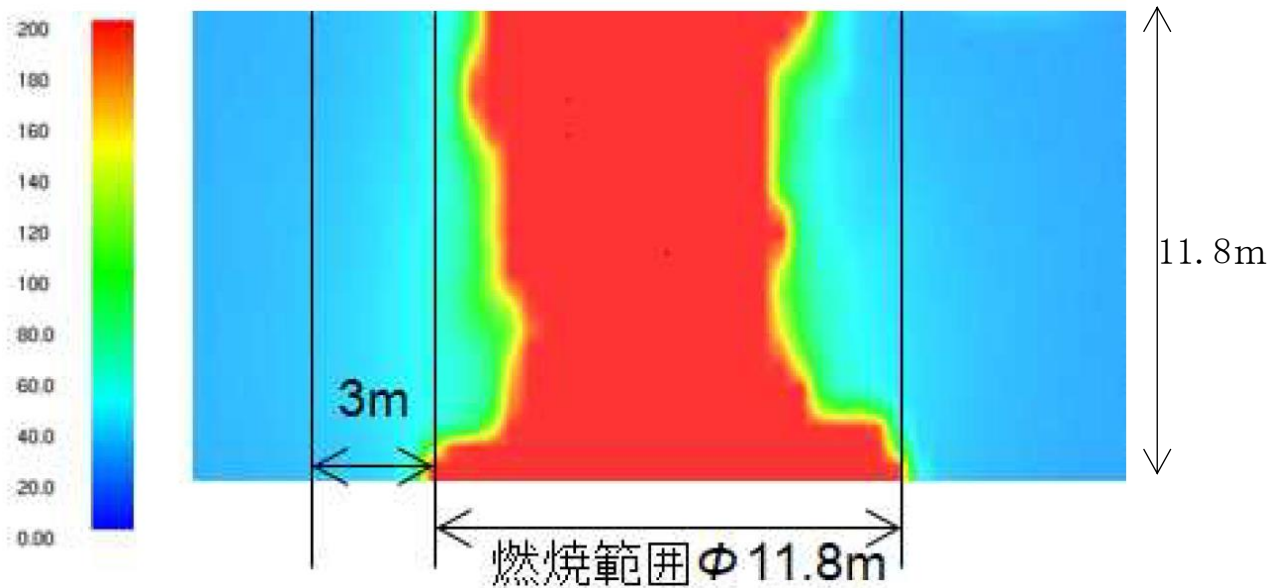
第2-2図からは、火炎が周囲の低温空気を巻き込むことにより、上方に向かって高温空気の断面積が小さくなっていることが確認でき、火炎柱の外側では空気自体の温度はほとんど上昇していないことがわかる。したがって、高温の空気が冷却塔に影響を及ぼすことはないと考えられる。

第2-1表 プール火災を対象とした火災シミュレーションの設定条件

項目	値	単位	備考
燃焼面積	110	m ²	F-2, F-35
燃料積載量	10.4	m ³	F-2
燃焼速度	8.0×10^{-5}	m/s	
燃焼時間	1200	s	燃料積載量 ÷ 燃料面積 ÷ 燃焼速度
燃料組成	ペンタン	—	ガソリン, ナフサのうち入気温度が高くなるのはナフサだが, ナフサの値がデータベースになかったため, 燃焼挙動に近いペンタンのデータを使用した。
燃料プール形状	円形	m	外部火災影響評価ガイド
燃料プール半径	約 5.9	m	半径計算値
外部風速	0	m/s	外部火災影響評価ガイド
外部風向	—	—	外部火災影響評価ガイド
初期温度	29	°C	



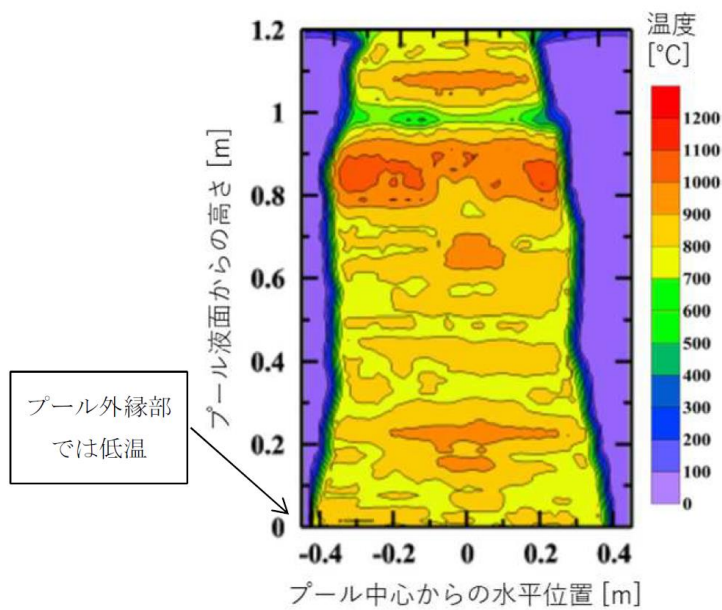
第2-1図 風速 (単位系 : m/s)



第2-2図 火炎柱近傍における温度データ (単位: °C)

(2) 既往の文献からの影響検討

火炎柱下部近傍の温度について、第2-3図に示す Vinay and Prabhu^[1]の実施したプール火災試験において、燃料プール外縁よりも外側では顕著な温度上昇がみられないことが報告されている。これは、(1)に示したFDS解析による結果とも整合するものである。



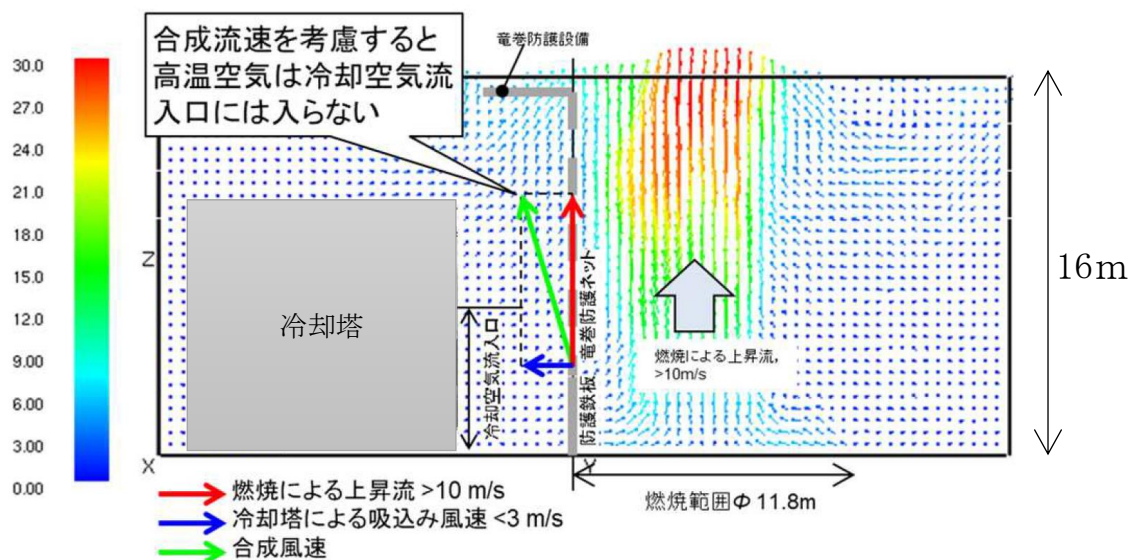
第2-3図 直径1mのヘプタンプル火災試験で測定された温度分布 (Vinay and Prabhu^[1] (2018)に加筆)

(3) 冷却塔の運転状態を考慮した影響検討

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を例として、火災による高温空気が冷却塔に吸い込まれる可能性について検討した（第2-4図参照）。検討においては、前提条件を以下のように設定した。

- ・第2-1図より、火災による上昇流を 10m/s とした。
- ・ネット外面における冷却塔への吸い込み風速は $1\sim 2\text{m/s}$ であるが、安全側に 3m/s とした。
- ・冷却塔への空気取り込み口は、高さ 6m 以下、ネット外面からの距離を 3m 以上とした。

以上から、冷却塔の冷却空気吸い込み口におけるネット外面からの距離、高さを考慮すると、高温空気が冷却塔の空気吸い込み口に入ることはないと考えられる。実際には火炎柱に向かって吸い込まれる空気の流速もあり、冷却塔に向って流れる空気の流速はさらに小さくなると考えられる。



第2-4図 火災による高温空気の冷却塔への流入可能性の検討

3. 結論

2. に示す影響検討の結果、火炎柱内部及び周辺の空気の流れ、火炎柱周辺の空気の温度分布及び冷却塔の運転状態を考慮しても、火災による高温空気が冷却塔の安全機能に影響を及ぼすことは考えられない。

4. 参考文献

- [1] Vinay and Prabhu: Measurement of geometric and radiative properties of heptane pool fires. Fire Safety Journal 96, pp 13-26 (2018)

以上

令和3年6月4日 RO

別紙-11

施工管理

目 次

1. 耐火被覆厚さの設計について..... 1

1. 施工管理

耐火被覆が設計通りの機能を発揮するためには、施工時の品質確保が重要となることから、品質確保のための管理事項等について説明する。

(1) 耐火塗料施工時の管理項目

耐火塗料の施工時における管理項目と管理方法を第1-1表に示す。

第1-1表 耐火塗料の施工時における管理項目と管理方法

作業		管理項目	管理要求	管理方法
施工前	素地確認	表面の状態	錆・付着物が除去されていること。	目視にて確認
	下地調整	既設塗装の下地の状態	既存塗布面が下地処理されていること。	目視にて確認
施工中	作業環境		温度：5～35℃内 湿度：30～85%内	温湿度計で測定する。
	下塗り	塗膜厚さ	下塗りがメーカー規定膜厚以上塗布されていること。	膜厚計で下塗りの膜厚を測定する。
		表面状態	浮きや汚れが無く、硬化乾燥していること。	目視にて確認
	主材塗り	塗膜厚さ	安重設備：設定膜厚3mm－0mm（全検査値）～＋1mm（平均値）以内であること。 非安重設備：設定膜厚2mm－0mm（全検査値）～＋1mm（平均値）以内であること。	膜厚計で主材の膜厚を測定する。 主材塗終了後の厚さ－下塗終了後の厚さ＝主材塗厚さ
		表面状態	亀裂、汚れ、傷が無く、硬化乾燥していること。	目視にて確認
	中塗り 上塗り	塗膜厚さ	中塗りがメーカー規定膜厚以上塗布されていること。 上塗りがメーカー規定膜厚以上塗布されていること。	塗膜厚さは塗料の使用量で確認する。
表面状態		浮きや汚れが無く、硬化乾燥していること。	目視にて確認	

(2) 耐火被覆厚さに関する測定方法

耐火被覆の耐火性能は、被覆厚に依存し施工にあたり所定の被覆厚を確保するため、膜厚管理が必要となっている。

そこで、耐火被覆が必要厚さを確保されていることを確認するため、電磁膜厚計を用いた耐火被覆厚さを測定する。

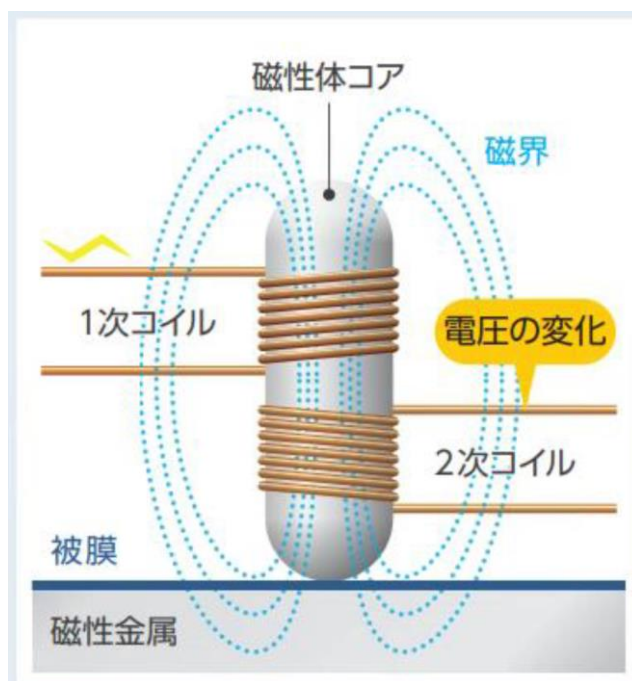
耐火被覆厚さの測定に関して「構造材料の耐火性ガイドブック(2017)日本建築学会」を準用し管理する。

主材乾燥後、事前に定めた被覆厚測定箇所における主材の乾燥被覆厚を測定する。

主材被覆厚は下塗りを差し引いた値であり、その値が管理値に達していない場合は主材を再度塗布する。

a. 耐火被覆厚さの測定原理

耐火被覆厚さの測定原理を第1-1図に示す。交流電磁石を鋼材(磁性金属)に接近させると、接近距離によって、コイルの磁束数に変化し、コイル両端にかかる電圧が変化する。この電圧変化を電流値から読み取り、被覆厚に換算する。



第1-1図 耐火被覆厚さの測定原理

(3) 耐火被覆厚さの測定管理について

a. 管理単位

鉄骨・防護板部材の被覆厚さの管理は部材毎とし耐火被覆面積が8 m²ごとに測定する。なお、1箇所あたりの測定点は5点とする。

測定箇所は、下塗り箇所と主剤塗り箇所が同じ箇所で測定できるように、部材毎に起点を定めそこからの距離を定めて測定を実施する。

b. 管理基準

下限値設定被覆厚 - 0 mm (全検査値) ~ 上限値設定被覆厚 + 1 mm (5点平均値)

(a) 下限値

1点でも下限値を下回った場合は、下回った点のある管理単位の範囲 (8 m²) に塗り増しを行う。

塗り増し後、再度検査を行い管理基準内値であることを確認する。

令和3年6月4日 RO

別紙-12
維持管理

目 次

1. 耐火被覆厚さの設計について	1
2. 損傷事例と原因	1
3. 耐火塗料の劣化	2
4. 定期点検の考え方	2
5. 点検概要	3
6. 補修時期	3
7. 寒冷地・塩害地域の点検実施状況	3
8. 耐火塗装の剥がれ等に対する補修方法	4

1. 維持管理

施工後に耐火被覆が設計通りの機能を維持するためには、耐火被覆の維持管理が重要となる。


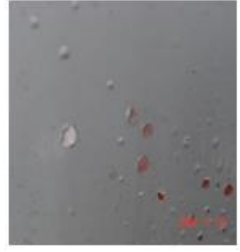

耐火被覆の施工実績を調査した結果、耐火被覆特有の損傷事例は確認されていないことから、一般的な塗料における損傷事例とその原因を踏まえ、管理方法等について説明する。

2. 損傷事例と原因

耐火性能を有する主材は主材の上に塗布される中塗り塗料・上塗り塗料で保護されるため、耐火塗料の性能を担保するために、中塗り塗料・上塗り塗料の健全性を維持する保修計画を立てる。

中塗り塗料・上塗り塗料の塗膜の健全性を損なう劣化事例には以下（第2-1表）のようなものがある。

第2-1表 中塗り塗料・上塗り塗料の劣化事例

項目	内容	劣化状況写真
割れ	塗膜に裂け目ができる現象	
膨れ	塗膜がガスまたは液体を含んでいる状態	
剥がれ	塗膜が付着力を失って塗装面から離れる現象	
傷	外的な荷重によって、塗膜が損傷した状態	

第2-1表の劣化事例に対し、考えられる中塗り塗料・上塗り塗料の劣化を引き起こす要因は以下の通りである。

- ①紫外線：紫外線が樹脂を分解し、着色顔料が粉となる白亜化が生じ、塗膜が薄くなることで劣化する。
- ②水分：雨水等は①で薄くなった塗装面から浸透し、塗膜中にとどまることで塗膜の膨れや剥離につながり、耐火塗料を劣化させる。
- ③塩分：飛来塩分が塗膜面に付着し、雨水に塩分が溶けて①で薄くなった塗膜面から浸透し、塗膜中にとどまることで塗膜の膨れや剥離につながり、耐火塗料を劣化させる。
- ④温度差：主材以外の塗膜は経年で堅くなり、温度差により伸縮する鋼材に対し主材以外の塗膜が伸縮する鋼材に追従しにくくなる。そのため引っ張り力が強く働く中塗り塗料・上塗りの塗膜に優先的にワレが発生することで、塗膜中に水分や塩分が侵入し塗膜の膨れや剥離につながり耐火塗料を劣化させる。
- ⑤衝突物：物理的損傷により塗膜に傷が付いた部分から水分が浸透し、耐火塗料を劣化させる。また、傷の程度によっては、耐火塗料まで損傷することもある。

3. 耐火塗料の劣化

中塗り塗料・上塗り塗料に劣化が生じ、耐火塗料の主材まで損傷させた場合、耐火性能に影響を与える事になる。耐火塗料の主材に影響を与える要因は次の通りである。

- ①水分：主材に水分が触れることで、分解し耐火性能が低下する等の影響を与える。
- ②塩分：主材に塩分が触れることで、反応し耐火性能が低下する等の影響を与える。
- ③衝突物：物理的損傷により主材の塗布量が減り、耐火性能が低下する等の影響を与える。

4. 定期点検の考え方

「3. 耐火塗料の劣化」で整理した劣化要因と事象を踏まえた上で、定期点検の考え方を整理する。

耐火塗料は、下塗り塗料、主材、中塗り塗料および上塗り塗料の複層で構成されており、耐火性能を有する主材は、高耐候性のふっ素樹脂系の上塗り塗料で保護されえるため長期間安定した塗膜を維持可能である。

しかしながら、上塗り塗料の塗膜劣化や傷等により、主材が保護されなくなった場合、耐火性能が低下するおそれがある。これを防止するため、点検による上塗り塗料の塗膜劣化を早期に発見、補修又は塗増しを行い、塗膜の維持管理をする。

5. 点検概要

耐火性能維持のためには、施工後は巡視点検として日々塗装面の外観点検を目視にて実施し、傷や上塗り塗料の塗膜劣化の早期発見と共に、適切な補修または塗増し等を実施する。

異常が確認された場合や塗装面に影響を与えるような地震等が発生した場合は、メーカーによる確認を実施する。

6. 補修時期

耐火塗装は、上塗り塗料にふっ素樹脂系を適用している。上塗り塗料にふっ素樹脂を使用することで高耐候性能が期待できるため、第6-1表に示すサイクルの補修塗装とする。

第6-1表 期待耐用年数の塗増し時期

上塗材	屋外設備の補修時期	備考
ふっ素樹脂系	8~10年程	設置環境や施工部位、設備の方角等により異なるため、今後状況を確認し適切なサイクルを設定する。

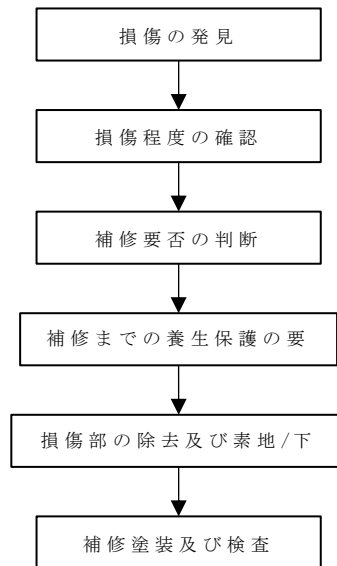
7. 寒冷地・塩害地域の点検実施状況

再処理施設は、寒冷地・塩害地域に設置しているため、地域特有の劣化が生じるのか耐火塗装の寒冷地・塩害地域での施工実績を確認した。確認の結果、施工後における塗膜劣化の事例は確認できないことから寒冷地と塩害地域特有の影響は生じないと考えられるため、寒冷地と塩害地域を限定とした特別な点検は不要と考えられる。

ただし、塗装面に傷や劣化があれば一般地域に比べて劣化速度が早まることが予想されるため、上記3.に記載した点検を実施する。

8. 耐火塗装の剥がれ等に対する補修方法

耐火塗料の剥がれ等の劣化（損傷）に対して、以下の第8-1図に示す手順に基づき対応する。



第8-1図 耐火塗装補修作業概略手順