

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外外火 04 R11
提出年月日	令和 4 年 6 月 9 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 航空機墜落による火災の防護設計について

- ・ R10 からの変更点を下線に示す。
- ・ 本資料は，2021 年 9 月 7 日のヒアリングにて受けたコメントを踏まえ，許容温度，熱伝達率，応力評価の対象部位選定等の考え方の整理，解析モデルや上位文書で読み込んでいた評価方法及び数値の出典の明確化，用語の精査等を行った。
- ・ 補足説明資料の記載ルールに基づく記載の修正及び一部記載について読みやすさの観点から適正化を行った。

## 目 次

1.	概要	1
2.	航空機墜落火災の発生条件等について	1
2.1	航空機墜落地点の設定	1
2.2	航空機墜落火災における熱影響評価の対象航空機の選定	2
2.3	航空機墜落火災と他の事象の組合せについて	2
2.4	航空機墜落火災に対する防護設計の火炎条件	3
3.	航空機墜落火災の防護設計の基本的な考え方	3
4.	防護対策	6
4.1	耐火被覆	8
4.2	遮熱板の設計	9
5.	評価方針	9
5.1	航空機墜落火災に対する施設の評価対象	9
5.2	航空機墜落火災の影響に対する評価対象の分類	10
5.3	評価方針	11
5.4	その他の考慮	13
6.	許容温度の設定	14
別添－1	熱影響評価の対象航空機の選定	
別添－2	航空機墜落火災と他事象との重畳	
別添－3	必要離隔距離の算出	
別添－4	耐火塗料の説明書	
別添－5	耐火被覆厚さの設定	
別添－6	航空機墜落火災の温度評価条件と大臣認定試験条件との比較	
別添－7	施工管理	
別添－8	維持管理	
別添－9	対流熱伝達	
別添－10	熱応力評価	

■については商業機密及び核不拡散の観点から公開できません。

## 1. 概要

本資料は、再処理施設及びMOX燃料加工施設の第1回設工認申請(令和2年12月24日申請)のうち、以下の添付書類に示す航空機墜落火災の防護設計を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-4-3 外部火災への配慮が必要な施設の評価方針」
- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-4-3-1 外部火災への配慮が必要な施設の許容温度、許容応力の設定根拠」
- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-4-4 外部火災防護における評価結果」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-3 外部火災への配慮が必要な施設の評価方針」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-4 外部火災防護における評価結果」

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25年6月19日 原子力規制委員会)」(以下「外部火災ガイド」という。)及び「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」(平成14・07・29原院第4号、平成14年7月30日原子力安全・保安院制定)(以下「航空機落下評価ガイド」という。)を参考として、航空機墜落火災の評価方針及び評価条件並びに航空機墜落火災に対する防護対策の考え方を補足する。

本資料で示す航空機墜落火災の評価方針及び評価条件等については、再処理施設、MOX燃料加工施設の今回申請対象以外の建屋や屋外構築物及び今後申請する廃棄物管理施設に係る建屋や屋外構築物に対しても適用されるものである。

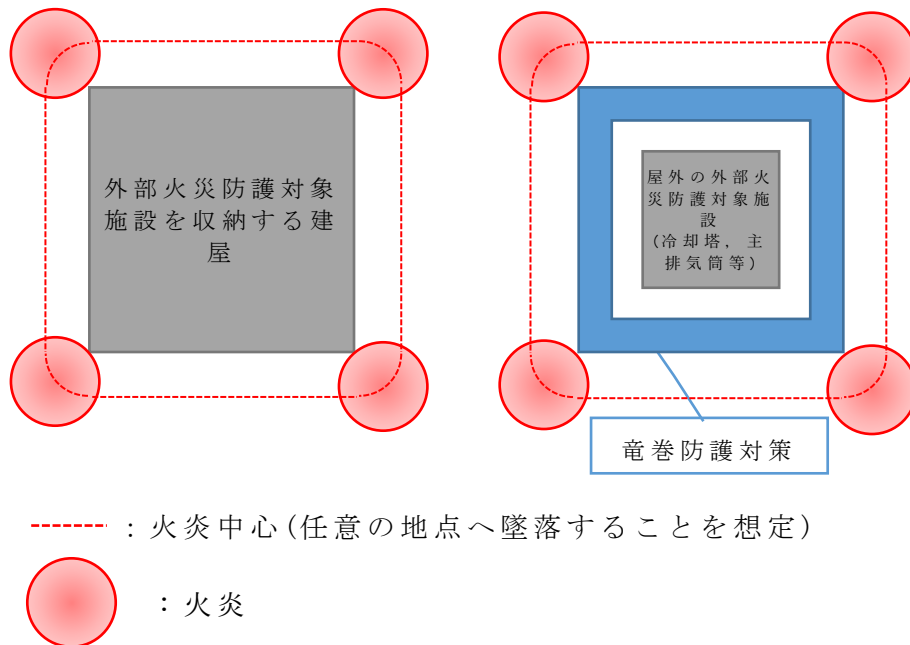
なお、本資料は、第1回設工認申請対象施設を対象としたものであり、第2回設工認申請時に申請対象施設を踏まえ、記載を拡充する。

## 2. 航空機墜落火災の想定について

### 2.1 航空機墜落地点の設定

航空機墜落火災については、建屋等の直近に墜落する火災を想定し、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ため、航空機墜落地点については、第2.1-1図のように、外部火災防護対象施設を収納する建屋又は屋外の外部火災防護対象施設(以下、「外部火災防護対象施設等」という)に接する任意の位置を墜落地点として想定し、円筒火炎を設定する。

また、使用済燃料収納キャスクを収納する建屋は、使用済燃料収納キャスクに波及的破損を与えない設計とするため、外部火災防護対象施設と同様に建屋に接する任意の位置を墜落地点として想定し、円筒火炎を設定する。



第 2.1-1 図 設計上想定する航空機の墜落地点のイメージ(平面図)

## 2.2 航空機墜落火災における熱影響評価の対象航空機の選定

航空機墜落火災による熱影響評価の対象とする航空機（以下「熱影響評価の対象航空機」という。）は、以下の手順にて選定する。

- (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、墜落による火災を想定する航空機を選定する。
- (2) (1)から外部火災ガイドに基づき、航空機墜落の発生する可能性が高い航空機及び燃料積載量が最大の航空機を墜落による火災を想定する航空機に選定する。
- (3) (2)のうち、火災条件を同等に揃えた場合、燃焼継続時間及び輻射強度から施設への影響が大きい航空機を、熱影響評価の対象航空機とする。

上記のステップで選定した結果、F-16を熱影響評価の対象航空機とした。抽出過程を別添－1に示す。

## 2.3 航空機墜落火災と他の事象の組合せについて

航空機墜落火災と組合せを考慮すべき自然事象について検討する。検討に当たっては、検討対象とする自然現象の抽出、事象の特性(相関性、影響モード及び発生頻度)の整理を行い、自然現象毎に航空機墜落火災との組合せの考慮の可否を決定する。

その結果、航空機墜落火災との組合せを考慮する必要のある自然現象として、風(台風)及び積雪といった長期的に影響をもたらすもの、並び



に航空機墜落火災による影響評価の初期温度として考慮する高温が選定された。また、発生頻度の観点で航空機墜落火災との組合せを考慮する必要がないとした地震、竜巻及び火山の影響については、航空機墜落火災の影響が及ぶ期間※においてそれらの影響を受ける年超過確率についても検討し、その可能性は十分低いことを確認した。航空機墜落火災との組合せを考慮する必要のある自然現象についての検討を別添－2に示す。

しかし、万が一航空機墜落火災の影響が及ぶ期間において竜巻等が発生したとしても、再処理施設への影響を低減するために、当該期間中は使用済燃料の再処理を停止する等の措置を講ずることとし、保安規定に定めて管理する。

※航空機墜落火災の影響として、後述する竜巻防護対策設備の飛来物防護ネット、耐火被覆及び遮熱板の損傷を想定し、航空機墜落火災の影響が及ぶこれらの損傷が復旧するまでの期間として、初回設置時の期間を参考に6カ月を想定する。

#### 2.4 航空機墜落火災に対する防護設計の火災条件

「2.2 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定」にて選定した熱影響評価の対象航空機から、外部火災ガイドに基づき第2.4-1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する。

- ・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。
- ・気象条件は無風状態とする。
- ・輻射強度を計算により求めるため、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2.4-1表 航空機墜落火災の火災源の設定

	設定条件	備考
熱影響評価の 対象航空機	F-16	別添－1 熱影響評価の対象航空機の選定
評価モデル	円筒火災	外部火災ガイドによる
円筒半径(m)	5.4	機体投影面積から算出
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

#### 3. 航空機墜落火災の防護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し、以下の施設を対象として防護設計を考慮する。

- a. 外部火災防護対象施設を収納する建屋
  - b. 屋外の外部火災防護対象施設
  - c. 外部火災防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設（以下「波及的影響を及ぼし得る施設」という。）
  - d. 建屋内の外部火災防護対象施設のうち、航空機墜落火災による竜巻防護対策設備の飛来物防護板（以下「飛来物防護板」という。）の温度上昇から影響を受ける外部火災防護対象施設（以下「飛来物防護板等から影響を受ける外部火災防護対象施設」という。）
  - e. 使用済燃料収納キャスクを収納する建屋
- (2) 上記施設について、建屋等の直近で航空機墜落による火災が発生した場合を想定し、以下のとおり設計する。
- a. 外部火災防護対象施設を収納する建屋
    - ・ 建屋直近での航空機墜落による火災の輻射強度の影響により、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。
  - b. 屋外の外部火災防護対象施設
    - ・ 航空機墜落による火災による施設を構成する部位の温度上昇により安全機能を損なわない設計とする。
  - c. 波及的影響を及ぼし得る施設
    - ・ 航空機墜落による火災の影響で外部火災防護対象施設に対して波及的影響を及ぼさない設計とする。
  - d. 飛来物防護板から影響を受ける外部火災防護対象施設
    - ・ 航空機墜落火災に対し、飛来物防護板の温度上昇による熱影響を考慮しても、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設計とする。
  - e. 使用済燃料収納キャスクを収納する建屋
    - ・ 航空機墜落による火災に対し、建屋が必要な構造強度を維持することで使用済燃料収納キャスクに波及的破損を及ぼさない設計とする。
- (3) 航空機墜落火災において、(2)の設計を達成するため、航空機墜落火災による輻射強度を算出するとともに、外部防護対象施設の安全機能の維持等に必要な許容温度を設定し、以下の観点で安全機能を損なわないことを確認する。
- a. 外部火災防護対象施設を収納する建屋
    - ・ 建屋直近での航空機墜落による火災を想定することを踏まえ、建屋内の外部火災防護対象施設の安全機能に影響を及ぼさないことを目的として、建屋外壁の温度及び建屋内の温度上昇を算出し、建屋内の外部火災防護対象施設に影響がないこと及び建屋外壁に要求する閉じ込め等の機能を損なわないことを確認する。

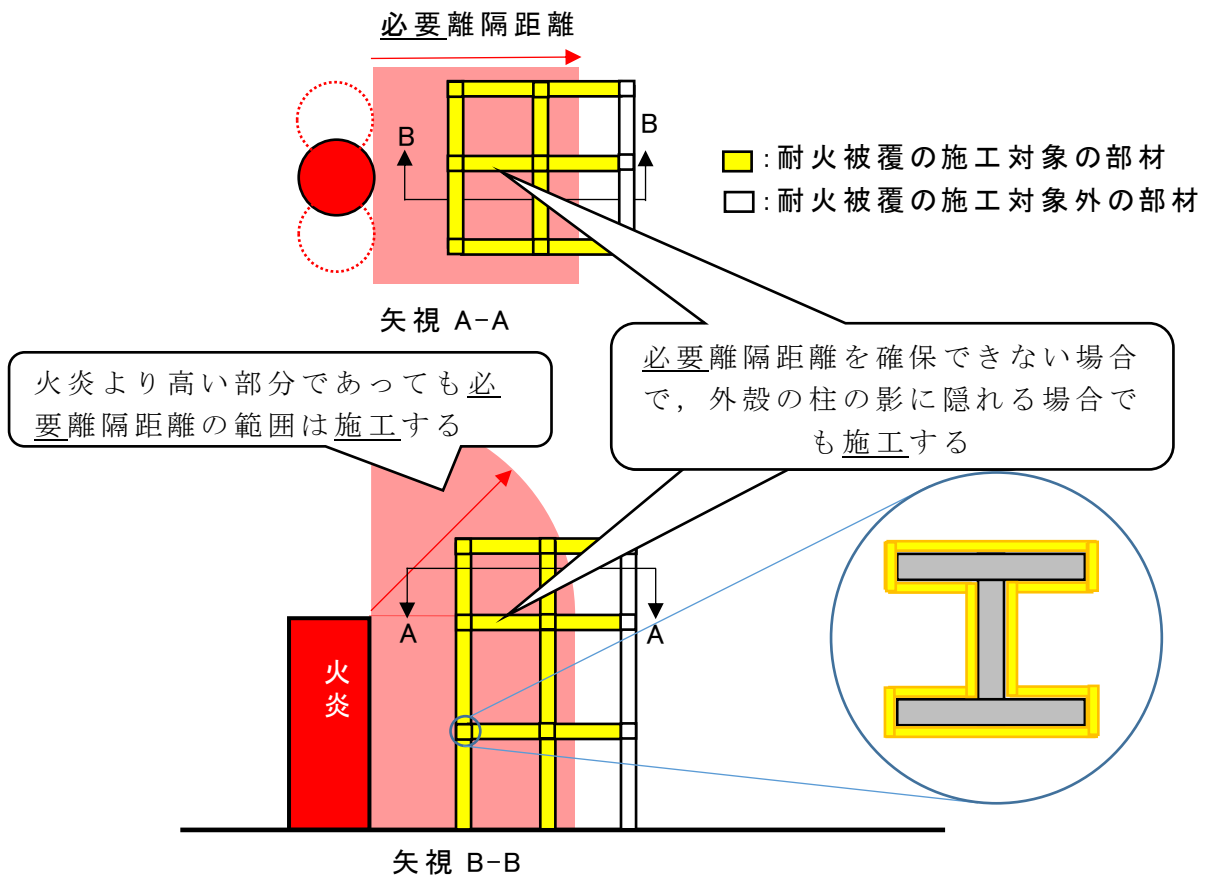
- b. 屋外の外部火災防護対象施設
- 外部火災防護対象施設の安全機能を損なわないために、外部火災防護対象施設の機能維持に必要な部位を抽出し、部位毎に機能維持に必要な温度を許容温度として設定するとともに、航空機墜落火災による温度上昇を考慮した各部位の温度が許容温度以下であることを確認する。
  - 外部火災防護対象施設の機能を維持するため支持架構については、構成する鋼材の構造強度が維持できる温度を許容温度として設定し、航空機墜落火災による温度上昇を考慮した鋼材の温度が許容温度以下であることを確認する。
  - 施設の直近での航空機墜落による火災を想定することから、外部火災防護対象施設の機能維持に必要な部位及び支持架構が火炎からの輻射による温度上昇により、安全機能を損なうおそれがある場合には、「4. 防護対策」による対策を講じることとし、上述の温度評価についても「4. 防護対策」による対策を考慮した評価を行う。
- c. 波及的影響を及ぼし得る施設
- 外部火災防護対象施設に波及的影響を及ぼさないため、波及的影響を及ぼし得る施設が倒壊及び脱落しないよう、波及的影響を及ぼし得る施設の構造強度が維持できる温度を許容温度として設定し、航空機墜落火災による温度上昇を考慮した施設の温度が許容温度以下であることを確認する。
  - 波及的影響を及ぼし得る施設については、施設の直近での航空機墜落による火災を想定することから、構造を維持するために必要な部位が火炎からの輻射による温度上昇により、構造強度が維持できる温度を超えるおそれがある場合には、「4. 防護対策」による対策を講じることとし、上述の温度評価についても「4. 防護対策」による対策を考慮した評価を行う。
- d. 飛来物防護板から影響を受ける外部火災防護対象施設
- 外部火災防護対象施設の安全機能を損なわないよう、機能維持に必要な部位を抽出し、部位毎に機能維持に必要な温度を許容温度として設定し、航空機墜落火災による飛来物防護板の温度上昇を考慮した各部位の温度が許容温度以下であることを確認する。
- e. 使用済燃料収納キャスクを収納する建屋
- 建屋自体に必要な構造強度を維持することで使用済燃料収納キャスクに波及的破損を及ぼさないよう、建屋外壁のコンクリートの圧縮強度を維持できる温度を許容温度として設定し、航空機墜落火災による温度上昇を考慮した外壁の温度が許容温度以下であることを確認する。

#### 4. 防護対策

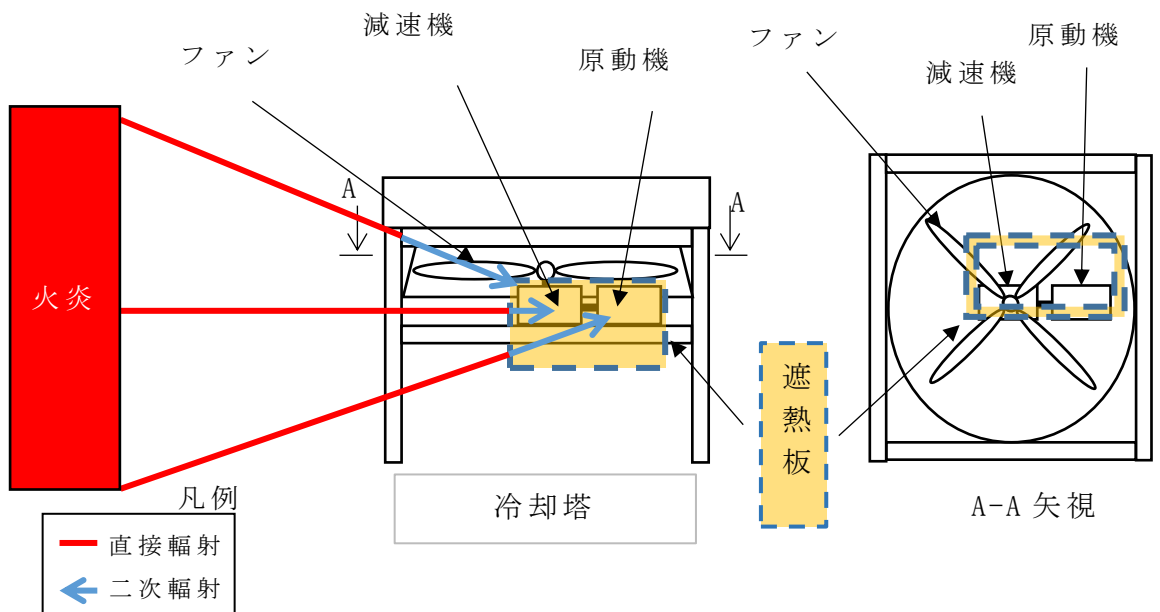
屋外の外部火災防護対象施設及び波及的影響を及ぼし得る施設は、施設外縁からの離隔距離の確保、もしくは部材の厚さ等について熱容量が大きくなるよう考慮し、温度が上昇しにくい設計の採用を基本とするが、施設の設置環境を考慮する必要があることから、火災時には熱によって発泡し断熱効果を発揮する耐火被覆及び遮熱板を組み合わせた防護設計とし、a.～d.に示す事項を考慮する。

第 4-1 図に耐火被覆の施工対象の概要を、第 4-2 図に遮熱板の概要を示す。

- a. 防護対策は、耐震成立性及び施工性の観点や、脱落等の発生リスクを軽減できる耐火被覆を基本とし、耐火被覆の施工が困難な摺動部や耐火被覆が施工できない材質を有する部位は、輻射を遮るための遮熱板を設置する。
- b. 耐火被覆は、火災と直接接する部材は全てを施工対象とするとともに、その他の部材は鋼材の板厚毎に許容温度以下となる離隔距離(以下「必要離隔距離」という。)を確保できないものを施工対象とする。施工対象とした部材は全面に施工することを基本とする。ただし、明らかに輻射を受けない遮熱板や防護板の裏側は施工しない。  
必要離隔距離の詳細を、別添－3に示す。
- c. 耐火被覆の厚さは、支持架構の許容温度を踏まえ、設備の重要度に応じて一律に設定する。
- d. 遮熱板を設置する場合は、脱落により外部火災防護対象施設の安全機能に影響を与えない設計とする。



第 4-1 図 耐火被覆の施工対象の概要



第 4-2 図 遮熱板の設計の概要

## 4.1 耐火被覆

### (1) 耐火被覆の設計

耐火被覆となる主材を含め、主材の剥がれを防止するための下塗り、主材の保護等を行う中塗り及び上塗りの4層の塗装を施工する設計とする。

耐火被覆は、火災時には熱によって主材が発泡して数十倍の厚さの断熱層を形成し、鉄骨の温度上昇を緩和することを目的に開発された塗料である。使用する耐火被覆についての説明を別添-4に示す。

耐火被覆の設計に対する基本的な考え方を以下に示す。

- ・ 外部火災防護対象施設又は波及的影響を及ぼし得る施設を構成する部材について、火災と直接接する最外周の部材は、全て耐火被覆の施工対象とし、その他の部材は第4-1表に示す板厚毎に評価した必要離隔距離を満足しない部材に対し、施工することとする。
- ・ 耐火被覆は、全周施工を基本とするが、火災からの輻射が完全に遮断されている範囲(遮熱板の裏側等)については、施工対象外とする。
- ・ 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施工する。
- ・ 必要厚さの評価において設定する部材の厚さ及び形状は、部材の温度上昇を保守的に評価するため、飛来物防護ネットの外周に配置される部材のうち、最も厚さが薄く形状による受熱面への熱影響が大きい、厚さ9mmの平板(ステンレス鋼板)とし、許容温度以下となる耐火被覆の施工厚さを保守的に算出する。
- ・ 設定する耐火被覆厚さは、外部火災防護対象施設は3mm、波及的影響を及ぼし得る施設は2mmとする。耐火被覆厚さの設計方針、設定の考え方、設定の流れ等を別添-5に示す。

耐火被覆の施工厚さを設定するための熱伝導率及び比熱の設定には、入熱量及び判定基準が航空機墜落火災と同等となる1時間耐火の大臣認定試験の結果を用いている。航空機墜落火災と大臣認定試験の入熱量及び判定基準の比較を別添-6に示す。

### (2) 施工管理

耐火被覆が設計のとおり機能を発揮するために、品質及び設定した耐火被覆施工厚さを確保する必要がある。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、耐火被覆施工厚さの測定管理方法を定めて施工する。

耐火被覆の施工管理を別添-7に示す。

### (3) 維持管理

施工後に耐火被覆が設計のとおり機能を維持するために、耐火被覆の維持管理が重要である。

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、維持管理方法を定める。耐火被覆の維持管理を別添－8に示す。

## 4.2 遮熱板の設計

遮熱板は、耐火被覆を施工できない防護対象部位への輻射を遮るために設ける。遮熱板には耐火被覆を施工し、耐火被覆の断熱性能と相まって防護対象部位への輻射を遮るものである。

遮熱板の設計に対する基本的な考え方は以下のとおりとする。

- ・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。
- ・安全冷却水系の冷却塔の冷却能力等の安全機能に影響を与えない範囲に設置する。
- ・遮熱板は、遮熱板から生じる輻射による間接的な影響により、防護対象部位が機能を損なうおそれのない設計とするため、輻射の受熱面に耐火被覆を施工する。
- ・防護対象部位が、竜巻及び地震による遮熱板への影響により、機能を損なうおそれのない設計とする。
- ・防護対象部位は、遮熱板を設置しても点検が可能な構造とする。

## 5. 評価方針

「2. 設計の基本的な考え方」を踏まえ、航空機墜落火災に対する評価方針を示す。

### 5.1 航空機墜落火災に対する施設の評価対象

航空機墜落火災に対し、施設が機能を維持するために必要な評価対象部位を選定する。

#### (1) 外部火災防護対象施設を収納する建屋

航空機墜落火災の火炎からの輻射影響を受けた場合に、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及び建屋外壁が要求される安全機能を損なわないことを評価するために必要となる部位として、外壁及び天井スラブを対象とし、評価を行う。ただし、天井スラブが建屋外壁よりも壁が厚い場合は、以下の理由から、天井スラブの評価は、建屋外壁の評価に包絡される。

- a. 天井スラブは外壁と比べ、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。
- b. 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。

(2) 屋外の外部火災防護対象施設

航空機墜落火災の火炎からの輻射影響を受けた場合に、安全機能を維持するために必要となる部位を対象とし、評価を行う。

安全冷却水系の冷却塔では、構造を維持した上で、冷却水の流路及び空気を送風する部位を維持することにより、冷却能力を維持できることから、支持架構における支持機能を維持するために必要な部材、冷却水の流路及び電動機等の送風に必要な部位を対象として評価する。

主排気筒及び屋外ダクトについては、構造を維持することで排気に関する機能を維持できることから、主排気筒、屋外ダクト及び支持架構における支持構造を維持するために必要な部位を対象とし、航空機墜落火災による温度上昇を考慮した部位の温度が許容温度を上回らないことを評価する。

第1回申請対象施設以外の施設に関する詳細は、申請回次に合わせて追記する。

(3) 波及的影響を及ぼし得る施設

航空機墜落火災の火炎からの輻射影響を受けた場合に、倒壊しない強度を維持することで、外部火災防護対象施設へ波及的影響を与えないようにできることから、外部火災防護対象施設本体と火災源の間に位置する竜巻防護対策設備の支持構造物を対象とし、航空機墜落火災による温度上昇を考慮した部位の温度が許容温度を上回らないことを評価する。

(4) 飛来物防護板から影響を受ける外部火災防護対象施設

航空機墜落火災により飛来物防護板は熱影響を受け温度上昇することから、飛来物防護板から間接的に熱影響を受ける外部火災防護対象施設の部位を対象として評価を行う。

(5) 使用済燃料収納キャスクを収納する建屋

航空機墜落火災の火炎からの輻射影響を受けた場合に、建屋内に収納する使用済燃料収納キャスクに波及的影響を及ぼさないことを評価するために必要となる部位として、建屋外壁及び天井スラブを対象とし、外部火災防護対象施設を収納する建屋と同様に建屋外壁について評価を行い、評価が包絡されない場合は、天井スラブも対象として評価を行う。

## 5.2 航空機墜落火災の影響に対する評価対象の分類

「5.1 航空機墜落火災に対する施設の評価対象」を基に、その評価手法や判断基準を考慮し、航空機墜落火災の影響に対する評価対象を以下のとおり、評価対象毎に分類する。

(1) 建屋外壁及び天井スラブ

上記 5.1(1)の外部火災防護対象施設を収納する建屋及び上記



5.1(5) 使用済燃料収納キャスクを収納する建屋の建屋外壁及び天井スラブとする。

(2) 安全冷却水系の冷却塔等の冷却能力を損なわないために必要となる電動機等

上記 5.1(2)の屋外の外部火災防護対象施設のうちの安全冷却水系の冷却塔等の冷却能力等を損なわないために必要となる電動機等とする。

(3) 支持構造物

上記 5.1(2)の屋外の外部火災防護対象施設及び、上記 5.1(3)の波及的影響を及ぼし得る施設の支持構造物とする。

(4) その他の施設

上記 5.1(4)の飛来物防護板等から影響を受ける外部火災防護対象施設のうち安全機能を維持するために必要な部位とする。

### 5.3 評価方針

「5.2 航空機墜落火災の影響に対する評価対象の分類」に基づき、航空機墜落火災の影響を考慮する部位に対し、航空機墜落火災からの熱影響評価を実施する。

熱影響評価においては、防護対策である耐火被覆及び遮熱板を考慮する。

(1) 建屋外壁及び天井スラブ

外部火災防護対象施設を収納する建屋及び使用済燃料収納キャスクを収納する建屋に対する航空機墜落火災の評価については、建屋外壁の直近で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、火災の火炎から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、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(輻射強度)は全て建屋内面に向かう評価モデルとする。

外部火災防護対象施設を収納する建屋については、航空機墜落火災による温度上昇を考慮し建屋外壁及び天井スラブの温度を算出し、建屋自体の閉じ込め等の要求される機能を維持できることを確認する。また、航空機墜落火災による温度上昇を考慮し外壁の内面の温度を算出し、建屋内の外部火災防護対象施設が安全機能を損なわないことを確認する。

なお、使用済燃料収納キャスクを収納する建屋については、航空機墜落火災による温度上昇を考慮し建屋外壁及び天井スラブの温度を算出し、建屋自体の構造強度等の要求される機能を維持できることを確認する。

(2) 安全冷却水系の冷却塔の冷却能力

安全冷却水系の冷却塔は、冷却能力を損なわないことを確認するため、航空機墜落火災による熱影響に対し、以下の評価を行う。

- a. 冷却塔内に設置されている冷却水を通水する流路は、航空機墜落火災から与えられた熱量による冷却水の温度上昇を算出し、冷却水が再処理施設の各施設の溶液等から発生する崩壊熱を除去するために必要な最大運転温度を維持できることを確認することにより、崩壊熱の除去機能を損なわないことを評価する。
- b. 冷却に必要な部位の許容温度は、運転を継続するための設計温度として部位毎に設定されているものとし、防護対策を施すことで許容温度以下とする。冷却に必要な部位のうち、遮熱板による防護を期待する部位は、遮熱板の裏面からの熱影響を考慮しても、許容温度を満足することを確認することにより、安全機能を損なわないことを評価する。

### (3) 支持構造物

屋外の外部火災防護対象施設及び波及的影響を及ぼし得る施設の支持架構は、航空機墜落火災の輻射による支持架構を構成する柱、梁等の鋼材の温度上昇を算出し、航空機墜落火災の発生時においても構造強度が維持されることを評価する。

評価に当たっては、火災源から遠ざかるほど輻射強度が低下する性質を踏まえ、鋼材を許容温度以下とするための必要離隔距離を算出し、火災源と評価対象部材の距離と比較する。火災源と評価対象部材の距離が算出された必要離隔距離を下回り、必要離隔距離の範囲内となる部材は、許容温度を超過することになるため、耐火被覆の施工対象とする。

必要離隔距離は、支持架構を構成する H型鋼や角型鋼管等の鋼材の形状、厚さ等の仕様から、鋼材の厚さをパラメータとし保守的に平板モデルを用い、鋼材の厚さ毎に許容温度以下となる距離として算出する。必要離隔距離表を第 5.3-1 表に示す。必要離隔距離の算出過程を別添-3 に示す。

ただし、波及的影響を及ぼし得る施設については、航空機墜落火災が発生した際に考慮する荷重を踏まえ、一時的な強度低下を考慮しても、構造強度が維持されていることを評価する。

必要離隔距離を確保できない部材は、輻射による温度上昇の影響を緩和する耐火被覆を施すことにより許容温度以下となることを確認する。設定した必要離隔距離は火災の高さ方向も対象とする。

第 5.3-1 表 必要離隔距離表

材料	板厚 (mm)	必要離隔距離 (m)	
		屋外の 外部火災防護対象施設	波及的影響を 及ぼし得る施設
炭素鋼	36	1	—
	28	2	—
	22	4	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	13	8
	6.5	15	9
	6.4	15	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	7

(4) その他の施設

飛来物防護板から影響を受ける外部火災防護対象施設については、安全機能を維持する上で必要な部位を抽出し、許容温度が最も低い部位が機能を維持できる温度以下であることを確認することにより、機能を維持できることを評価する。

第 1 回申請対象施設以外の施設に関する詳細は、申請回次に合わせて追記する。

5.4 その他の考慮

航空機墜落火災を施設の直近で想定することにより考慮すべき事項として、発生する高温空気が安全冷却水系の冷却塔の空気吸い込み口に流入し、高温空気の対流熱伝達により冷却性能に影響を及ぼすことが考えられるが、高温空気の対流熱伝達が安全冷却水系の冷却塔の冷却性能へ影響を及ぼさないことを確認している。対流熱伝達の影響を別添-9に示す。

また、加熱された際に部位間に生じる温度差により、支持架構に生じ

る熱ひずみの影響についても検討した。温度差による影響は、火炎に近い部位と遠い部位が存在する支持架構で検討した。温度差により発生する熱応力は、変位制御型の二次応力に分類される。二次応力は、自己拘束によって発生する応力であり、部材が降伏又はひずみを生じた場合、それ以上の応力の増加は起こらないことから、熱応力によって支持架構が破損することはない。そのため、架構の倒壊及び脱落が発生することはない。飛来物防護ネットが波及的影響を冷却塔に及ぼすことはない。

安全冷却水系の冷却塔の支持架構の支持機能が維持されていることの確認については、支持構造物本体として、耐火被覆の施工の有無の境界で温度差が生じる可能性があるため、熱伸びによる応力の影響を考慮しても、支持架構の構造物強度に影響を及ぼすような変形が生じないことを確認している。支持構造物本体の熱応力による影響を別添-10に示す。

支持構造物を構成する部材としては、支持架構を構成する支柱及び梁材において、面によって輻射の受け方が違うことから、熱伸びによる応力の影響を考慮しても、有意な変形が生じないことを確認している。支持構造物を構成する部材の熱応力による影響を別添-10に示す。

第1回申請対象施設以外の施設に関する詳細は、申請回次に合わせて追記する。

## 6. 許容温度の設定

航空機墜落火災に対する評価条件として、許容温度を以下のとおり設定する。

### (1) 建屋外壁の許容温度

建屋外壁を構成するコンクリートに対する許容温度を設定する。コンクリートの許容温度は、「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と同等の強度が維持される温度である 200℃ を許容温度として設定する。

### (2) 安全冷却水系の冷却塔の冷却能力

安全冷却水系の冷却塔の冷却能力を維持するための許容温度を以下のとおり設定する。

(a) 冷却水は、航空機墜落火災からの輻射による温度上昇を考慮した上で、崩壊熱の除去に必要な温度とする。

(b) 冷却に必要な部位は、冷却機能を維持するために必要な設計温度とする。

### (3) 支持構造物の許容温度

支持構造物を構成する柱・梁材である鋼材に対する許容温度を設定する。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。外部火災防護対象施設は、それらが有する安全機能を損なわないため、鋼材の強度低下が起こらない温度を

許容温度とする。波及的影響を及ぼし得る施設は、一時的な強度低下を考慮しても、必要な構造強度が維持される温度を許容温度とする。

第 6-1 表に、設定した許容温度を示す。

第 6-1 表 設定した許容温度

施設	許容温度
外部火災防護対象施設	325℃
波及的影響を及ぼし得る施設	450℃

(4) その他の施設の許容温度

飛来物防護板等から影響を受ける外部火災防護対象施設の許容温度については、申請回次に合わせて追記する。

令和4年6月9日 R4

別添－ 1

熱影響評価の対象航空機の選定

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	墜落による火災を想定する航空機の選定	1
2.1	選定の考え方	1
2.2	選定結果	1
3.	熱影響評価の対象航空機の選定	4
3.1	燃焼継続時間の算出	5
3.2	輻射強度の算出	7
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、墜落による火災を想定する航空機の選定の考え方、航空機墜落火災による熱影響評価の対象とする航空機（以下「熱影響評価の対象航空機」という。）の選定の考え方及びそれらの結果について説明する。

熱影響評価の対象航空機の選定に当たっては、墜落による火災を想定する航空機を複数選定した上で、航空機墜落火災の燃焼継続時間及び航空機墜落火災による輻射強度を考慮して、最も厳しい熱影響を与える航空機を選定する。

## 2. 墜落による火災を想定する航空機の選定

### 2.1 選定の考え方

墜落による火災を想定する航空機は、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」（平成14・07・29原院第4号，平成14年7月30日原子力安全・保安院制定）の落下事故の分類を踏まえ、自衛隊機又は米軍機のうち、訓練空域内を訓練中の航空機及び訓練空域周辺を飛行する航空機から複数選定する。

墜落による火災を想定する航空機の選定に当たっては、以下の①及び②とともに、主要な航空機となる可能性のある航空機についても考慮する。

#### ①積載燃料が最大の航空機：

「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド（平成25年6月19日 原子力規制委員会）」（以下「外部火災ガイド」という。）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墜落の可能性のある航空機：

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

### 2.2 選定結果

選定結果を第2-1表に示す。

#### (1) 積載燃料が最大の航空機

外部火災ガイドにおいては、「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。調査結果を第2-2表に示す。

第2-2表より、燃料積載量が最大となる KC-767 を選定する。

#### (2) 墜落の可能性のある航空機

現地において目視及び飛行音により飛来状況を確認し、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2-3表に示す。訓練飛行回数の調査の結果、出現割合が高いことから、墜落の可能性のある航空機としては、自衛隊機の F-2 及び米軍機の F-16 を選定する。



(3) 主要な航空機となる可能性のある航空機

上記(1)及び(2)に加え、主要な航空機となる可能性のあるF-35を選定する。

第 2-1 表 墜落による火災を想定する航空機及び燃料積載量

<u>墜落による火災を想定する航空機</u>	<u>燃料積載量 (m<sup>3</sup>)</u>
<u>KC-767</u>	145.1 <sup>[1]</sup>
<u>F-2</u>	10.4 <sup>[2][3]</sup>
<u>F-16</u>	9.8 <sup>[5][3]</sup>
<u>F-35</u>	10.8 <sup>[3][4]</sup>

[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.

第 2-2 表 主要航空機（自衛隊機）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(1)
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 <sup>※4</sup>
		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 <sup>※1</sup>
		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 <sup>※5</sup>
		F-2A/B	戦闘	16	11	10,400 <sup>※5</sup>
		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 <sup>※1</sup>
		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 <sup>※2</sup>
		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 <sup>※3</sup>
	回転翼	CH-47J	輸送	16	5	3,899

出典：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する。

(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2-3表 自衛隊機及び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(自衛隊機)及び F-16(米軍機)の 出現割合	97.4%	98.7%	98.0%	97.4%	99.3%

### 3. 熱影響評価の対象航空機の選定

上記2.において選定された墜落による火災を想定する航空機から、熱影響評価の対象航空機を選定する。

選定に当たっては、墜落による火災を想定する航空機の燃焼面積、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、外部火災ガイドに基づき、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を考慮し、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

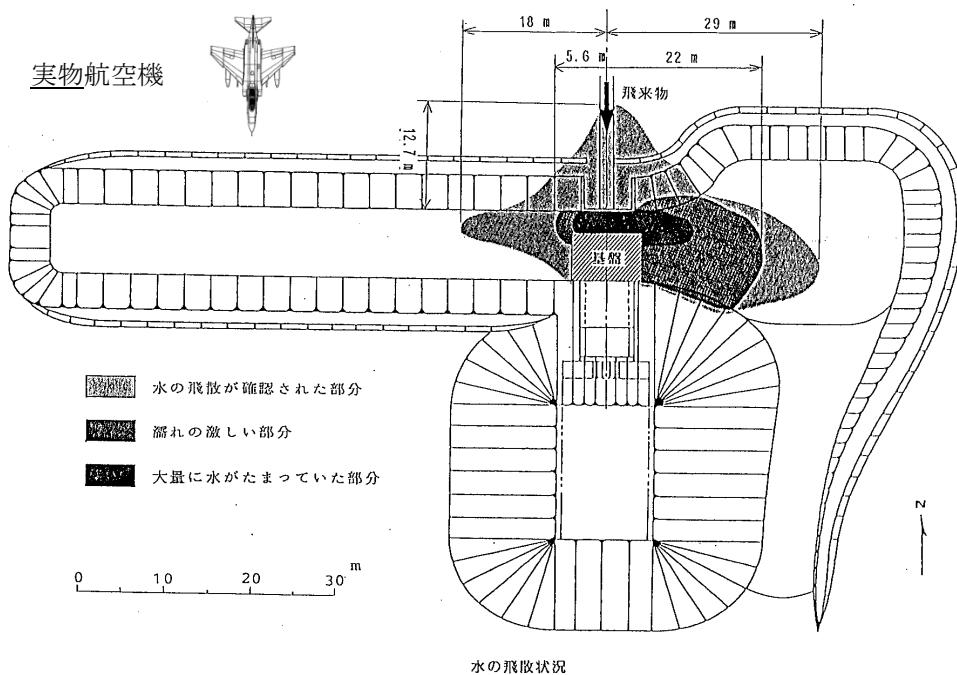
##### (1) 燃焼面積の設定

燃焼面積については、米国サンディア研究所において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て設定した。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から、燃焼面積は航空機の投影面積と同じとする。第3-2図に航空機の投影面積のイメージを、第3-1表に対象航空機の投影面積を示す。

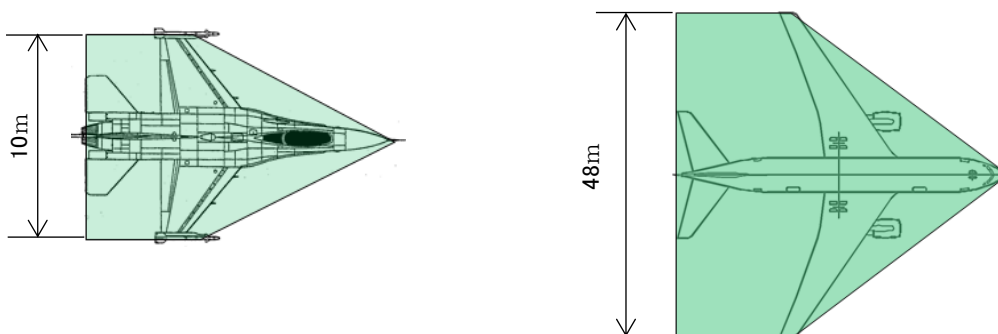
第3-1表 墜落による火災を想定する航空機の投影面積<sup>[1][2][3][4]</sup>

墜落による火災を想定する航空機	投影面積 (m <sup>2</sup> )
KC-767	約 1,500
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水(模擬燃料)の飛散範囲



第3-2図 航空機の投影面積イメージ  
 (左図: F-16, 右図: KC-767)

## (2) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、下式より算出する。燃焼速度は、文献<sup>[1]</sup>から油面降下速度  $8.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  とする。燃焼面積は、上記(1)の対象航空機の投影面積から KC-767 は  $1,500 \text{m}^2$ 、F-2 は  $110 \text{m}^2$ 、F-16 は  $90 \text{m}^2$  及び F-35 は  $110 \text{m}^2$  と設定する。

燃料積載量は第 2-3 表から、KC-767 は  $145.1 \text{m}^3$ 、F-2 は  $10.4 \text{m}^3$ 、F-16 は  $9.8 \text{m}^3$  及び F-35 は  $10.8 \text{m}^3$  である。

上記データ及び下式より、第 3-2 表に示すように、燃焼継続時間は 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 ( $\text{m}^3$ )  
A : 燃焼面積 ( $\text{m}^2$ )  
v : 燃焼速度 (m/s)

第 3-2 表 墜落による火災を想定する航空機の燃焼に関する条件及び算出結果

墜落による火災を想定する航空機	燃焼面積 ( $\text{m}^2$ )	燃焼半径* <sup>1</sup> (m)	燃料積載量 ( $\text{m}^3$ )	燃焼速度 (m/s)	燃焼継続時間 (s)
<u>KC-767</u>	約 1,500	約 22	145.1	$8.0 \times 10^{-5}$	約 1,200
<u>F-2</u>	約 110	約 6	10.4		約 1,200
<u>F-16</u>	約 90	約 5	9.8		約 1,400
<u>F-35</u>	約 110	約 6	10.8		約 1,300

※1 燃焼面積を円に換算した場合の等価半径

[1] 日本火災学会編. 火災便覧 新版, 共立出版, 1984.

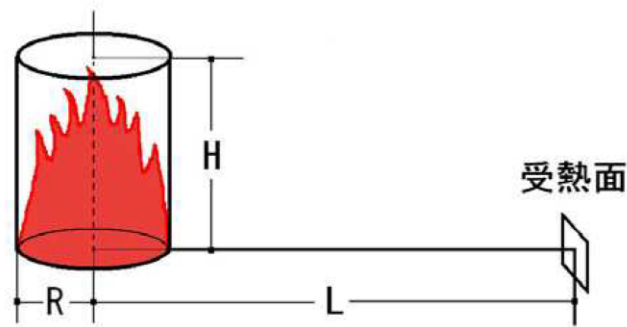
## 3.2 輻射強度の算出

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、円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は、航空機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。

### (1) 形態係数及び輻射強度の算出

形態係数及び輻射強度の算出は、外部火災ガイドと同様に受熱面が輻射帯の底部と同一平面上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、外部火災ガイドと同様に下式より算出する。

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

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

ここで、

- $\varnothing$  : 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、下式より算出する。  
算出結果を第 3-3 表に示す。

$$E = Rf \cdot \varnothing + E_s$$

ここで、

- E : 輻射強度 (W/m<sup>2</sup>)
- Rf : 輻射発散度 (W/m<sup>2</sup>)
- $\varnothing$  : 形態係数 (-)
- E<sub>s</sub> : 太陽光の輻射強度 (W/m<sup>2</sup>) (=400) [1]

[1] 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

第 3-3 表 墜落による火災を想定する航空機の輻射に関する条件及び算出結果

墜落による火災を想定する航空機	形態係数 <sup>※1</sup>	輻射発散度 <sup>※2</sup> (W/m <sup>2</sup> )	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )
KC-767	0.5	58×10 <sup>3</sup>	29.4×10 <sup>3</sup>
F-2			
F-16			
F-35			

※1：離隔距離を想定しない場合の形態係数

※2：外部火災ガイドの付属書 B の附録 B データ集の輻射発散度より

### 3.3 熱影響評価の対象航空機の選定結果

第 3-4 表に熱影響評価の対象航空機の選定結果を示す。輻射強度は墜落による火災を想定する航空機において共通であるが、燃焼継続時間が異なる。輻射強度が同じ場合は、燃焼継続時間が長い航空機墜落による火災が、厳しい熱影響の結果を与える。よって、最も燃焼継続時間が長く厳しい熱影響の結果を与える F-16 を、熱影響評価の対象航空機として選定する。

第 3-4 表 熱影響評価の対象航空機の選定結果

墜落による火災を想定する航空機	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )	燃焼継続時間 (s)	熱影響評価の対象航空機の選定結果
KC-767	29.4×10 <sup>3</sup>	約 1,200	＝
F-2		約 1,200	＝
F-16		約 1,400	○
F-35		約 1,300	＝

<凡例>○：選定，＝：選定対象外

令和4年6月9日 R7

## 別添-2

航空機墜落火災と他事象との重畳



## 目 次

1.	はじめに .....	1
2.	検討対象とする自然現象 .....	1
3.	航空機墜落火災との組合せの検討 .....	4
4.	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 <u>発生</u> .....	7
5.	まとめ .....	9
6.	参考文献 .....	9

## 1. はじめに

再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則並びに加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の第九条「外部からの衝撃による損傷の防止」では、自然現象、自然現象の組合せ及び人為事象に対し、安全機能を有する施設の安全機能を損なわないものとする事が要求されている。ここでは、人為事象である航空機墜落火災と他の自然現象の組合せの考慮の要否について検討した結果について示す。

## 2. 検討対象とする自然現象

### (1) 検討対象とする自然現象の抽出

航空機墜落火災との組合せを検討する自然現象は、再処理施設、MOX燃料加工施設及び廃棄物管理施設（以下「再処理施設等」という。）の設計において考慮するとした以下の12事象とする。

- a. 地震
- b. 風（台風）
- c. 竜巻
- d. 降水
- e. 落雷
- f. 森林火災
- g. 高温
- h. 凍結
- i. 火山の影響
- j. 積雪
- k. 生物学的事象
- l. 塩害

### (2) 事象の特性の整理

#### a. 航空機墜落火災との相関性

ある特定の自然現象により航空機墜落火災を誘発したり、逆に航空機墜落火災によりある特定の自然現象を誘発することにより、航空機墜落火災と自然現象の再処理施設等への影響が重畳するといった相関性がないか整理を行った（第2-1表参照）。その結果、航空機墜落火災と相関性のある自然現象はなかった。

第 2-1 表 航空機墜落火災と自然現象の相関性

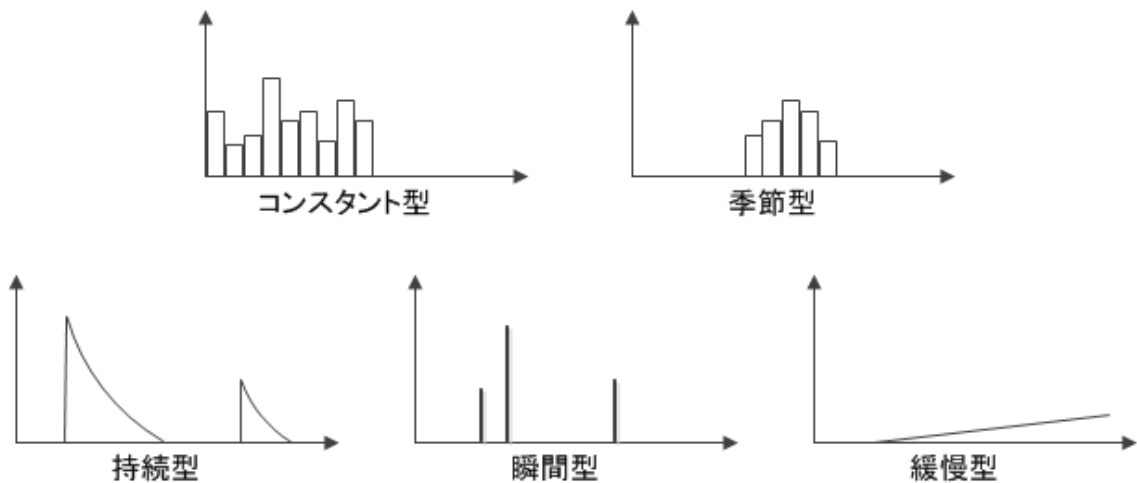
自然現象	検討結果
地震	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により地震が誘発されることは考えられない。</li> <li>地震による影響は、飛行中の航空機に影響を及ぼすことはなく、地震が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
風 (台風)	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により風(台風)が誘発されることは考えられない。</li> <li>風(台風)が飛行中の航空機に影響を及ぼすことは考えられるが、台風を事前に予測して航空機の運航計画を見直すことができることから、風(台風)が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
竜巻	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により竜巻が誘発されることは考えられない。</li> <li>竜巻が飛行中の航空機に影響を及ぼすことは考えられるが、航空機は原則として原子力関係施設上空を飛行しないよう規制されており、再処理施設等に対する竜巻の影響と航空機墜落火災の影響が同時に及ぶことはない。</li> </ul>
降水	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により降水が誘発されることは考えられない。</li> <li>降水が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
落雷	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により落雷が誘発されることは考えられない。</li> <li>落雷が飛行中の航空機に影響を及ぼすことは考えられるが、航空機は原則として原子力関係施設上空を飛行しないよう規制されており、再処理施設等に対する落雷の影響と航空機墜落火災の影響が同時に及ぶことはない。</li> </ul>
森林火災	<ul style="list-style-type: none"> <li>敷地内への航空機墜落又は航空機墜落火災により森林火災が誘発されることは考えられない。</li> <li>航空機は上空数 km を飛行するため、森林火災による熱影響、ばい煙等の影響を受けることは考えられない。</li> </ul>
高温	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により、気象条件としての高温を誘発することは考えられない。</li> <li>高温が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
凍結	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により、凍結を誘発することは考えられない。</li> <li>凍結が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
火山の 影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により火山事象が誘発されることは考えられない。</li> <li>火山事象(降灰)が飛行中の航空機に影響を及ぼすことは考えられるが、航空機は原則として原子力関係施設上空を飛行しないよう規制されており、再処理施設等に対する火山の影響と航空機墜落火災の影響が同時に及ぶことはない。</li> </ul>
積雪	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災が積雪を誘発することは考えられない。</li> <li>積雪が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
生物学的 事象	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により、生物学的事象を誘発することは考えられない。</li> <li>地上又は水中で発生している生物学的事象が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>
塩害	<ul style="list-style-type: none"> <li>航空機墜落又は航空機墜落火災により、塩害を誘発することは考えられない。</li> <li>塩害が航空機墜落を誘発することは考えられない。</li> </ul>

b. 影響モードの分類

組合せを考慮するにあたり，各事象の影響モードを第 2-2 表及び第 2-1 図に示すタイプに分類する。ただし，個別に詳細検討する際には，各事象の影響モード毎に検討する。

第 2-2 表 影響モードのタイプ分類

影響タイプ	特性	事象
コンスタント型，季節型	年間を通してプラントに影響を及ぼすような事象(ただし，常時負荷がかかっているわけではない)，若しくは特定の季節で恒常的な事象。	凍結，降水，積雪，生物学的事象(鳥類，昆虫類，魚類，底生生物及び藻類)，風(台風)，高温
持続型	恒常的ではないが，影響が長期的に持続するような事象。影響持続時間が長ければ数週間に及ぶ可能性があるもの。	火山の影響
瞬間型	瞬間的にしか起こらないような事象。影響持続時間が数秒程度(長くても数日程度)のもの。	地震，生物学的事象(げっ歯類)，竜巻，森林火災，落雷，航空機墜落火災
緩慢型	事象進展が緩慢であり，再処理施設の運転に支障を来すほどの短時間での事象進展がないと判断される事象。	塩害



第 2-1 図 影響モード分類

### 3. 航空機墜落火災との組合せの検討

#### (1) 組合せを考慮する事象の数

航空機墜落火災のような発生頻度が低く、影響の厳しい事象が他の自然現象による影響と重畳することは稀であることから、航空機墜落火災と2.(1)に示したもののうち一つの自然現象との重畳を想定する。

#### (2) 相関性の考慮

航空機墜落又は航空機墜落火災と相関性を有する自然現象がある場合、その同時発生を考慮したうえで影響が増長される可能性の有無を検討し、増長される可能性がある組合せについては重畳を考慮する必要がある。しかし、2.(2)の a. の検討の結果から、航空機墜落火災と相関性のある自然現象はないため、相関性の観点で航空機墜落火災との重畳を考慮する必要のある自然現象はない。

#### (3) 発生頻度、影響モード等の考慮

航空機墜落又は航空機墜落火災と相関性がなくても、その自然現象が再処理施設等に影響を及ぼす年超過確率、影響モード等を考慮し、航空機墜落火災との組合せを適切に考慮する必要がある。航空機墜落火災との組合せの考慮の要否は以下の観点から検討した。検討フローを第 3-1 図に示す。

##### a. 発生頻度

航空機墜落火災と同時に再処理施設等に影響を及ぼす可能性が考えられるかを評価し、同時に起こりえない又は同時に影響を及ぼす年超過確率が  $10^{-7}$  回/年\*を下回る場合は考慮不要とする。

ただし、第 2-2 表に示すコンスタント型及び季節型の事象は、航空機墜落火災と同時に発生する条件を適切に設定し、保守的な結果を与えるように同時発生を考慮することとした。

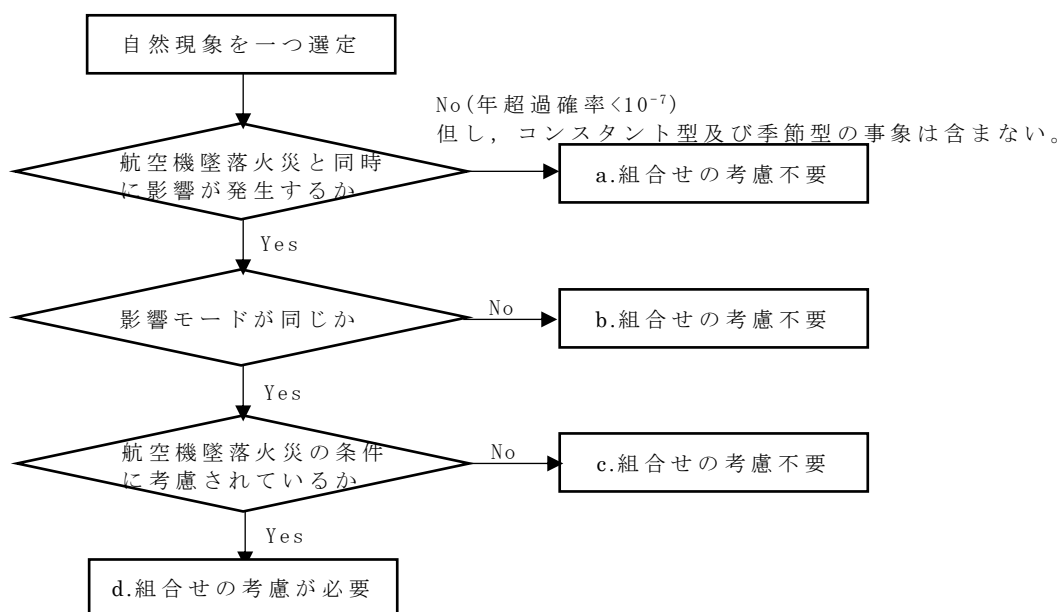
※ 実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について（平成 14・07・29 原院第 4 号，平成 14 年 7 月 30 日原子力安全・保安院制定）を参考に設定。

##### b. 影響モード

航空機墜落火災による熱影響，又は熱影響による強度低下と同一の影響モードがない場合は考慮不要とする。

##### c. 航空機墜落火災の影響評価条件としての考慮

航空機墜落火災に対する影響評価の前提条件にて考慮されている場合は考慮不要とする。



第 3-1 図 航空機墜落火災との組合せの考慮の要否検討フロー

2.(1)で抽出した 12 事象について、第 3-1 図に従って検討した結果を第 3-1 表に示す。検討の結果、航空機墜落火災との組合せを考慮する必要のある自然現象として、風(台風)、高温、積雪が選定された。このうち高温については、熱影響評価における初期温度を適切に設定することにより考慮する。

第 3-1 表 航空機墜落火災と自然現象の組合せ要否の検討結果

自然現象	検討内容	組合せ要否
地震	航空機落下確率は $4.6 \times 10^{-8}$ ※, 地震の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 回/年より, これらが再処理施設等に同時に影響を及ぼす年超過確率は $4.6 \times 10^{-14}$ ※とごく低頻度である。	否 (a.)
風(台風)	航空機落下確率は $4.6 \times 10^{-8}$ ※であるが, 長期荷重として風の影響を考慮する必要がある。	要 (d.)
竜巻	航空機落下確率は $4.6 \times 10^{-8}$ ※, 竜巻の年超過確率は $1.86 \times 10^{-8}$ ※回/年より, これらが再処理施設等に同時に影響を及ぼす年超過確率は $8.6 \times 10^{-16}$ ※とごく低頻度である。	否 (a.)
降水	航空機墜落火災と降水では影響モードが異なる(降水は航空機墜落火災による熱影響を緩和する方向に作用する)。	否 (b.)
落雷	航空機墜落火災と落雷では影響モードが異なる。 航空機墜落火災…熱影響, 強度低下 落雷…電氣的影響	否 (b.)
森林火災	森林火災は敷地外で発生する事象であり, 敷地内で発生する航空機墜落火災と同時に起こり得ない。	否 (a.)
高温	熱影響評価における初期条件として考慮する必要がある。	要 (d.)
凍結	熱影響評価における初期条件(温度)として, 高温にて考慮する。	否(高温を含む)
火山の影響	航空機落下確率は $4.6 \times 10^{-8}$ ※, 火山の年超過確率は $5.5 \times 10^{-6}$ 回/年より, これらが再処理施設等に同時に影響を及ぼす年超過確率は $2.5 \times 10^{-13}$ ※とごく低頻度である。	否 (a.)
積雪	航空機落下確率は $4.6 \times 10^{-8}$ ※であるが, 長期荷重として積雪の影響を考慮する必要がある。	要 (d.)
生物学的事象(鳥類, 昆虫類, 魚類, 底生生物及び藻類)	航空機墜落火災と生物学的事象では影響モードが異なる。 航空機墜落火災…熱影響, 強度低下 生物学的事象…電氣的影響, 閉塞	否 (b.)
塩害	航空機墜落火災と塩害では影響モードが異なる。 航空機墜落火災…熱影響, 強度低下 塩害…電氣的影響, 腐食	否 (b.)

※ 再処理施設の場合の年超過確率を示している。MOX燃料加工施設の場合にはさらに年超過確率が低くなる。

#### 4. 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発生

3.において、発生頻度の観点から考慮不要とした地震、竜巻、火山の影響については、航空機墜落火災の発生後、その影響が及ぶ期間においてこれら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1,400秒(約24分)であり、その間に屋外の外部火災防護対象施設及びその外郭となる竜巻防護対策設備の支持架構の温度上昇があったとしても、時間の経過とともに常温に戻り、元の強度に戻るもの<sup>(1)</sup>と考えられる。仮に航空機墜落火災が発生し、これら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、その可能性は十分小さい。

- ◆ (航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に地震の影響が発生する年超過確率)

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

$$= 4.6 \times 10^{-8} \times (1/365) \times 1.0 \times 10^{-4}$$

$$= \underline{1.3} \times 10^{-14}$$

- ◆ (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)

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

$$= 4.6 \times 10^{-8} \times (1/365) \times 5.5 \times 10^{-6}$$

$$= \underline{6.9} \times 10^{-16}$$

次に、航空機墜落火災が発生し、竜巻防護対策設備のうち飛来物防護ネットのネット部分の損傷及び耐火被覆の発泡によるネットへの干渉により、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では、周辺のネット数枚～十数枚程度が影響を受けるとともに、周辺の架構の耐火被覆が発泡した状態となると考えられる。その復旧に要する期間は、過去の調達実績から以下のとおり想定する(第4-1図参照)。

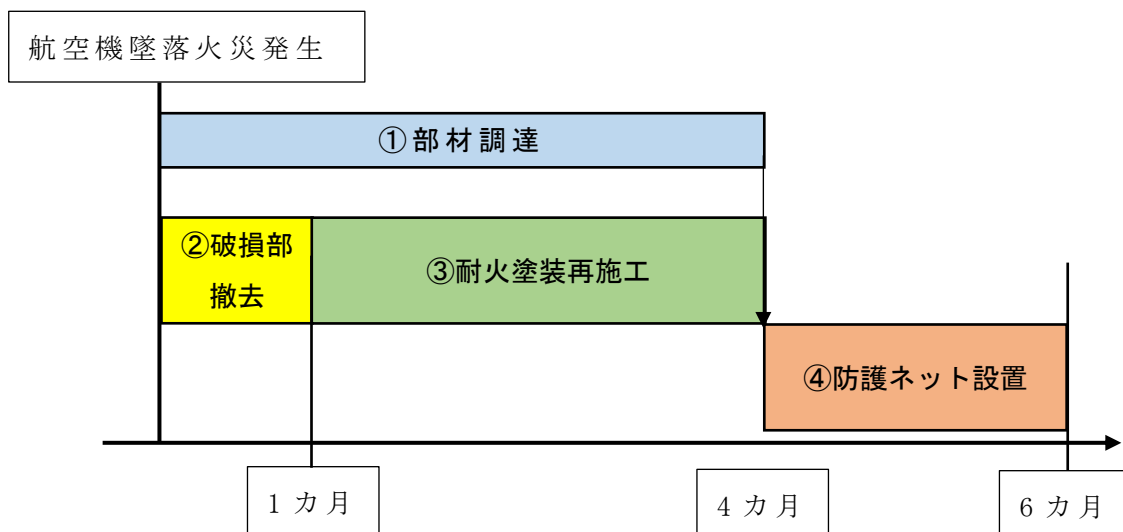
①防護ネットの部材調達：3～4カ月(②、③と並行して実施)

②損傷したネット及び耐火被覆の撤去：1カ月



③耐火被覆の再施工：3カ月

④ネットの取り付け：2カ月



第 4-1 図 飛来物防護ネットの復旧に係る想定スケジュール

上記より、飛来物防護ネットの復旧に要する期間を 6カ月程度とすると、その期間に竜巻の影響が発生する年超過確率は以下のとおり  $10^{-7}$  回/年を下回ることから、その可能性は十分小さい。

また、工事は初期設置と同様の手法を用いることから、特別な荷重は加わず、支持架構への強度上の影響は与えない。

- ◆ (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)

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

$$= 4.6 \times 10^{-8} \times (6/12) \times 1.86 \times 10^{-8}$$

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

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、竜巻又は火山の影響が発生する可能性は十分小さく、それらの重畳を考慮する必要はない。

ただし、万が一、航空機墜落火災の影響により飛来物防護ネット等の復旧が必要となった場合には、復旧までの間、使用済燃料の再処理を停止する等の措置を講ずるものとする。

## 5. まとめ

航空機墜落火災と再処理施設等の設計において考慮する自然現象の組合せについて検討した。

航空機墜落火災と自然現象の相関性、影響モード及び発生頻度の観点からの検討、並びに航空機墜落火災の影響が及ぶ期間における自然現象の影響についての検討を行った結果、航空機墜落火災との重畳を考慮する必要のある自然現象は、風(台風)及び積雪といった長期荷重をもたらす自然現象、並びに航空機墜落火災による熱影響評価の初期温度として考慮する高温が選定された。

## 6. 参考文献

- (1) 国土技術政策総合研究所資料「鋼道路橋の受熱温度推定に関する調査」、ISSN1346-7328 国総研資料第 710 号，玉越隆史 大久保雅憲 石尾真理 横井芳輝，2012 年 12 月．
- (2) 土木学会第 71 回年次学術講演会「鋼の加熱自然冷却後の常温時強度に関する研究」，高橋佑介 小林裕介 細見直史 大山理，平成 28 年 9 月．

以上

令和4年6月9日 R6

別添－3

必要離隔距離の算出

## 目 次

1.	<u>支持構造物に対する必要離隔距離の算出方針について</u> .....	1
2.	<u>必要離隔距離を算出する際の代表形状</u> .....	1
3.	<u>必要離隔距離の算出条件</u> .....	3
4.	<u>必要離隔距離の算出方法</u> .....	5
4.1	<u>輻射強度の算出</u> .....	5
4.2	<u>必要離隔距離の算出</u> .....	6
5.	<u>必要離隔距離の算出結果</u> .....	8
6.	<u>時間刻み設定の妥当性について</u> .....	10

参考 1 熱伝達率の設定について

参考 2 時間刻み設定の妥当性について

## 1. 支持構造物に対する必要離隔距離の算出方針について

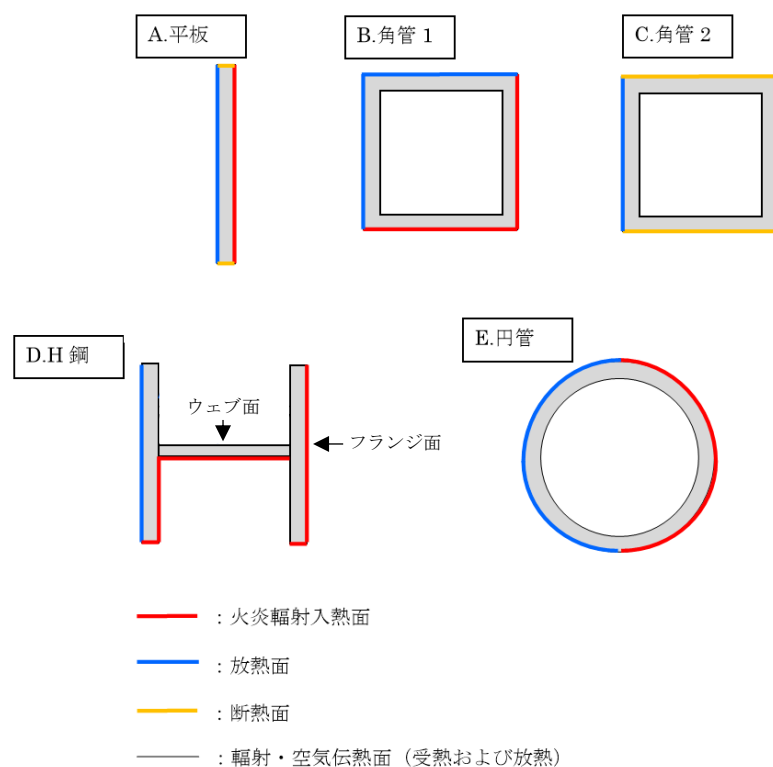
許容温度を超える支持構造物の部材に対しては、補足説明資料本体の4.防護対策において定めるとおり、耐火被覆又は遮熱板による防護対策を施すこととしているが、防護対策が必要となる範囲を特定するにあたり、航空機墜落火災による円筒火炎に対して鋼材の板厚毎に許容温度以下となる離隔距離(以下「必要離隔距離」という。)を算出する。

必要離隔距離の算出にあたっては、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、算出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必要離隔距離を算出する。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た結果、主要な形状としては、平板、角管、円管及びH鋼が確認されたことから、平板、角管、円管及びH鋼の中から代表となる形状を選定する。

平板、角管、円管及びH鋼形状に対して、一方向からの輻射を考慮した入熱面と放熱面を第2-1図に示す。



第2-1図 部材の形状毎<sup>※</sup>に想定する熱的条件

※ 角管については、角管の平面に対して垂直に輻射が入射する場合と、角管の平面に対して斜めに輻射が入射する場合を考慮した。また、H鋼については、輻射入熱面が最大となる方向からの輻射を考慮した。

部材の単位時間当たりの温度上昇は、時間当たりの熱量[J] (=入熱量-放熱量) を熱容量[J/K] で除すことにより算出されることから、与えられる熱量が小さく部材の熱容量が大きいほど部材の温度上昇は小さい。

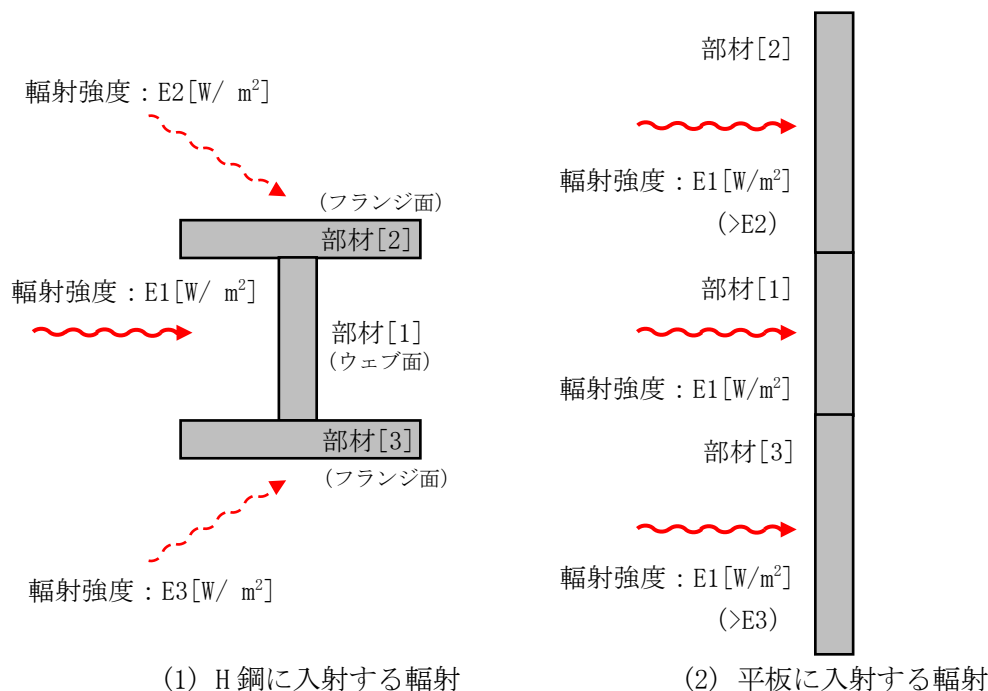
一方向からの輻射を想定した第 2-1 図に示した部材 (角管, 円管, H 鋼) について、材質と板厚を同一とした場合、角管及び円管は内包している空気を無視しても、平板に比べ熱容量が大きいので、温度上昇は小さいと考えられる。

H 鋼のウェブ面又はフランジ面に垂直に輻射が入る場合、ウェブ面又はフランジ面の形状から輻射の当たり方は平板と同様と考えることができるが、H 鋼全体で考えた場合、平板に比べ熱容量が大きいことから、温度上昇は小さいと考えられる。

一方、H 鋼のウェブ面又はフランジ面に斜めに輻射が入る場合、円筒火炎の一部からの輻射しか見込まないことから、その面の輻射強度が小さくなるものの、ウェブ面及びフランジ面の両面に輻射が当たることから、受熱面積が大きくなり放熱面積が小さくなるため、斜め輻射を受ける H 鋼への熱影響を包絡可能な形状を検討した。

H 鋼に入射する輻射は第 2-2 図の(1)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全ての輻射を合成した輻射強度  $E_1$  (ウェブ面)、円筒火炎の一部からの輻射しか見込まない、斜め方向からの輻射成分のみの輻射強度  $E_2$  及び  $E_3$  (フランジ面) となる。この場合、輻射強度  $E_2$  及び  $E_3$  と比較して、 $E_1$  が最も厳しい輻射強度となる。また、第 2-2 図の考え方から、H 鋼と平板の受熱面と放熱面の面積は同程度と考えられ、形状による影響は小さいと考えられる。よって、第 2-2 図の(2)のように、最も厳しい輻射強度  $E_1$  を平板の面全体に与えることで、温度上昇が大きくなると考えられる。

以上のことから、角管、円管及び H 鋼を第 2-2 図の(2)のように、形状を最も厳しい輻射強度  $E_1$  を受ける平板として考慮することにより包絡可能であり、保守的に熱影響を評価することができる。



第 2-2 図 熱影響を包絡可能な形状の考え方(H 鋼)

### 3. 必要離隔距離の算出条件

第 3-1 表から第 3-5 表に、必要離隔距離の算出に必要な条件を示す。

屋外の外部火災防護対象施設及び波及的影響を及ぼし得る施設である竜巻防護対策設備の支持構造物の構造強度を維持する上で必要な部材は、大きくステンレス鋼(SUS304)と炭素鋼に分類される。炭素鋼は、材質が SS400, SN490B 等の低炭素鋼に分類されるが、解析としては、密度及び比熱が小さい中炭素鋼として、保守的に必要離隔距離を算出する。

第 3-1 表 構造強度を維持する上で必要な部材の条件

項目	条件	備考
形状	平板	保守的に平板と設定
材質	炭素鋼(低炭素鋼), ステンレス鋼(SUS304)	炭素鋼は、評価上は中炭素鋼と設定
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部材 を調査した結果から設定
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 <sup>2</sup> ]	Rf	58,000	外部火災ガイドより「ガソリン・ナフサ」の値を使用
輻射強度(太陽光) [W/m <sup>2</sup> ]	Es	400	IAEA 放射性物質安全輸送規則から設定*
燃焼面積 [m <sup>2</sup> ]	Ab	90	F-16 の投影面積から設定

※ 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.

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]	Tc0	50	周囲雰囲気温度 29°C に対して保守的に設定
周囲雰囲気温度[°C]	Ta	37	外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度(八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年~2018年3月)における日最高気温の極値)である 37.0°C を設定
燃焼時間[s]	t	1,400	F-16 の燃焼継続時間

第 3-4 表 炭素鋼の物性値(伝熱工学資料 改訂第 5 版, p284 の中炭素鋼)

温度 [K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [kJ/kg/K]	熱伝導率 [W/m/K]
300	7,850	0.473	51.5
500	7,800	0.520	47.2
800	7,700	0.665	36.8

第3-5表 ステンレス鋼の物性値(伝熱工学資料 改訂第5版, p285のSUS304)

温度 [K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [kJ/kg/K]	熱伝導率 [W/m/K]
300	7,920	0.499	16.0
400	7,890	0.511	16.5
600	7,810	0.556	19.0
800	7,730	0.620	22.5
1,000	7,640	0.644	25.7

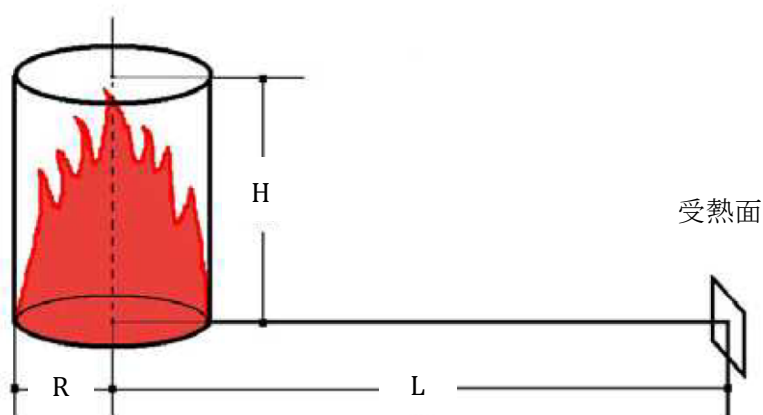
#### 4. 必要離隔距離の算出方法

##### 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、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成25年6月19日 原子力規制委員会)」(以下「外部火災ガイド」という。)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、円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は、航空機の機体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算出する。

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、外部火災ガイドと同様に下式より算出する。

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

ただし、

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



ここで、

- $\phi$  : 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、下式より算出する。

後述する 4.2 の必要離隔距離の算出においては、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。

$$E = R_f \times \phi + E_s$$

ここで、

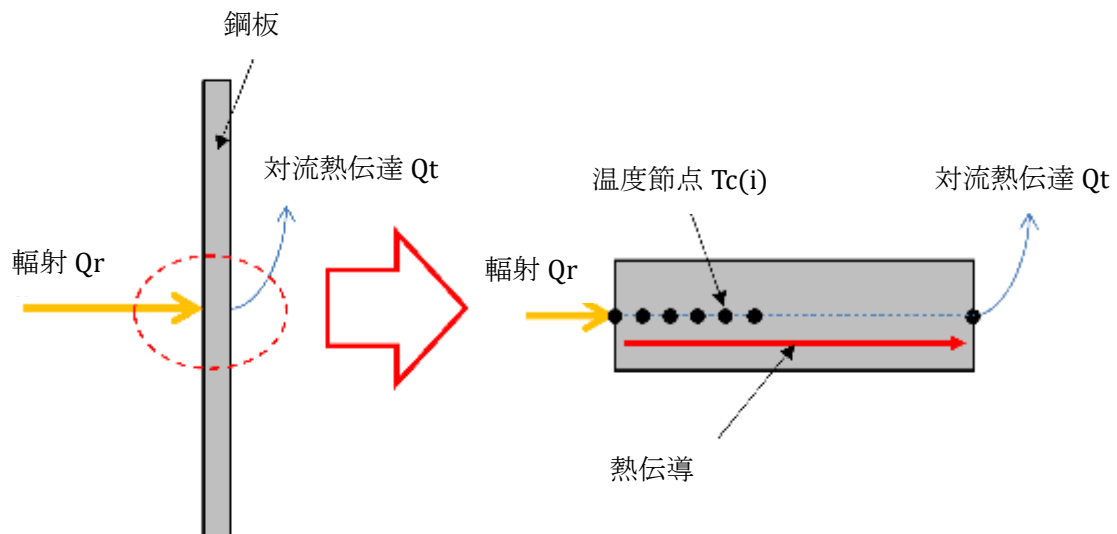
- E : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]
- R<sub>f</sub> : 輻射発散度 [W/m<sup>2</sup>]
- $\phi$  : 形態係数 [-]
- E<sub>s</sub> : 太陽輻射 [W/m<sup>2</sup>]

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。

部材の許容温度は、補足説明資料本体の第 6-1 表に示すとおり、外部火災防護対象施設において 325℃、安全上重要な施設に波及的影響を及ぼし得る施設において 450℃とする。

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、一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し、区分区間は温度一様とし、時間変化は差分式(陽解法)によるステップ計算を用いる。



第 4-2 図 計算モデル

(輻射)

$$Q_r = E \cdot A$$

ここで,

$Q_r$  : 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)

$$Q_t = H \cdot A \cdot (T_c(N) - T_a)$$

ここで,

$Q_t$  : 裏面での対流熱伝達 [W]

$A$  : 対象鋼板の面積 [ $m^2$ ] (=1 単位面積)

$H$  : 熱伝達率 [ $W/m^2/K$ ] (=12.5)

空気調和衛生工学便覧 第14版 1基礎篇 環境・エネルギー評価第17章に記載される外表面熱伝達率を参考に設定。詳細は参考に示す。

$T_c(i)$  : 平板の温度 [ $^{\circ}C$ ] 節点  $i$ , 節点数  $N$

$T_a$  : 周囲雰囲気温度 [ $^{\circ}C$ ]

(=37 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度 (八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年~2018年3月)における日最高気温の極値)である  $37.0^{\circ}C$  を設定)

(平板の温度)

$i=1$  (表面温度)

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

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

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

$i=2 \sim N-1$  (内部温度)

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

$$V = L_c \cdot A$$

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

$i=N$  (裏面温度)

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

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

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

ここで,

Qr	: 火炎からの輻射熱伝達 [W]
A	: 対象鋼板の面積 [m <sup>2</sup> ] (=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]
λc	: 鋼板の熱伝導率 [W/m/K]
ρc	: 鋼板の密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
cc	: 鋼板の比熱 [J/kg/K]
Lc	: 区分区間 [m] (=板厚/(N-1))
V	: 区分区間の体積 [m <sup>3</sup> ]
Tc(i)_new	: 時間経過後の平板の温度 [°C] (i=1~N)
dt	: 時間刻み [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、必要離隔距離の算出結果を第 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)	
		屋外に設置する 外部火災防護対象施設	波及的影響を 及ぼし得る施設
炭素鋼	36	1	2
	28	2	2
	22	4	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	13	8
	6.5	15	9
	6.4	15	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	7

## 参考1 熱伝達率の設定について

### (1) 設定する熱伝達率について

必要離隔距離等の温度評価は、屋外設備の柱・梁面等への熱影響を想定した評価である。そのため、屋外設備に適用可能な熱伝達率を調査した。空気調和衛生工学便覧によると、外表面熱伝達率はユルゲスの式から、温度差に依らない一定値として算出している。

温度評価に使用する熱伝達率は、空気調和衛生工学便覧において輻射による放熱を考慮する放射成分と風速による放熱を考慮する対流成分を組み合わせていることを踏まえ、評価対象の部材の置かれている環境を考慮し設定する。

また、耐火被覆の設計に用いる熱伝達率については、設計裕度を確保する観点から、設定する温度評価に使用する熱伝達率から、さらに保守的に設定する。

#### a. 評価に使用する熱伝達率について

空気調和衛生工学便覧における「外表面熱伝達率の設計負荷計算用数値」に基づき、垂直外壁面の外表面熱伝達率については、夏場の外気温 37℃<sup>\*</sup>を前提としていることから、夏の 17W/m<sup>2</sup>/K を設定する。

ただし、遮熱板等で囲われ、遮熱板等からの放熱の影響を受けるものは、自らの放熱と遮熱板等からの放熱がバランスするとして、放射成分は考慮せず、対流成分 12W/m<sup>2</sup>/K 設定する。

#### b. 設計に使用する熱伝達率について

適用する熱伝達率 12.5W/m<sup>2</sup>/K は、空気調和衛生工学便覧の記載値(第1図参照)から保守的に以下のように設定した。

空気調和衛生工学便覧における「外表面熱伝達率の設計負荷計算用数値」に基づき、垂直外壁面の外表面熱伝達率については、夏場の外気温 37℃<sup>\*</sup>を前提としていることから、夏の 17W/m<sup>2</sup>/K を考慮する。

ただし、評価対象の周囲の部材からの放熱の影響を受けるものは、仮に評価対象からの放熱と周囲の部材からの放熱がおおよそバランスするとして、放射成分による放熱の寄与を少なく見積もり評価することが保守的な熱伝達率の設定となる。

したがって、耐火被覆の設計にあたり設計裕度を確保する観点から、熱伝達率 17W/m<sup>2</sup>/K から、放射成分として文中に記載される 4.5W/m<sup>2</sup>/K を差し引いた 12.5W/m<sup>2</sup>/K を設定する。

※ 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度（八戸特別地域気象観測所での観測記録（1937年～2018年3月）における日最高気温の極値）である 37.0℃を設定

(3) 表面熱伝達率<sup>17)</sup>

**a 外表面熱伝達率** 外表面熱伝達率は、一般には  $\alpha_o = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  が用いられる。これは、冬期の風速  $3 \text{ m/s}$  程度に対して、対流成分  $\alpha_c = 18.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  と放射成分  $\alpha_r = 4.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  を見込んだものである。

この値は、熱流の向き、外表面付近の風速などに左右されるが、外表面付近の風速は、建物の形状や風向きの影響を受けて変化するので、一般的な値を用いざるをえない。より詳細な検討をする場合の熱伝達率として、夏期と冬期の平均風速差を加味したものを、表 17・19 に示す。

**b 内表面熱伝達率** 室内側各表面の熱伝達率は、表面付近の気流の状態、表面の放射率、熱流の方向によって変わる。一般には、ガラス面に対して  $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、それ以外の表面に対して  $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  が用いられる。

熱流方向による差を評価したい場合には、表 17・20 が参考となる。また、ガラス窓に沿って吹出し気流が流れる場合には、面に沿った気流速度  $v \leq 5 \text{ m/s}$  に適用されるユルゲスの式から、対流熱伝達率  $\alpha_c [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$  を求

表 17.19 外表面熱伝達率の設計負荷計算用数値の整合が取れないことから明確な文中の数値を用いる。

表 17・19 外表面熱伝達率の設計負荷計算用数値<sup>17)</sup>

		[W/(m <sup>2</sup> ·K)]		
	期別	放射 $\alpha_r$	対流 $\alpha_c$	総合 $\alpha_o$
垂直外壁面	冬	5	19	23
	夏	6	12	17
屋根面	冬	12	23	35
	夏	6	17	23
上げ裏面	冬	5	13	17
	夏	6	12	17

表 17・20 静止空気に対する表面の熱伝達率  $\alpha_o$ <sup>17)</sup>

[W/(m <sup>2</sup> ·K)]		
表面の位置	熱流の方向	熱伝達率
水平	上 向	9.26
傾斜 45°	上 向	9.08
垂直	水 平	8.29
傾斜 45°	下 向	7.49
水平	下 向	6.13

注：表面の放射率 = 0.90

ユルゲスの式

める。

$$\alpha_c = 5.6 + 4.0v \text{ (平滑面)}$$

……(17・11)

これに、放射熱伝達率  $\alpha_r = 4.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  を加えて、熱伝達率とする。

垂直外壁面の総合の熱伝達率は冬の数値  $23 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  に比べて保守的な夏の数値  $17 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  を用いる。

第 1 図 空気調和衛生工学便覧<sup>※</sup>の抜粋

※ 空気調和衛生工学便覧 第 14 版 1 基礎篇 環境・エネルギー評価第 17 章 402 頁

(2) 設定する熱伝達率の妥当性について

評価に使用する熱伝達率及び設計に使用する熱伝達率の設定の妥当性について、相当する風速と六ヶ所の年間風速を比較することで確認する。

また、設計に使用する熱伝達率の妥当性については、耐火被覆を施工しない鋼材の温度変化を伴う計算に用いることから、温度差を考慮した場合の熱伝達率を評価し、温度差に依らない一定値が保守的な設定となることを確認する。

a. 評価に使用する熱伝達率について

評価に使用する熱伝達率  $12\text{W/m}^2/\text{K}$  (対流成分) 又は  $17\text{W/m}^2/\text{K}$  に相当する風速をユルゲスの式から逆算すると、風速は約  $1.6\text{m/s}$  となる。六ヶ所の年間平均風速は約  $4.3\text{m/s}$  であることから、 $12\text{W/m}^2/\text{K}$  又は  $17\text{W/m}^2/\text{K}$  は安全側であり、妥当な設定であることを確認した。

b. 設計に使用する熱伝達率について

使用する熱伝達率  $12.5\text{W/m}^2/\text{K}$  に相当する風速をユルゲスの式から逆算すると、風速は約  $1.73\text{m/s}$  となる。六ヶ所の年間平均風速は約  $4.3\text{m/s}$  であることから、 $12.5\text{W/m}^2/\text{K}$  は安全側であり、妥当な設定であることを確認した。

さらに、温度差を考慮した場合の熱伝達率を評価するため、第1表のとおり条件を設定し、外気温  $37.0^\circ\text{C}$ \*、風速  $1.73\text{m/s}$  における等温加熱平板モデルを用いた場合の、層流境界層の熱伝達(平均ヌセルト数)として次式のとおり評価した。

なお、設定する平板の温度は、耐火被覆を施工しない SUS304 の  $9\text{mm}$  平板が、航空機墜落火災により  $1,400\text{s}$  間に渡って輻射を受け続けた場合の温度上昇を踏まえて設定した。

※ 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温 (八戸特別地域気象観測所での観測記録 (1937年~2018年3月)における日最高気温の極値)である  $37.0^\circ\text{C}$  を設定

$$\text{Nu}_m = 2C(\text{Pr}) \cdot \text{Re}_x^{1/2} \dots (\text{式 1})$$

$\text{Nu}_m$  は平均ヌセルト数で、次式に示す。

$$\text{Nu}_m = \alpha_m \cdot l / \lambda \dots (\text{式 2})$$

$\alpha_m$  : 平均熱伝達率 [ $\text{W/m}^2/\text{K}$ ]

$l$  : 平板長さ [ $\text{m}$ ] (=0.1)

$\lambda$  : 熱伝導率 [ $\text{W/m/K}$ ]

$C(\text{Pr})$  はプラントル数の関数で、 $\text{Pr} > 0.5$  の場合以下の近似式で示す。

$$C(\text{Pr}) = 0.332\text{Pr}^{1/3} \dots (\text{式 3})$$

$\text{Pr}$  : プラントル数

$\text{Re}_x$  は局所レイノルズ数で、次式に示す。

$$Re_x = U_\infty \cdot x / \nu \quad \dots (式 4)$$

$U_\infty$  : 主流速度 [m/s] (=1.73)

$x$  : 平板先端からの距離 [m] (=0.1)

$\nu$  : 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]

熱伝導率  $\lambda$ 、プラントル数  $Pr$  及び動粘性係数  $\nu$  は伝熱工学資料(改訂 第 4 版)の空気の物性値(次表参照)を基に線形補間し、任意の温度に対応した値を算出する。

第 2 表に示すとおり、熱伝達率はいずれの温度でも 12.5W/m<sup>2</sup>/K を上回り、温度差を考慮する場合も熱伝達率 12.5W/m<sup>2</sup>/K が安全側であり、妥当な設定であることを確認した。

第 1 表 空気の物性値

温度 T [°C]	熱伝導率 $\lambda$ [mW/m/K]	動粘性係数 $\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	プラントル数 <sup>*</sup> Pr [-]
6.85	24.61	14	0.72
26.85	26.14	15.83	0.717
46.85	27.59	17.86	0.719
66.85	29	19.88	0.718
86.85	30.39	21.98	0.717
106.85	31.73	24.15	0.715
126.85	33.05	26.39	0.715
146.85	34.37	28.7	0.713
166.85	35.68	31.06	0.712
186.85	36.97	33.51	0.711
206.85	38.25	36.01	0.71
226.85	39.51	38.58	0.71
276.85	42.6	45.27	0.709
326.85	45.6	52.36	0.71
376.85	48.4	59.9	0.714
426.85	51.3	67.7	0.715
526.85	56.9	84.5	0.719
626.85	62.5	102.7	0.722
726.85	67.2	122.1	0.732
826.85	71.7	143	0.742
926.85	75.9	165.1	0.751
1226.85	87	238.7	0.782

※ プラントル数  $Pr$  は、276.85°C を境に 6.85~276.85°C の線形補間、276.85~526.85°C の線形補間に分ける。

式 1、式 3 は伝熱工学資料 改訂第 4 版を参照 46 頁参照

式 2、式 4 は伝熱工学資料 改訂第 4 版を参照 44 頁参照



第 2 表. 熱伝達率算出結果

平板温度 [°C]	風速 1.73[m/s]時の 熱伝達率[W/m <sup>2</sup> /K]
50	16.1
325	15.7
450	15.6
960	15.3

参考2 時間刻み設定の妥当性について

陽解法による解析においては、時間進行の計算を1ステップ進めるための時間間隔である時間刻みを設定しており、この時間刻みを大きく設定してしまうと計算結果が収束せず、正しい結果を得ることができない。

本温度評価で設定している時間刻み0.01sの妥当性を確認するために、時間刻みをより小さい0.001sへ変更し解析を実施した。その結果を第6-1表に示す。全時間刻みにおいて有意な差は見られないことから、時間刻みの設定に問題はない。

なお、耐火被覆の必要厚さの評価(耐火被覆あり)(別添-4)においても、本評価と同様に時間刻みの影響を確認し設定に問題ないことを確認している。

第6-1表 必要離隔距離の算出結果の時間刻み変更による影響

材質	板厚 [mm]	屋外に設置する 外部火災防護対象施設		差分	波及的影響を及ぼし得る施設		差分
		必要離隔距離 (時間刻み0.01s) [m]	必要離隔距離 (時間刻み0.001s) [m]		必要離隔距離 (時間刻み0.01s) [m]	必要離隔距離 (時間刻み0.001s) [m]	
炭素鋼	36	1	1	0	—	—	—
	28	2	2	0	—	—	—
	22	4	4	0	1	1	0
	19	5	5	0	1	1	0
	15	7	7	0	3	3	0
	14	7	7	0	3	3	0
	13	8	8	0	4	4	0
	12	9	9	0	4	4	0
	11	9	9	0	5	5	0
	10	—	—	—	6	6	0
	9	11	11	0	7	7	0
	8	13	13	0	8	8	0
	6.5	15	15	0	9	9	0
	6.4	15	15	0	9	9	0
	6	15	15	0	10	10	0
	4.5	18	18	0	12	12	0
	3.91	19	19	0	13	13	0
	3.9	19	19	0	13	13	0
3.2	21	21	0	15	15	0	
2.3	23	23	0	17	17	0	
2.11	23	23	0	17	17	0	
1.2	25	25	0	19	19	0	
ステン レス鋼	20	4	4	0	1	1	0
	16	6	6	0	2	2	0
	12	8	8	0	4	4	0
	9	11	11	0	7	7	0

令和 4 年 6 月 9 日 R6

別添－4  
耐火塗料の説明書

## 目 次

<u>1.</u> 耐火塗料とは	1
<u>2.</u> 耐火塗料の組成	1
<u>3.</u> 耐火被覆の発泡挙動	2

## 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り、火災時には数 mm 厚の耐火被覆材が発泡して数十倍に膨らみ、熱伝導性の低い断熱層を形成し、鉄骨の温度上昇を緩和する。

耐火塗料は、これ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一百七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。

国土交通大臣の認定を受けるために必要な耐火性能試験では、別添－5「耐火被覆厚さの設定の考え方」の「2. 大臣認定試験」に示したとおり、規定の垂直荷重を載荷した試験体（耐火塗料を塗布した鋼材）に対し IS0834 に示す標準加熱曲線による熱を加え、試験時間内において試験体の最大軸方向収縮量、最大軸方向収縮速度が基準を満たすことを確認する。

耐火塗料は、建設業界にて 1 万件以上の使用実績がある。使用実績の例を第 1-1 表に示す。

第 1-1 表 耐火塗料の使用実績例

施工場所	地域	施工時期
医療法人相生会 宮田病院	福岡県	2019 年 4 月
北海道立文書館	北海道	2019 年 7 月
ハレルヤ保育園	沖縄県	2002 年 5 月
青森市スポーツ会館	青森県	2002 年 8 月
浜松市浜北斎場	静岡県	2021 年 1 月

## 2. 耐火塗料の組成

航空機墜落火災に対する防護対策として用いる耐火塗料は、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。耐火塗料は、下塗り、主材、中塗り及び上塗りの 4 つの役割の塗料を用い、4 層の塗装を合わせて「耐火塗装」という。下塗り、主材、中塗り、上塗りの 4 種の塗料をそれぞれ順に塗装する。それぞれの塗料の役割は次のとおりである。

下塗り：塗装する鋼材の防錆や主材の付着性向上※

主材：耐火性能を発揮する

中塗り：主材保護及び上塗りの下地

上塗り：主材保護及び意匠性

第 2-1 表に示すとおり、2 種類の耐火塗料はほぼ同様の組成から構成されていることを確認している。

また、2 種類の耐火塗料は、断熱性能及び発泡挙動に大きな差異がないことを、国土交通大臣の認定を受けるために必要な耐火性能試験を参照し、別添－5 において確認している。

なお、航空機墜落火災の影響を考慮する施設へ施工する耐火塗料は、限

られた工期に大量に必要であることから、複数の塗料メーカーの製品を用いることとしている。また、高い位置に耐火被覆の施工場所を有する航空機墜落火災の影響を考慮する施設においては、高所作業に適した機材で施工する必要があり、この機材に対応する耐火塗料を用いる必要がある。

よって、選定する耐火塗料は、メーカーの供給能力及び高所での施工性を考慮し、耐火塗装 A 及び耐火塗装 B の異なる 2 種類としている。

※ 既設の冷却塔等に対しては、既存塗料の上から耐火塗料を施工する。発泡過程において耐火被覆が剥離しないことを、耐火試験において確認している。

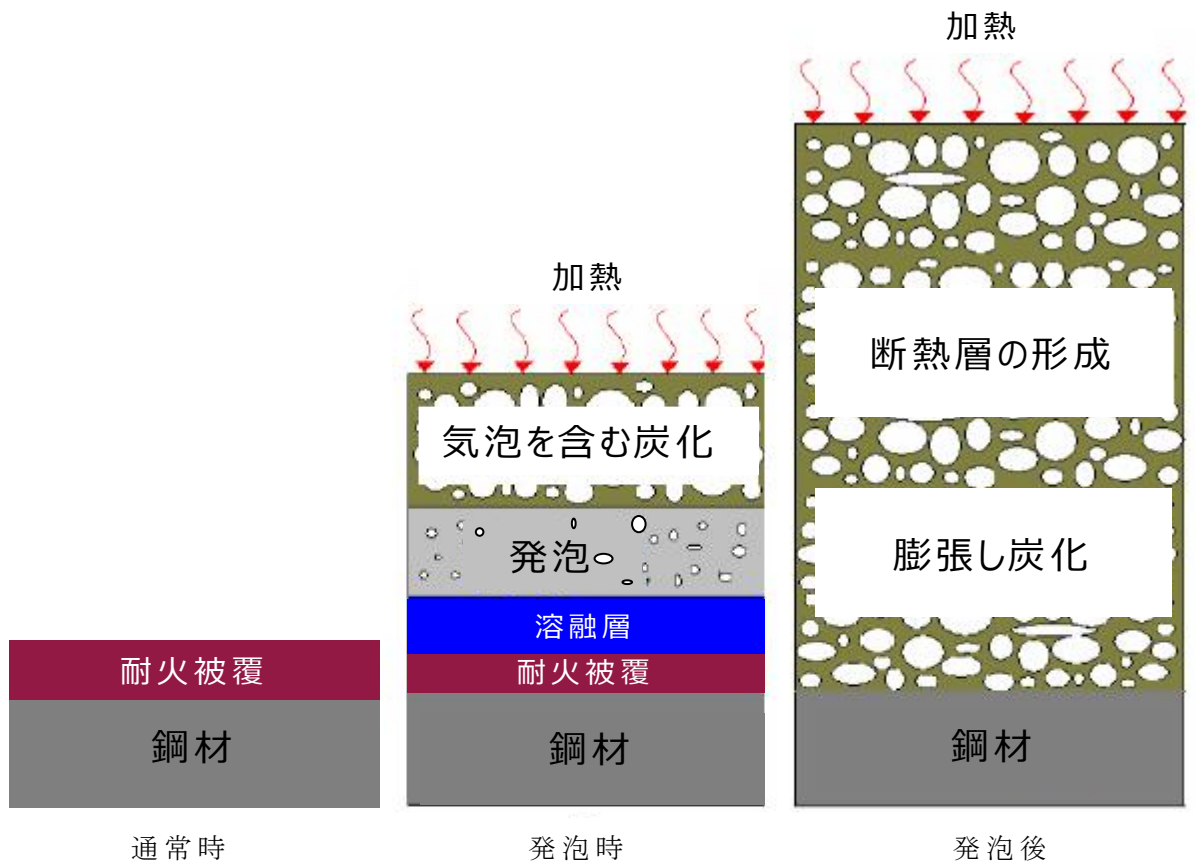
第 2-1 表 耐火塗装の組成

耐火塗料		耐火塗装 A	耐火塗装 B
下塗り	樹脂	エポキシ系	変性エポキシ系
	顔料	酸化チタン	カーボンブラック，タルク等
	添加剤	有機高分子	有機高分子
	色	グレー	
(耐火主被材覆)	発泡剤	ポリりん酸アンモニウム	ポリりん酸アンモニウム
	樹脂	ウレタン系	ポリエーテル系
	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
	色	白	
中塗り	樹脂	ウレタン系	変性エポキシ
	顔料	酸化チタン	二酸化チタン，タルク等
	添加剤	有機高分子	有機高分子
	色	上塗りの隠蔽性確保のため，上塗りと同色又はやや淡い色	
上塗り	樹脂	フッ素系	フッ素系
	顔料	酸化チタン	二酸化チタン等
	添加剤	有機高分子	有機高分子
	色	意匠設計に合わせ調色(冷却塔では薄い青緑)	

### 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(ポリりん酸アンモニウム)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の断熱層を形成する。

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4年6月9日 R9

## 別添－5

### 耐火被覆厚さの設定



## 目 次

<u>1.</u>	はじめに	1
<u>2.</u>	耐火被覆厚さの設計方針	1
<u>3.</u>	大臣認定試験	4
<u>4.</u>	断熱材の相当厚さの算出	8
<u>5.</u>	耐火被覆厚さの設定と温度評価	12
<u>6.</u>	耐火試験(参考)	15
<u>7.</u>	温度評価及び耐火試験の考察	26

参考1 鋼材の温度評価(断熱材の相当厚さの算出)の方法

参考2 耐火被覆を施工した鋼材の温度評価の方法

参考3 耐火被覆の必要厚さの解析の計算パラメータ設定の妥当性について

参考4 耐火被覆の必要厚さの解析への時間刻みの影響について

参考5 耐火試験後の裏面の確認

参考6 MHI 耐火試験時の耐火塗装済 SUS 鋼材トレース解析モデルについて.

## 1. はじめに

航空機墜落火災への防護対策として、必要離隔距離を確保できない部材には、輻射による温度上昇の影響を緩和する1時間耐火の大臣認定を取得している耐火塗料を用い、施設の重要度に応じて一律の耐火被覆厚さを設定することとしている。

本資料は、耐火被覆厚さの設計方針、設定の考え方、設定の流れ及び参考を実施した耐火試験について説明するものである。

耐火被覆厚さの設定に当たっては、1時間耐火の大臣認定試験の方法、条件及び結果を確認し、この試験結果を再現する耐火被覆の断熱性能を取得した上で、この断熱性能を適用するとともに、評価条件を保守的に設定し温度を算出し、耐火被覆厚さの設定の妥当性を評価する。

なお、設定した耐火被覆厚さによる断熱効果を、航空機墜落火災の加熱条件において確認するために、参考として耐火試験を実施し温度を測定するとともに、測定し得られた温度結果及び温度評価の結果を比較した上で、物理現象を整理し考察を行うことで、温度評価の有する保守性を確認する。

## 2. 耐火被覆厚さの設計方針

### (1) 耐火被覆について

航空機墜落火災に対する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耐火被覆厚さを設定する。

採用する耐火被覆は大臣認定(構造方法等の認定)を取得しており、構造方法では要求時間毎に必要な厚さが定められている。航空機墜落火災及び大臣認定試験は、火災の想定や判定基準が異なるものの、以下の理由から、1時間耐火の大臣認定を取得している耐火塗料を、航空機墜落火災への防護対策として用いることは妥当である。

・建築基準法では、柱、梁に対して建物内の人間の避難が完了するまでの間、建物が倒壊しないよう、その階数により1時間又は2時間の耐火性能を要求している。耐火被覆の施工対象である冷却塔、飛来物防護ネット、主排気筒、屋外ダクト等においても、支持架構を構成する柱、梁が耐火性能を要求される主な対象であり、火災により構築物を倒壊させないという目的は同じである。

・航空機墜落火災と大臣認定試験の条件における入熱量の比較から、後述する航空機墜落火災を模擬した温度評価の燃焼継続時間における入熱量と大臣認定試験における1時間耐火の入熱量は同程度である。詳細は別添－6参照。

### (2) 耐火被覆厚さの設定について

大臣認定では材料の形状や厚さ毎に耐火被覆厚さを定めて認定を取得しているが、航空機墜落火災への防護対策としては以下の理由から、施設の重要度に応じて一律の耐火被覆厚さを設定する。

- ・航空機墜落火災では構築物の直近での発生に限定しているが、火炎の直近の鋼材を許容温度以下とする耐火被覆厚さを、距離が離れた鋼材にも一律に設定することは保守的な設定であるため。
- ・耐火被覆は現場施工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。
- ・耐火被覆厚さを、部材の材質、形状又は厚さ毎に異なる複雑な設定とせず一律とすることで、耐火被覆厚さの施工間違いを防止するため。  
耐火被覆厚さの設定においては、鋼材の代表形状と評価条件を保守的に設定する。

耐火被覆厚さの設定フローを第 2-1 図に示す。

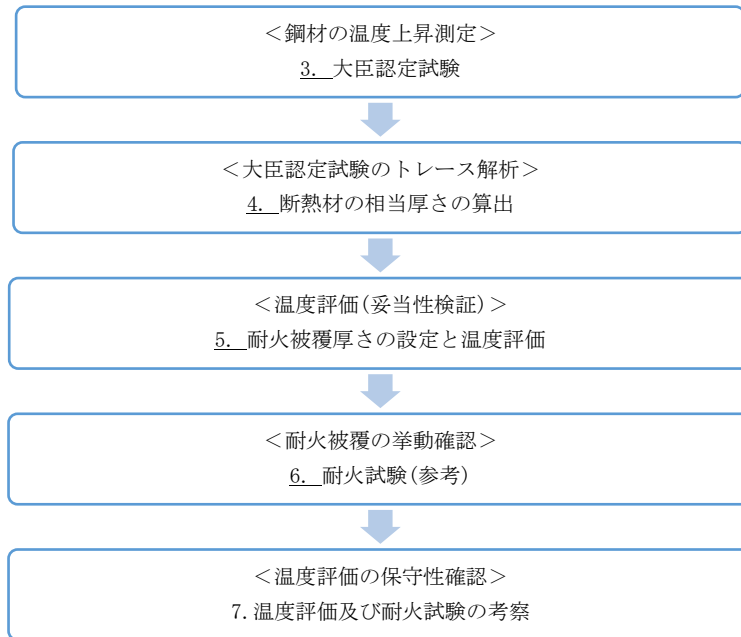
耐火被覆は数百℃の高温下において、化学変化により膨張し断熱層を形成することによりその性能を発揮する。鋼材の温度評価においては、耐火被覆の温度に応じた断熱性能を考慮するため、耐火被覆の温度依存の熱物性値を設定する必要があるが、耐火被覆の温度依存の熱物性値は明確に定まっていない。

そこで、耐火被覆の断熱性能に相当する厚さを持つ断熱材を考慮することにより、耐火被覆の温度依存の熱物性値を取得する。

耐火被覆の温度依存の熱物性値の取得に当たっては、耐火被覆の断熱性能を確認している大臣認定試験の内容を参照した上で(3. 大臣認定試験)、高温下における熱物性値が既知の断熱材を考慮するとともに、耐火被覆の断熱性能が発揮された大臣認定試験の結果を再現する断熱材の厚さ(以下「断熱材の相当厚さ」という。)を繰り返し計算によって算出する(4. 断熱材の相当厚さの算出)。

断熱材の熱物性値及び断熱材の相当厚さを用いるとともに、鋼材の代表形状と評価条件を保守的に考慮して、航空機墜落火災時において必要な耐火被覆厚さを設定する(5. 耐火被覆厚さの設定と温度評価)。

なお、設定した耐火被覆厚さによる断熱効果を、航空機墜落火災の加熱条件において確認するために、参考として耐火試験を実施し温度を測定する(6. 耐火試験(参考))。測定し得られた温度結果及び温度評価の結果を比較するとともに、物理現象を整理し考察を行うことで、温度評価の有する保守性を確認する(7. 温度評価及び耐火試験の考察)。



第 1-1 図 耐火被覆厚さの設定フロー

### 3. 大臣認定試験

次項 4. において耐火被覆厚さを設定するためには，耐火被覆の断熱性能に関する熱物性値を取得する必要がある。

耐火被覆の熱物性値を取得するためには，与えられた熱量及び鋼材の温度変化のデータがあること，また，鋼材の加熱条件が明確であり，鋼材の温度変化が解析にて算出可能であることが必要である。耐火塗料の製造メーカーが国土交通大臣認定のために実施した大臣認定試験は，これらの条件を満足することから，大臣認定試験の結果を用いて耐火被覆の断熱性能を評価する。

耐火被覆として使用する耐火塗料は，異なる 2 種類(エスケー化研の SK タイカコート HS(以下「耐火被覆 A」という。))及び関西ペイントの耐火テクト(以下「耐火被覆 B」という。))を選定している。選定した 2 種類の耐火塗料の詳細を，別添 4 に示す。

選定した 2 種類の耐火被覆の断熱性能が同等であることは，後述する大臣認定試験の結果を参照し確認している。

#### (1) 大臣認定試験の概要

大臣認定試験は，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。

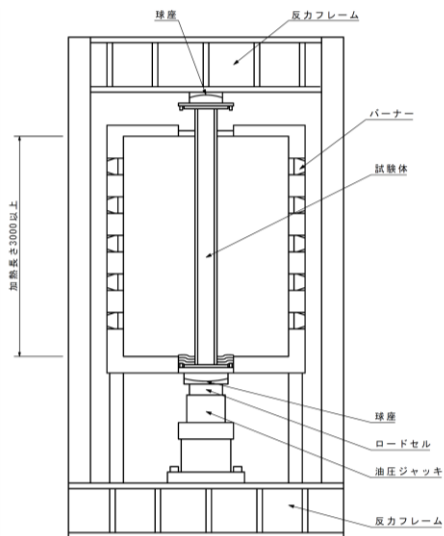
#### (2) 大臣認定試験の方法及び条件

第 3-1 図に大臣認定試験の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。これは大臣認定試験の合格の判断基準が载荷状態での加熱による直接的な強度変化の測定であるためである。

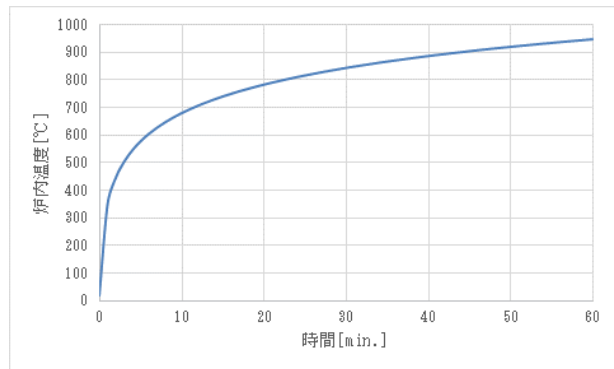
第 3-2 図に試験装置雰囲気の加熱曲線を示す。試験装置雰囲気温度は，IS0834 にて示される標準加熱曲線に従って上昇させ，炉内熱電対によりほぼ一様の温度となるよう管理する。

第 3-3 図に試験体(角管)への加熱方法を示す。試験装置雰囲気温度から試験体への輻射熱伝達により，要求耐火時間である 1 時間にわたって試験体へ入熱させ，試験体の温度変化を測定する。

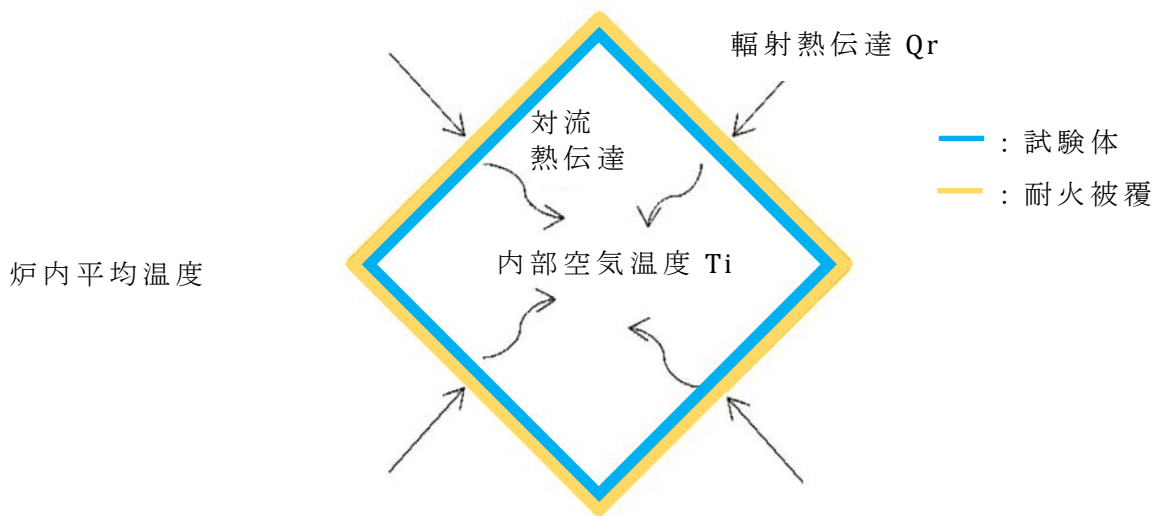
第 3-1 表に耐火被覆の種類毎に試験体寸法，耐火被覆厚さ，加熱面，加熱時間，試験荷重，判定基準，試験時間及び試験体数の条件を示す。



第 3-1 図 試験装置  
(断面図, 単位: mm)



第 3-2 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 3-3 図 試験体への加熱の概要(角管の断面図)

第 3-1 表 大臣認定試験の条件

	耐火被覆 A/耐火被覆 B	備考
試験体 (寸法)	一般構造用角鋼管 (JIS G 3466 (STKR490)) (幅: 300mm, 奥行: 300mm, 初期高さ: 3500mm, 厚さ: 9mm)	荷重支持部材(柱) (耐火性能試験成績書)
耐火被覆 厚さ	2mm	被覆材の乾燥被覆厚さ(発 泡前の厚さ) (耐火性能試験成績書)
加熱面	角鋼管の 4 面(試験面)	耐火性能試験成績書
加熱時間	60 分	要求耐火時間 (耐火性能試験書)
試験荷重	2073.0kN	長期許容応力度から、部材 の有効断面積を考慮して設 定 (耐火性能試験成績書)
判定基準	最大軸方向収縮量(mm): 35 以下 最大軸方向収縮速度(mm/分): 10.5 以下	試験体の初期高さを考慮し て設定 (耐火性能試験書)
試験時間	240 分 (= 要求耐火時間 60 分 × 4)	耐火性能試験書の要求耐火 時間の 3 倍に対して、保守 的に 4 倍の 180 分を加熱し ない条件としている。
試験体数	4 体(耐火被覆 A: 2 体, 耐火被覆 B: 2 体)	耐火被覆毎に 2 体試験す る。

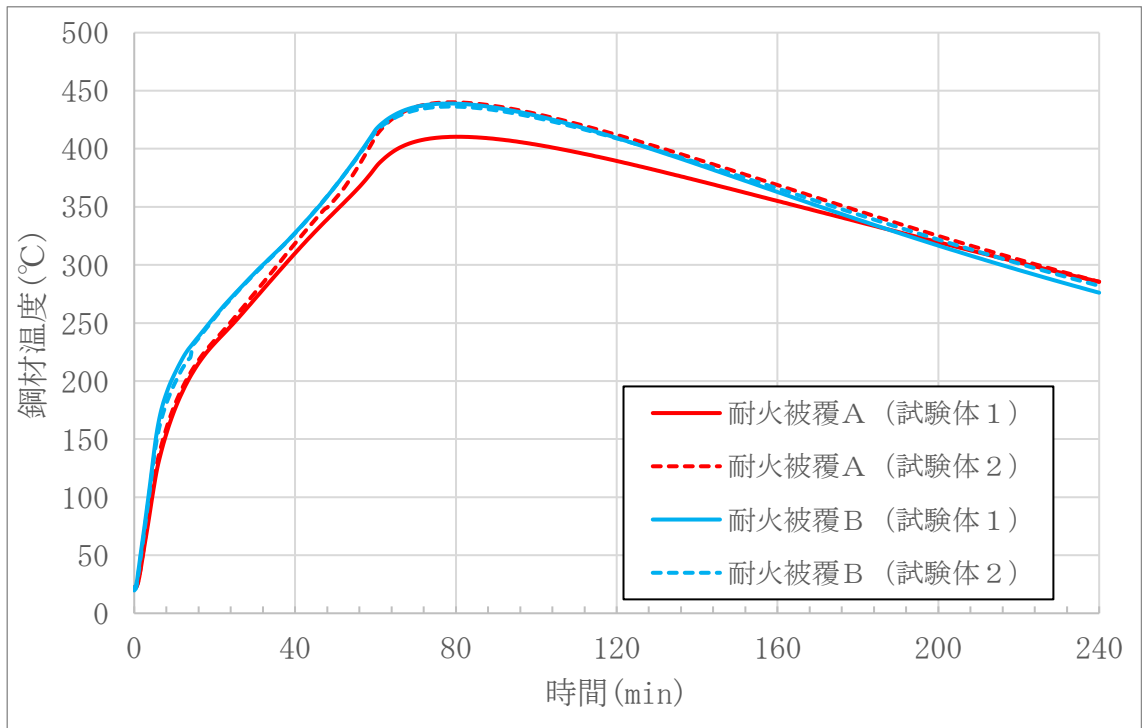
(3) 大臣認定試験の結果

大臣認定試験から得られた鋼材の温度測定結果を第 3-4 図に、試験体の試験前後の様子を第 3-5 図に示す。

2 種類の耐火被覆の温度結果は、同様の温度上昇の推移を示していることから、同等の耐火性能を有していることを確認した。

また、本項において大臣認定試験を参照する目的は、耐火被覆の断熱性能の取得にあるため、载荷による変形結果ではなく、同時に測定している鋼材の温度変化の結果を、「4. 断熱材の相当厚さの算出」の評価に用いる。

なお、参照した大臣認定試験の結果では試験体の収縮は確認されず、判定基準を満足したことから、その試験体は大臣認定(構造方法等の認定)を取得している。



第 3-4 図 試験体の鋼材温度の時刻歴



(試験前)



(試験後)

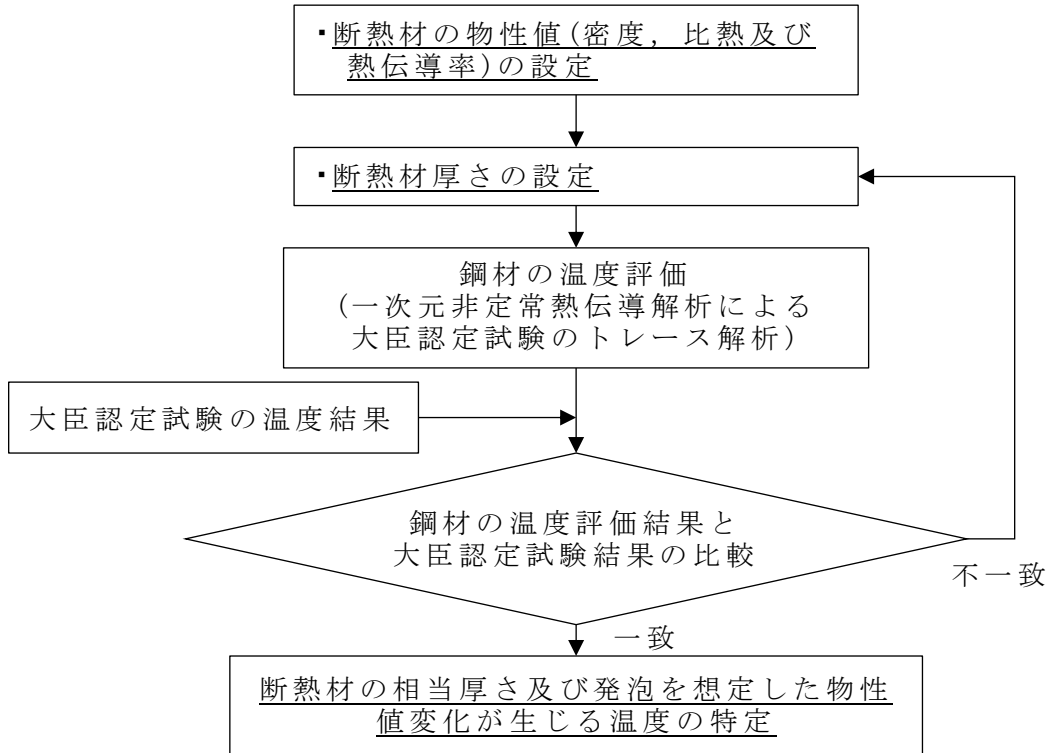
第 3-5 図 大臣認定試験の試験体の試験前後の様子



#### 4. 断熱材の相当厚さの算出

##### (1) 評価方針

上記 3. より得られた大臣認定試験の温度測定結果を、高温特性が既知の断熱材(断熱ボード)の熱物性値を用いた一次元非定常熱伝導解析によりトレースすることで、断熱材の相当厚さを算出することにより、耐火被覆の温度依存の熱物性値を取得する。算出の流れを第 4-1 図に示す。



第 4-1 図 断熱材の相当厚さの算出の流れ

##### (2) 評価条件

断熱材相当厚さの算出のための温度評価においては、大臣認定試験の加熱条件に合わせ、試験装置雰囲気温度と試験体表面温度との差分に応じた試験体への輻射熱伝達を考慮するとともに、断熱材表面からの入熱、断熱材及び鋼材の内部における熱伝導及び角鋼管内部表面から角鋼管内部空気への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 4-1 表に評価対象の仕様及び加熱条件、第 4-2 表に本温度評価に用いた断熱材の熱物性値及び第 4-3 表に炭素鋼の熱物性値を示す。

なお、断熱材相当厚さの算出のための温度評価において、鋼材の物性値として機械構造用炭素鋼を用いているが、中炭素鋼の熱物性値を使用しても温度について有意な差がみられないことは確認している。

第 4-1 表 評価対象の仕様及び加熱条件

鋼材の材質	炭素鋼
鋼材の形状	角鋼管
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
耐火被覆の種類	耐火被覆 A/耐火被覆 B
炉内温度	IS0834 にて示される標準加熱曲線による温度

第 4-2 表 断熱材<sup>※1</sup>の熱物性値

温度 T	密度 $\rho_d$	比熱 $c_d$	熱伝導率 $\lambda_d$
[°C]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kJ/kg/K]	[W/m/K]
100	0.25	0.858	— <sup>※2</sup>
200	0.25	0.959	— <sup>※2</sup>
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

※1 ニチアス ファインフレックス BIO ボード 5625-A

※2 400°C未満は 0.10W/m/Kを設定

第 4-3 表 炭素鋼の熱物性値(伝熱工学資料の機械構造用炭素鋼より)

温度 T	密度 $\rho_f$	比熱 $c_f$	熱伝導率 $\lambda_f$
[K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg/K]	[W/m/K]
300	7850	0.465	43.0
500	7790	0.528	38.6
800	7700	0.622	27.7

(3) 評価方法

鋼材の温度評価は、炉内の温度上昇、炉内から断熱材への放射熱伝達、断熱材の温度変化、鋼材の温度変化、鋼材から空気への対流熱伝達及び内部空気の温度変化を考慮して、非定常一次元熱伝導解析により実施する。詳細は本資料の参考 1 に示す。

(4) トレース解析結果から設定する断熱材厚さのモデル

耐火被覆の評価に当たっては、発泡を開始し断熱効果を発揮する温度に達した断熱材から、その厚さが切り替わるモデル(以下「断熱材厚さのモデル」という。)を考慮する。

大臣認定試験のトレース解析の結果から、断熱材の温度が 280℃に到達した時点において断熱材の厚さを切り替え、完全発泡後の耐火被覆の断熱性能は 25mm の断熱材に、発泡前の耐火被覆(2mm)の断熱性能は厚さ 1.25mm の断熱材に相当するとした場合、鋼材の温度変化と大臣認定試験の温度変化が概ね等しくなることから、断熱材の温度が 280℃に到達した時点で上記断熱材厚さに切り替えることとし、断熱材厚さのモデルを設定する。

よって、断熱材厚さについては、耐火被覆厚さ 1mm の断熱性能が、発泡後では断熱材 12.5mm に相当し、発泡前では断熱材 0.625mm に相当する設定とする。

また、断熱材の熱物性値の切り替えは、断熱材の温度及び熱物性値を設定する計算節点毎に行うこととし、計算モデルとしては厚さを変化させるのではなく、熱物性値を変化させることで相当する設定とする。

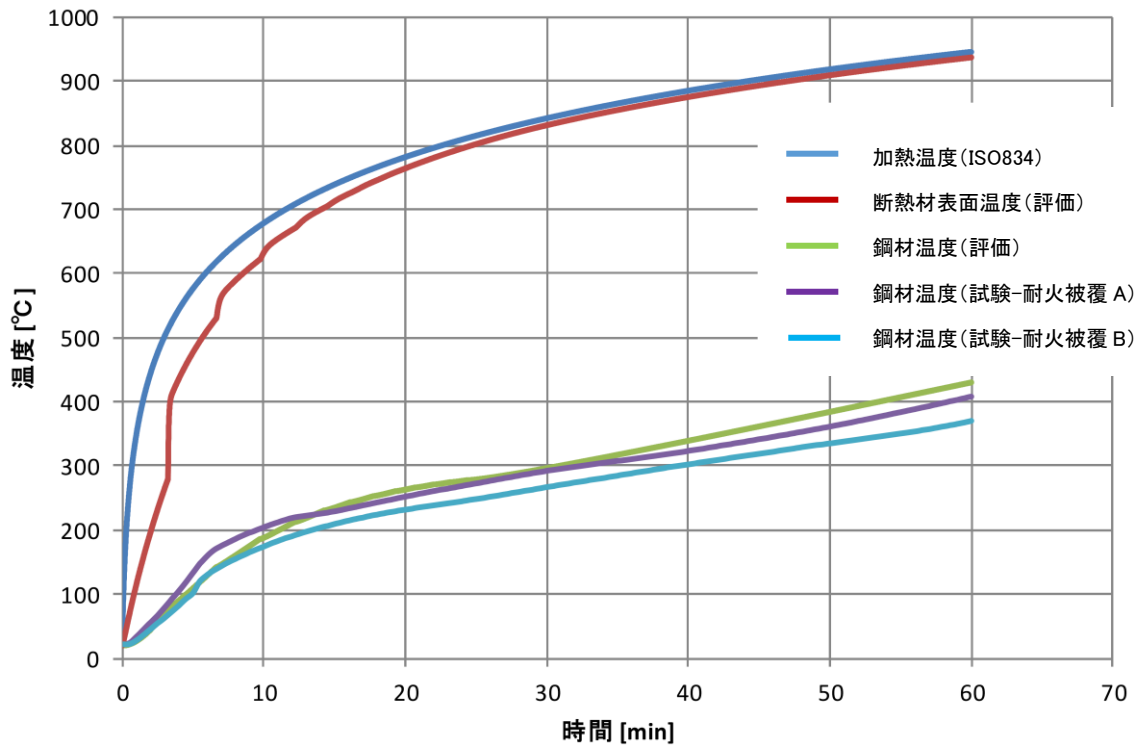
発泡前の熱物性値は、比熱の場合は設定する断熱材の熱物性値に対して 20 分の 1 倍 (=0.625mm/12.5mm) に、熱伝導率の場合は設定する断熱材の熱物性値に対して 20 倍 (=12.5mm/0.625mm) に設定する。発泡後の熱物性値は、設定する断熱材の熱物性値とする。

(5) 比較結果

上記(4)の断熱材厚さのモデルを適用し評価した断熱材表面温度(赤色)、鋼材温度(緑色)及び大臣認定試験の鋼材温度結果(紫色、水色)の結果を第 4-2 図に示す。

温度評価の結果は、断熱材温度が 280℃に到達した時点で、その断熱材厚さを変化させることで断熱性能を与えている(比熱を大きくし、熱伝導率を下げる)ため、断熱材表面では 280℃に到達した直後に 100℃超の急激な温度上昇がみられるとともに、鋼材温度(緑色)が 150℃から 180℃に達した時点で断熱材の断熱効果が遅れて表れ、鋼材温度の上昇が緩和されている。

上記の鋼材温度(緑色)の結果は、大臣認定試験の鋼材温度(紫色、水色)の結果とほぼ同様の傾向を示していることから、トレース解析の結果から設定した断熱材厚さのモデルは妥当であることを確認した。



第 4-2 図 耐火被覆 2mm の大臣認定試験とこれ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

## 5. 耐火被覆厚さの設定と温度評価

上記 4. から得られた耐火被覆の断熱性能に応じて、耐火被覆の必要厚さを設定するとともに、鋼材温度が許容温度以下となることを確認するために温度評価を実施する。

### (1) 耐火被覆厚さの設定方針

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、安全上重要な施設及び波及的影響を及ぼし得る施設に求められる安全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耐火被覆厚さを設定する。
- ・耐火被覆厚さは、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、安全上重要な施設と波及的影響を及ぼし得る施設について、それぞれ一律に設定する。
- ・耐火被覆厚さは、代表部材の評価に基づいて設定する。代表部材は、以下のとおり検討した結果から、飛来物防護ネットの防護板(SUS304 平板 (t9mm))とした。
  - ① 輻射強度が最も大きく、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 別添 - 3 において設定したとおり、平板を代表とする。
  - ③ 飛来物防護ネットを構成する部材のうち、最も薄い防護板 (t9mm) を代表とする。
  - ④ SUS304 は、その熱拡散率 (300K で約  $4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) が炭素鋼の熱拡散率 (300K で約  $12 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) よりも小さいことから、輻射を受ける鋼材表面で温度が高い状態が維持されやすい。よって、温度評価上保守的となる SUS304 を代表とする。  
熱拡散率  $a$  は、以下の式から求めることができる。

$$a = \lambda / (c \times \rho)$$

ここで、

$\lambda$  : 熱伝導率 [W/m/K]

$c$  : 比熱 [J/kg/K]

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

- ・平板以外の形状 (H 鋼, 角柱等) において、代表部材より薄い板厚を有する部材については、最も薄い板厚を平板に置き換え、耐火試験にて許容温度を満足することを確認する。

### (2) 評価条件

裏面等から見込まれる放熱効果を見無視し、保守的に平板の表裏共に熱的境界条件を断熱条件 (輻射による入熱は見込む) と設定し評価を行う。

また、航空機墜落火災で想定される輻射強度である約  $29.4 \text{ kW/m}^2$  を加熱開始の初期入熱量として保守的に設定し、以降は火炎と耐火被覆表面の温度差に応じた輻射入熱を考慮する。

第 5-1 表に評価対象の仕様及び加熱条件，第 5-2 表にステンレス鋼の熱物性値を示す。

評価に用いる断熱材としては，前述 4. の第 4-2 表の断熱材及び断熱材厚さのモデルと同じとする。

第 5-1 表 評価対象の仕様および加熱条件

鋼材の材質	SUS304
鋼材の形状	平板
鋼材の厚さ	9mm
輻射強度	29.4kW/m <sup>2</sup>

第 5-2 表 ステンレス鋼の物性値(伝熱工学資料の SUS304 より)

温度 [K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [kJ/kg/K]	熱伝導率 [W/m/K]
300	7920	0.499	16.0
400	7890	0.511	16.5
600	7810	0.556	19.0
800	7730	0.620	22.5
1000	7640	0.644	25.7

(3) 評価方法

鋼材の温度評価は，輻射強度，鋼材への輻射熱伝達，断熱材(耐火被覆)の温度変化，鋼材の温度変化について，非定常一次元熱伝導解析により温度上昇を算出する。詳細は本資料の参考 2 に示す。

(4) 評価結果

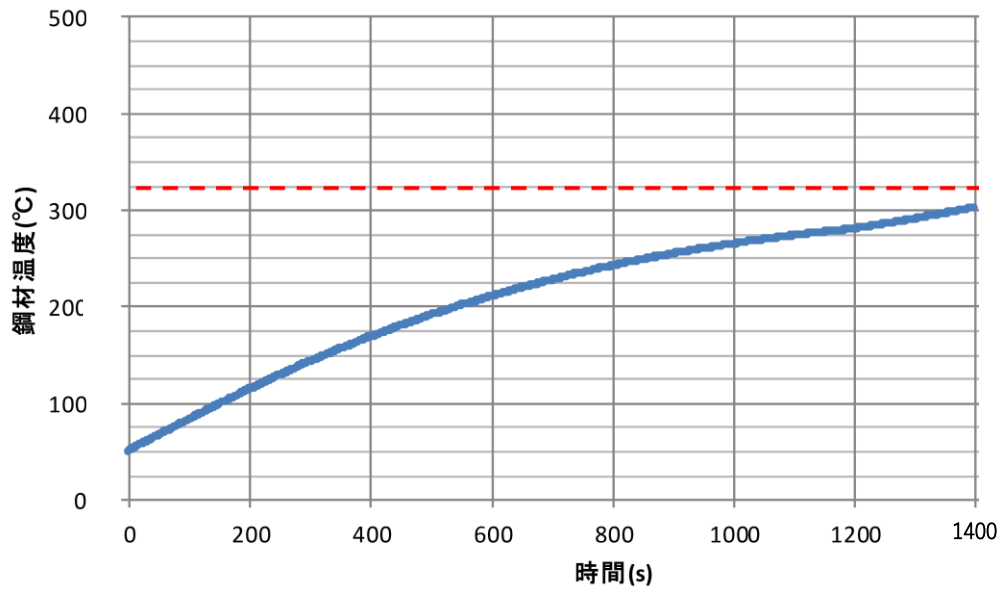
SUS304 の 9mm 平板を代表に，耐火被覆厚さを設定して温度評価を行った結果を第 5-1 図及び第 5-2 図に示す。

評価の結果，鋼材温度を 325℃以下とするためには 3mm の耐火被覆厚さ，450℃以下とするためには 2mm の耐火被覆厚さが必要であることを確認した。

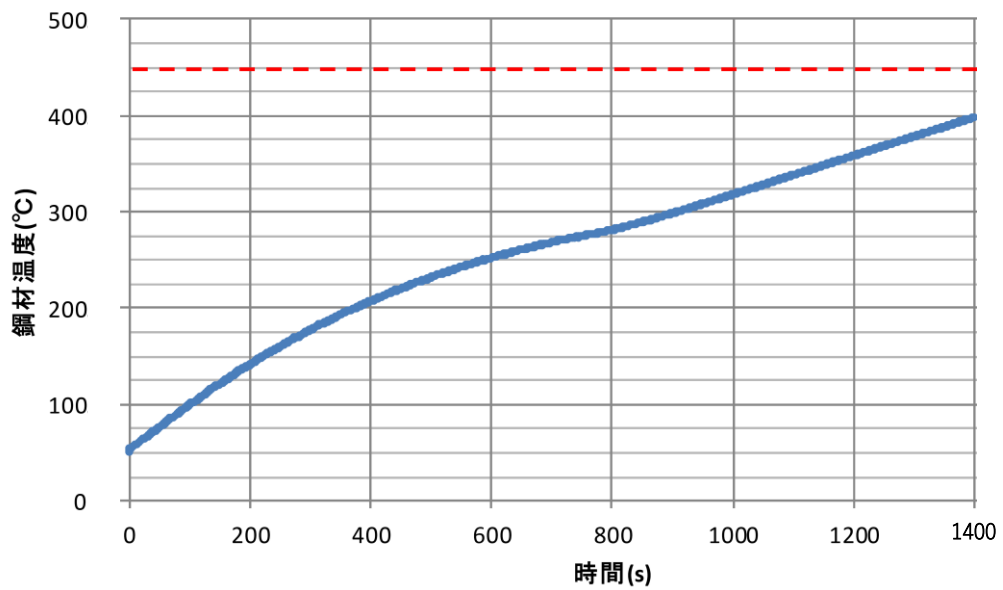
計算パラメータ設定の妥当性については参考 3 に，時間刻みの影響については参考 4 に示す。

なお，鋼材の温度上昇が緩やかな部分(第 5-1 図：1,200s まで，第 5-2 図：900s まで)については，耐火被覆が発泡温度に到達し耐火被覆厚さが増え，耐火被覆の断熱効果が大きくなる影響が反映されている。

全ての耐火被覆の節点に対して発泡が完了すると，熱容量の変化がなくなり，やがて入熱がそのまま鋼材の温度上昇として計算されること，発泡完了後の入熱量がほぼ一定になるため直線的に温度上昇するように計算されると考えられる。



第 5-1 図 安全上重要な施設(耐火被覆 3mm)の  
温度評価結果



第 5-2 図 波及的影響を及ぼし得る施設(耐火被覆 2mm)の  
温度評価結果

## 6. 耐火試験(参考)

上記 5.にて耐火被覆厚さを設定し、SUS304 平板 (t9mm)を代表として解析を行い把握した耐火被覆の挙動を、航空機墜落火災の条件において確認するために、参考として耐火試験を実施した。耐火試験は、3.に示した条件①(温度評価と同等の条件)及び条件②(温度評価における熱的境界条件及び耐火被覆の実施工を念頭に置いた条件)にて行った。

条件①：SUS304 平板 (t9mm)，片面耐火被覆

条件②：SS400 平板 (t6mm，t12mm)，両面耐火被覆

耐火試験の条件②と上記 5.の温度評価では、鋼材の材質が異なるが、鋼材厚さは温度評価を行った SUS304 の鋼材厚さ (t9mm)より厚いもの (t12mm)と薄いもの (t6mm)の両方を選定していることから、比較対象として参考になるものと考えられる。

### (1) 耐火試験の概要

本試験では、航空機墜落火災から輻射を受けた時の部材の温度変化の傾向を確認する。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、鋼材の温度を測定する。

### (2) 耐火試験の方法及び条件

#### a. 試験方法

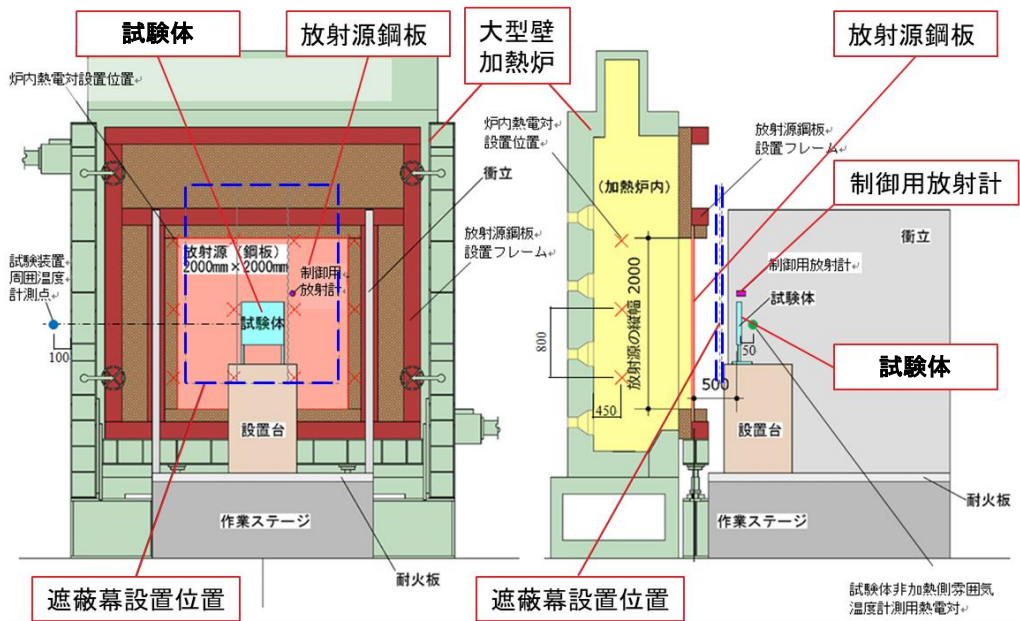
本試験に用いる装置を第 6-1 図及び第 6-2 図に示す。本試験では、加熱された鋼板(放射源鋼板)を放射源として試験体に放射熱流束を与える。そのため、大型壁加熱炉を用いて鋼板(放射源鋼板)を加熱し、鋼板から輻射熱を発生させる。

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する。予熱中は、試験体への入熱を軽減するため、試験体と放射源鋼板の前に遮蔽幕を設置する。試験体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。

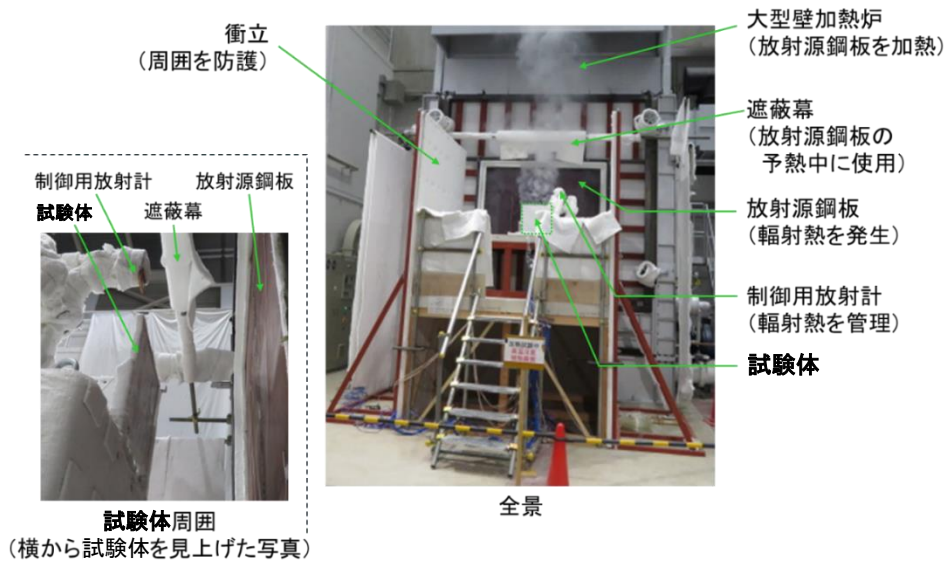
#### b. 試験条件

火災の輻射強度、燃焼継続時間及び試験体の条件を第 6-1 表及び第 6-2 表に示す。





第 6-1 図 試験設備 (図面)



第 6-2 図 試験設備写真

第 6-1 表 試験条件①

項目			条件①			
耐火試験ケース			1-1	1-2	2-1	2-2
試験体	耐火被覆	種類	A	B	A	B
		厚さ	2mm		3mm	
		施工面	片面			
	鋼材	種類	平板			
		厚さ	SUS304			
輻射強度			耐火被覆表面位置にて 29,400 W/m <sup>2</sup>			
燃焼継続時間			3,600s <sup>*</sup>			

※ 想定する燃焼継続時間は 1,400 秒だが、試験では 3,600 秒後まで加熱し温度測定を実施した。

第 6-2 表 試験条件②

項目			条件②			
耐火試験ケース			3-1	3-2	4-1	4-2
試験体	耐火被覆	種類	A	B	A	B
		厚さ	2mm			
		施工面	両面			
	鋼材	種類	平板			
		厚さ	12mm		6mm	
輻射強度			耐火被覆表面位置にて 29,400 W/m <sup>2</sup>			
燃焼継続時間			3,600s <sup>*</sup>			

※ 想定する燃焼継続時間は 1,400 秒だが、試験では 3,600 秒後まで加熱し温度測定を実施した。

(3) 耐火試験の温度測定結果

a. 試験条件①

耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 の温度測定結果並びに第 5-2 図に示した温度評価結果を第 6-3 図に、ケース 2-1 及び 2-2 の温度測定結果並びに第 5-1 図に示した温度評価結果を第 6-4 図に示す。

耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 の初期温度は、温度評価結果と比較して数 10℃程度高くなった。また、耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 の温度上昇は、温度評価の結果と比べて緩やかであり、許容温度を大きく下回る結果となった。

耐火試験ケース 2-1 及び 2-2 についても、耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 と同様に、温度評価結果と比較して初期温度は数 10℃程度高く、温度

上昇は緩やかであり、許容温度を大きく下回る結果となった。

b. 試験条件②

ケース 3-1 及び 4-1 の温度測定結果並びに第 4-2 図に示した温度評価結果を第 6-5 図に、ケース 3-2 及び 4-2 の温度測定結果並びに第 5-1 図に示した温度評価結果を第 6-6 図に示す。

耐火試験ケース 3-1 から 4-2 の初期温度は、温度評価結果と比較して数 10℃ から 100℃ 程度高い結果となった。また、耐火試験ケース 3-1 から 4-2 の温度上昇は温度評価の結果と比べて緩やかであり、許容温度を大きく下回る結果となった。

c. 試験条件①及び②の結果について

比較のために、耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 の結果を、それぞれ第 6-5 図及び 6-6 図に示す。

耐火試験ケース 3-1 から 4-2 と耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 の結果を比較すると、鋼材厚さが 6mm の温度測定結果(3,600 秒後)が最も温度が高く、次に鋼材厚さが 12mm, 最も温度が低いのが鋼材厚さ 9mm となった。

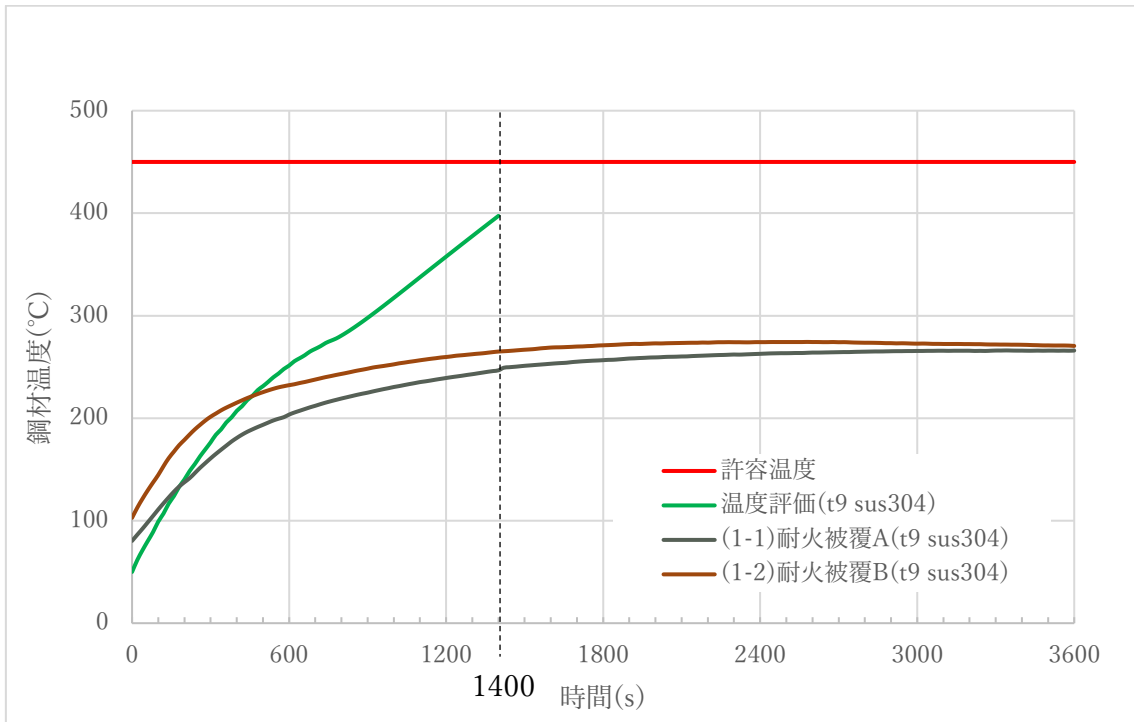
(4) 耐火試験前後の耐火被覆の状況観察

耐火試験のケース 1-1 から 4-2 の耐火試験前及び耐火試験後(3,600 秒後)における試験体の様子を、第 6-7 図から第 6-14 図に示す。

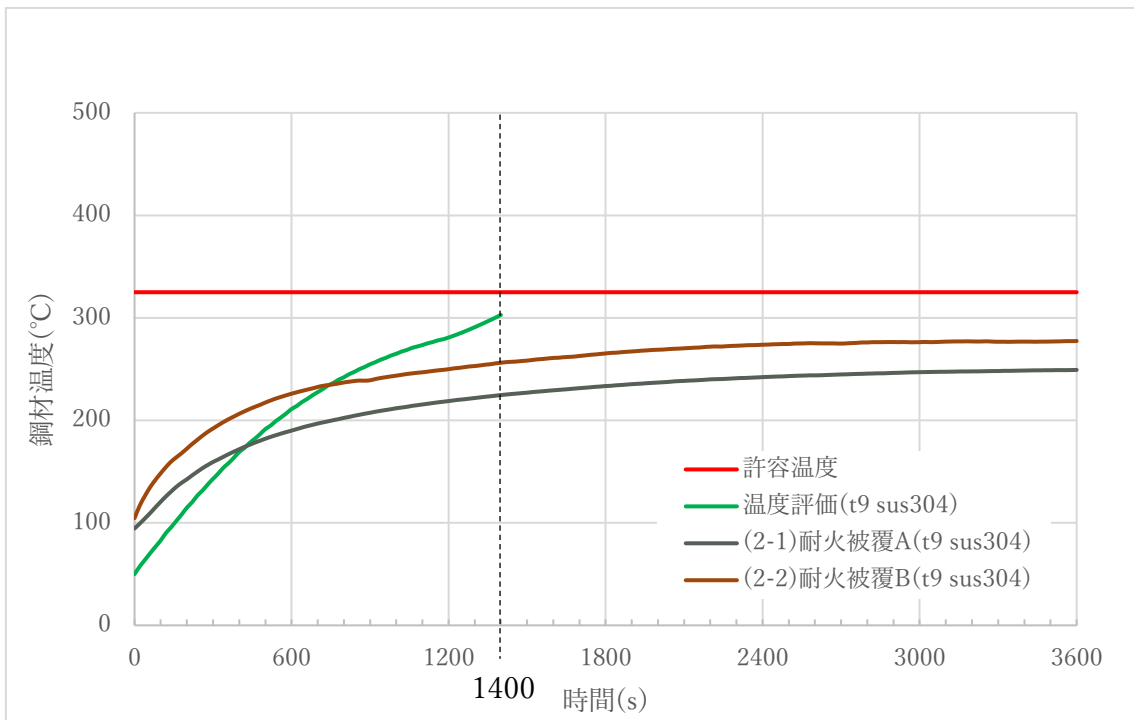
第 6-5 図の大臣認定試験の結果からは、試験後は大部分が灰色となっており、十分に炭化した後に灰化にまで至っているが、耐火試験後の耐火被覆表面は黒色となっており炭化しているが、灰化にまでは至っていないことが確認できる。試験後の裏面の様子を参考 5 に示す。

また、第 6-3 図から第 6-6 図の耐火試験により得られた温度測定結果から、耐火試験の温度上昇の変化は時間の経過とともに緩やかに推移しており、試験終盤ではほとんど温度上昇がみられない。

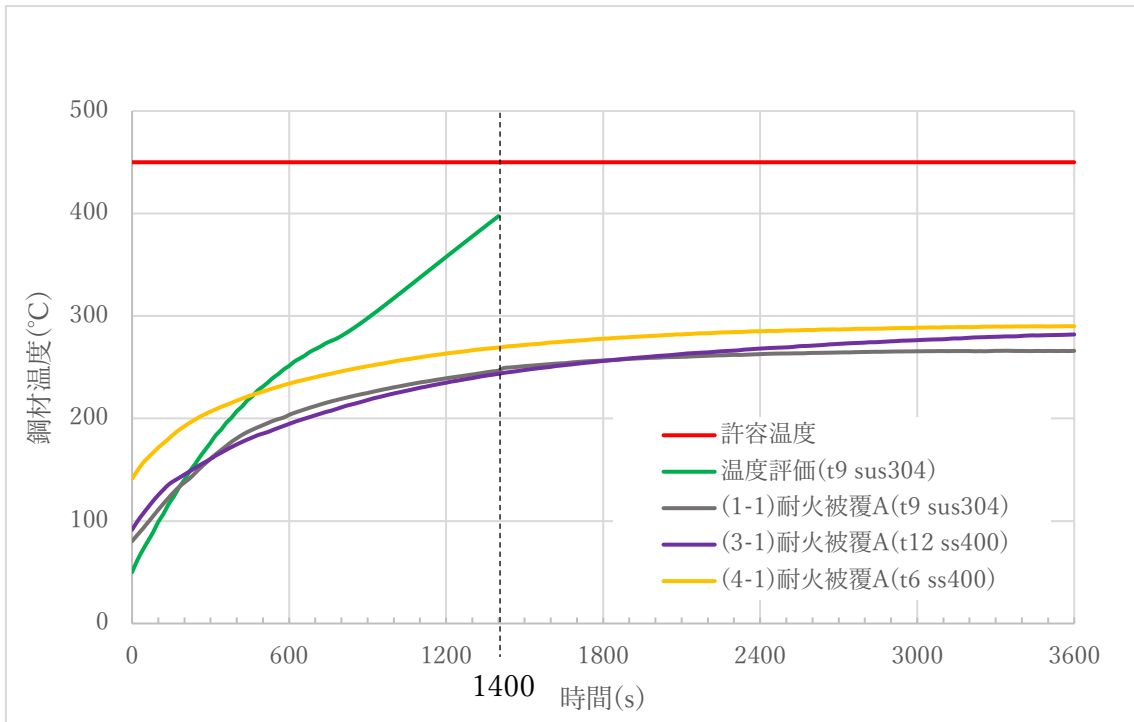
以上のことからすると、耐火試験時の耐火被覆は、試験終了時においても、まだ余裕を残しているものと考えられる。



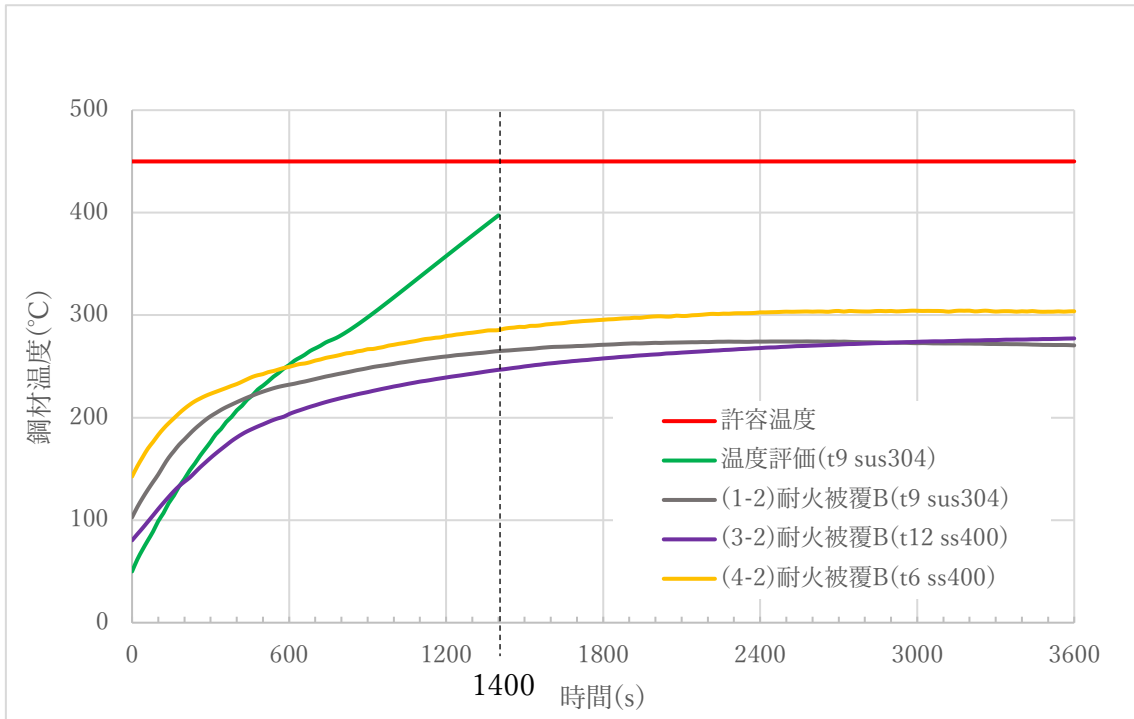
第 6-3 図 耐火被覆 2mm の温度評価と耐火試験ケース 1-1, 1-2 の比較



第 6-4 図 耐火被覆 3mm の温度評価と耐火試験ケース 2-1, 2-2 の比較



第 6-5 図 耐火被覆 2mm の温度評価と耐火試験ケース 1-1, 3-1, 4-1 の比較



第 6-6 図 耐火被覆 2mm の温度評価と耐火試験ケース 1-2, 3-2, 4-2 の比較

第 6-3 表 温度評価と耐火試験の結果

ケース	鋼材		耐火被覆			試験結果				
	種類	厚さ	施工面	厚さ	種類	温度変化	初期温度	1,400s 後	3,600s 後	試験体の 様子
温度評価 1	SUS304	<u>9mm</u>	片面	<u>2mm</u>	—	第 <u>6-3</u> 図, 第 <u>6-5</u> 図, 第 <u>6-6</u> 図	50℃	410℃	410℃超	—
温度評価 2	SUS304	<u>9mm</u>	片面	<u>3mm</u>	—	第 <u>6-4</u> 図	50℃	300℃	300℃超	—
耐火試験 1-1	SUS304	<u>9mm</u>	片面	<u>2mm</u>	<u>A</u>	第 <u>6-3</u> 図	80℃	249℃	266℃	第 <u>6-7</u> 図
耐火試験 2-1	SUS304	<u>9mm</u>	片面	<u>3mm</u>	<u>A</u>	第 <u>6-4</u> 図	95℃	225℃	249℃	第 <u>6-9</u> 図
耐火試験 3-1	SS400	<u>12mm</u>	両面	<u>2mm</u>	<u>A</u>	第 <u>6-5</u> 図	92℃	244℃	282℃	第 <u>6-11</u> 図
耐火試験 4-1	SS400	<u>6mm</u>	両面	<u>2mm</u>	<u>A</u>	第 <u>6-6</u> 図	141℃	269℃	290℃	第 <u>6-13</u> 図
耐火試験 1-2	SUS304	<u>9mm</u>	片面	<u>2mm</u>	<u>B</u>	第 <u>6-3</u> 図	103℃	265℃	274℃	第 <u>6-8</u> 図
耐火試験 2-2	SUS304	<u>9mm</u>	片面	<u>3mm</u>	<u>B</u>	第 <u>6-4</u> 図	105℃	256℃	277℃	第 <u>6-10</u> 図
耐火試験 3-2	SS400	<u>12mm</u>	両面	<u>2mm</u>	<u>B</u>	第 <u>6-5</u> 図	80℃	247℃	277℃	第 <u>6-12</u> 図
耐火試験 4-2	SS400	<u>6mm</u>	両面	<u>2mm</u>	<u>B</u>	第 <u>6-6</u> 図	143℃	285℃	304℃	第 <u>6-14</u> 図



(試験開始前)



(1時間後)

第 6-7 図 耐火試験ケース 1-1 の試験前後の試験体の様子



(試験開始前)



(1時間後)

第 6-8 図 耐火試験ケース 1-2 の試験前後の試験体の様子



(試験開始前)



(1時間後)

第 6-9 図 耐火試験ケース 2-1 の試験前後の試験体の様子



(試験開始前)



(1時間後)

第 6-10 図 耐火試験ケース 2-2 の試験前後の試験体の様子





(試験開始前)



(1時間後)

第 6-11 図 耐火試験ケース 3-1 の試験前後の試験体の様子

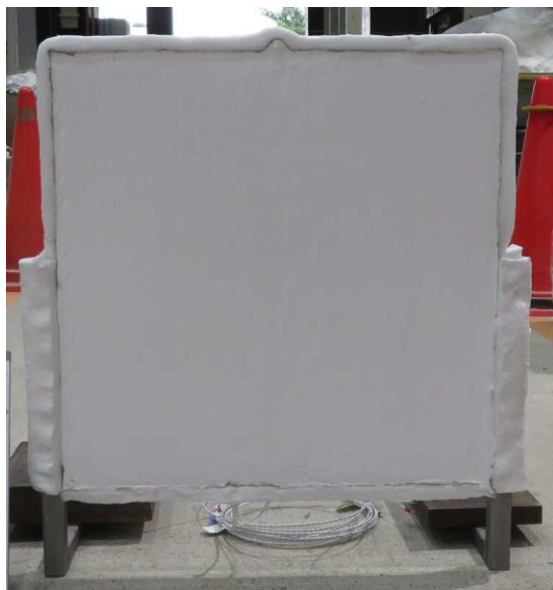


(試験開始前)



(1時間後)

第 6-12 図 耐火試験ケース 3-2 の試験前後の試験体の様子



(試験開始前)



(1時間後)

第 6-13 図 耐火試験ケース 4-1 の試験前後の試験体の様子



(試験開始前)



(1時間後)

第 6-14 図 耐火試験ケース 4-2 の試験前後の試験体の様子

## 7. 温度評価及び耐火試験の考察

第 6-3 図から第 6-6 図に示す耐火試験により得られたケース 1-1 から 4-2 の温度測定結果及び温度評価結果を比較すると、いずれの温度結果も許容温度以下となっているものの、試験開始時の鋼材温度及び試験開始から 3,600 秒後までの温度測定結果は温度評価結果と異なるとともに、温度評価結果が耐火試験による温度測定結果を大幅に上回っている。

これら乖離について、以下の(1)にて物理現象を整理し、(2)にて考察する。

### (1) 耐火被覆を施工した試験体に生じる物理現象について

試験開始から 1,400 秒後までに、耐火被覆を施工した試験体に生じる物理現象は、以下の①から⑦に示すとおりである。

- ① 放射源鋼板と試験体間にあらかじめ設置されている遮蔽幕を取り除くことにより、放射源鋼板から耐火被覆を施工した試験体へ、航空機墜落火災を想定し設定した輻射  $29,400\text{W/m}^2$  が与えられる。
- ② 放射源鋼板から発泡開始前の耐火被覆表面までは輻射、発泡開始前の耐火被覆(表側)内部、耐火被覆から試験体表面、試験体内部は熱伝導により熱が伝播すると同時に、耐火被覆(表側)及び試験体裏側から輻射及び対流熱伝達により放熱が生じる。
- ③ 耐火被覆(表側)の温度が  $200^\circ\text{C}$  前後となった時点で、耐火被覆の主成分である発泡剤(ポリりん酸アンモニウム)が熱分解し、発生した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の形成を開始する。
- ④ ③の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炭化層として膨張し、初期耐火被覆厚さ(2mm又は3mm)を超える厚さのガスを含む断熱層の形成を開始する。
- ⑤ 耐火被覆内部においては、輻射による入熱が、形成される断熱層内を熱伝導により伝播するとともに、耐火被覆(表側)表面から輻射及び対流熱伝達により放熱が生じる。
- ⑥ ⑤と同時に、耐火被覆から試験体表面、耐火被覆内部においては、形成した耐火被覆(表側)の断熱層により緩和された輻射による入熱が熱伝導により試験体へ伝播するとともに、試験体裏側から輻射及び対流熱伝達により放熱が生じる。
- ⑦ 発泡開始後においては、①の輻射の発生が試験開始から 3,600 秒後まで継続するのに並行して、③及び④の発泡現象が発泡剤の分解開始から終了まで継続し、初期耐火被覆厚さの数十倍にもなる断熱層を形成するとともに、⑤及び⑥の熱伝導及び放熱が発泡剤の分解開始から 3,600 秒まで継続する。

(2) 温度評価及び耐火試験の乖離についての考察

温度評価と耐火試験の結果における初期温度の乖離，温度変化の乖離及び温度結果についての考察を，下記 a. から c. に示す。

本考察においては，耐火試験により得られた耐火試験の全ケース(1-1 から 4-2)の温度測定結果及び温度評価結果を示した，第 6-3 図から第 6-6 図を参照する。(ケース一覧は第 6-3 表参照)

a. 鋼材初期温度の乖離について

(a) 温度評価と耐火試験の鋼材初期温度

耐火試験においては，出力調整中の放射源鋼板から鋼材への直接輻射を熱的に遮蔽し，試験開始前の鋼材への入熱を極力抑えるために遮蔽幕を設置しているが，高温となった遮蔽幕から鋼材への二次輻射により，試験開始時の鋼材温度は，温度評価と比較し数 10℃から 100℃程度高くなっている(第 5-3 図から第 5-6 図)。

このような初期温度の乖離は，4. にて把握した耐火被覆の挙動を航空機墜落火災の条件で参考として確認するという耐火試験の目的を考慮すると，より厳しい試験条件を与えているということができる。

(b) 耐火試験の鋼材厚さによる鋼材初期温度への影響

鋼材厚さ 6mm の耐火試験ケース 4-1 及び 4-2 の鋼材初期温度は，温度評価(初期温度 50℃)と比較して 100℃程度高くなっている。また，鋼材厚さ 12mm の耐火試験 3-1 及び 3-2 の鋼材初期温度は，温度評価(初期温度 50℃)と比較して数 10℃程度高くなっている。

これは厚さ 6mm 鋼材の方が，熱容量が小さく，厚さ 12mm 鋼材よりも温度上昇しやすいことが影響していると考えられる。

このような試験開始時の鋼材温度の乖離は，4. にて把握した耐火被覆の挙動を航空機墜落火災の条件で参考として確認するという耐火試験の目的を考慮すると，より厳しい試験条件を与えているということができる。

b. 鋼材の温度変化の乖離について

(a) 温度評価と耐火試験の放熱の違い

第 5-3 図から第 5-6 図より，耐火試験の全ケース(1-1 から 4-2)の鋼材温度は，時間の経過とともにその上昇が緩やかになる一方，温度評価の結果は温度上昇し続ける結果となっている。

上記 4. にて示した温度評価は保守的な評価とするために，(1)で整理した現象の②及び⑥の放熱の考慮をしておらず，完全な断熱条件にて評価を実施している。

耐火試験においては，試験体の表側のみ又は，表側及び裏側に耐火被覆を施工することにより，断熱条件に近い熱的条件としているケースもあるが，試験体の表側及び裏側からの対流放熱及び輻射放熱は完全になくすことはできない。特に，耐火試験時には放射源鋼板からの輻射を直接受熱しない試験体裏側からの放熱及び試験体周辺の環境か

ら試験体裏側への二次輻射による入熱の影響は無視できない。

耐火試験時の試験体裏側からの放熱及び試験体裏側への入熱の影響については、次項(b)にて説明する。

- (b) 耐火試験時の試験体裏側からの放熱及び試験体裏側への入熱の影響  
前項(a)にて説明した放熱及び二次輻射の影響を確認するため、耐火  
試験にて取得したデータから、被輻射体への入熱が被輻射体の温度上  
昇とともに減少する効果を試験体の温度解析に考慮した。

放熱の効果は、耐火試験にて取得したデータによると、時間の経過  
に伴って温度上昇が減少することに着目し、試験体裏側への二次輻射  
による入熱及び試験体裏側からの放熱を同じと仮定し考慮した。

被輻射体への入熱が被輻射体の温度上昇とともに減少する効果は、  
放射源鋼板の温度と被輻射体の温度差により入熱するモデルとし、被  
輻射体の温度上昇とともに入熱が減少することを考慮した。

温度解析において、大臣認定試験にて取得した物性値によるモデル  
を使い、前項(a)にて確認した耐火試験の入熱の減少を考慮して評価し  
た結果と耐火試験結果の比較を第6-1図及び第6-2図に示す。これに  
によると、評価結果と耐火試験結果の温度変化は、ほぼ一致する結果  
となった。

これらの比較から、二次輻射及び放熱の影響については、温度上昇  
による入熱の減少と同程度であることを確認した。

- c. 鋼材の温度結果(3,600秒後)の乖離について

- (a) 熱容量の違いによる温度結果(3,600秒後の鋼材温度)への影響

耐火試験の全ケース(1-1 から 4-2)の温度測定結果のうち、耐火被  
覆厚さ 2mm の耐火試験ケース 4-1 及び 4-2 は熱容量が最も小さく、他  
の耐火試験ケースと比較して最も鋼材温度(3,600秒後)が高くなった。

次に、熱容量が最も大きいことから、耐火試験ケース 3-1 及び 3-2  
が最も温度上昇しにくいと考えられるが、実際には耐火試験ケース 1-  
2 及び 2-1 の鋼材温度(3,600秒後)が最も低かった。これは、耐火試験  
ケース 1-2 及び 2-1 は片面にのみ耐火被覆が施工されており、両面に  
耐火被覆が施工されている耐火試験ケース 3-1 及び 3-2 よりも、放熱  
の効果が大きいことが影響していると考えられる。

なお、熱容量は最も小さく、両面に耐火被覆が施工され断熱条件に  
近い(放熱の効果が小さい)耐火試験ケース 4-1 及び 4-2 の条件におい  
ても、その温度測定結果から、許容温度に対して十分な余裕があるこ  
とがわかった。

- (b) 試験体の耐火被覆厚さの違いによる温度結果(3,600秒後の鋼材  
温度)への影響

耐火被覆 A においては、耐火被覆厚さ 3mm の耐火試験ケース 2-1 が  
最も鋼材温度(3,600秒後)が低い、耐火被覆 B においては、耐火被  
覆厚さ 2mm の耐火試験ケース 1-2 が最も鋼材温度(3,600秒後)が低く  
なった。

耐火被覆厚さ 2mm の耐火試験ケース 1-2 及び耐火被覆厚さ 3mm の耐火試験ケース 2-2 は、試験体初期温度及び 3,600 秒後の温度において、同じ 2 から 3°C 程度の温度の違いしか現れていないことから、耐火被覆厚さの違いによる影響はほぼみられない。

耐火被覆厚さ 2mm の耐火試験ケース 1-1 及び耐火被覆厚さ 3mm の耐火試験ケース 2-1 は、3,600 秒後の試験体温度において約 15°C の違いが現れているが、試験体初期温度も同様の温度差がみられることから、耐火被覆厚さの影響ではなく、試験体初期温度の違いが影響していると考えられる。

よって、耐火被覆の種類によって最も低い試験体温度をもたらす耐火被覆厚さが異なるのは、試験体初期温度の違いによるものと考えられる。また、耐火被覆の厚さについては、今回の試験条件において 2mm を施工することによって部材の温度上昇を緩和することが十分可能であることがわかった。

(c) 温度評価と耐火試験の入熱量による温度結果(3,600 秒後の鋼材温度)への影響

同じ入熱量を与えた場合には熱容量の観点から、鋼材厚さ 9mm の温度評価の結果は、鋼材厚さ 6mm の耐火試験ケース 4-1 及び 4-2 の温度測定結果と鋼材厚さ 12mm の耐火試験ケース 3-1 及び 3-2 の温度測定結果の幅に含まれることが考えられるが、温度評価の結果は耐火試験による温度測定結果を大幅に上回っている。

当社が実施した耐火試験と温度評価の入熱量の違いから、温度結果の違いについて説明する。

当社が実施した耐火試験では試験初期において、試験体位置での輻射強度を約 29.4kW/m<sup>2</sup> と設定しているものの、試験体の温度が高い状態から試験を開始しているため、実際の入熱量は 29.4kW/m<sup>2</sup> を下回っており、積算入熱量としては約 8,000kJ/m<sup>2</sup> となっている。一方、温度評価では計算初期において、被輻射体への入熱を保守的に約 29.4kW/m<sup>2</sup> と設定しており、積算入熱量としても約 18,000kJ/m<sup>2</sup> と高い積算入熱量となっている。

このような入熱量の違いにより、温度評価の結果は耐火試験による温度測定結果を大幅に上回っている。積算入熱量の比較については別添-6 に示す。

(3) まとめ

温度評価と耐火試験の結果における初期温度の乖離、温度変化の乖離、3,600 秒後の温度の乖離について考察した結果から、耐火試験は航空機墜落火災の条件を再現している一方、温度評価は以下のとおり保守性を確保している。

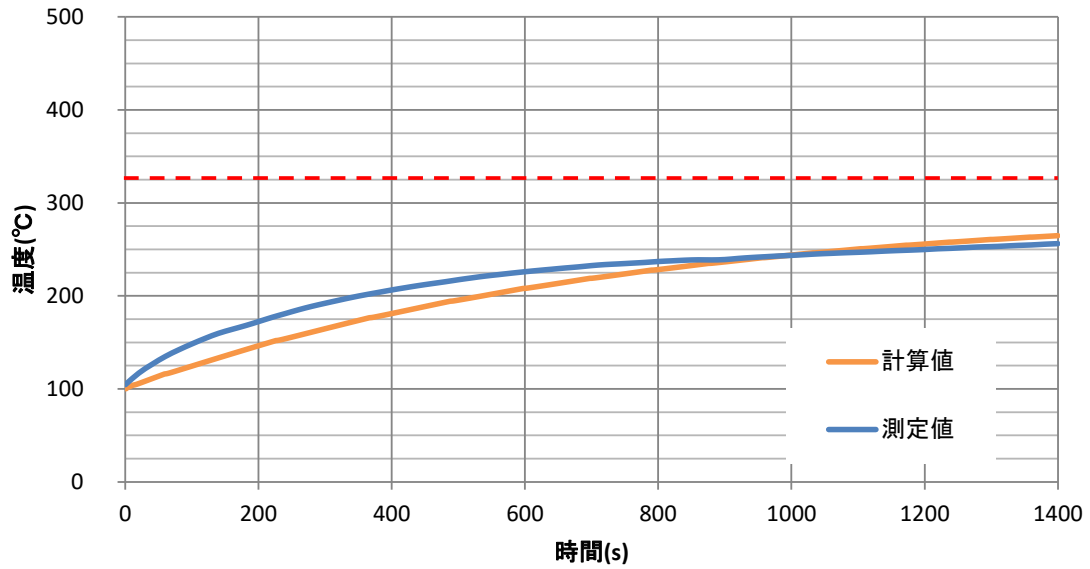
- ・鋼材の全面において、熱的境界条件を完全断熱条件として設定しており、鋼材表面からの放熱がなく、鋼材の温度評価の結果を厳しく評価

している。

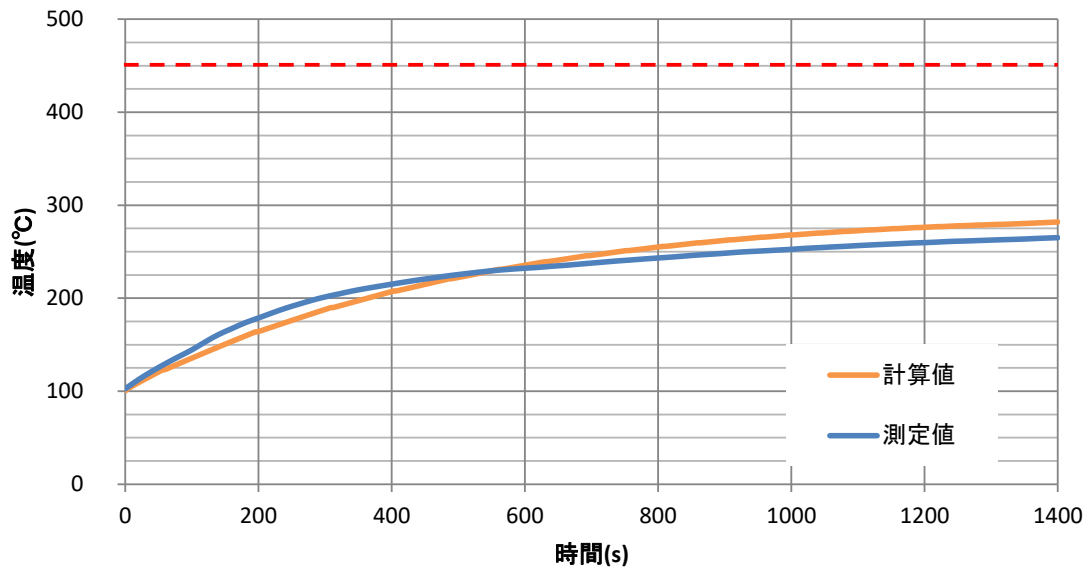
- ・ 航空機墜落火災の条件を再現している耐火試験の入熱量(約 8,000  $\text{kJ/m}^2$ )を大幅に上回る入熱量(約 18,000  $\text{kJ/m}^2$ )を設定しており,鋼材の温度評価の結果を厳しく評価している。

以上より温度評価の結果をもとに耐火被覆の厚さを設定することにより,安全余裕が確保された設計となっているということが出来る。





第 6-1 図 解析による温度評価結果及び  
耐火被覆 B (SUS304, t9mm, 耐火被覆厚さ 3mm) の  
耐火試験による温度測定結果



第 6-2 図 解析による温度評価結果及び  
耐火被覆 B (SUS304, t9mm, 耐火被覆厚さ 2mm) の  
耐火試験による温度測定結果



## 参考 1 鋼材の温度評価(断熱材相当の厚さの算出)の方法

鋼材の温度評価の方法を以下に示す。評価モデルの概略を第 1 図に示す。空気の物性値を第 1 表に示す。

### (1) 炉内の温度上昇

炉内の温度は IS0834 に基づく時間変化をするものとし、防耐火性能試験・評価業務方法書より、以下のとおり算出する。

$$T_a = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$$

ここで、

$T_a$  : 炉内平均温度 [°C]

$t$  : 試験経過時間 [min]

### (2) 炉内から断熱材への輻射熱伝達

炉内から断熱材への輻射熱伝達は、炉内温度を一様とし、次式より算出する。

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

ここで、

$Q_r$  : 輻射熱伝達 [W]

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 [ $W/m^2/K^4$ ]  
( $= 5.67 \times 10^{-8}$ ) (伝熱工学資料 改訂第 5 版 131 頁)

$A$  : 受熱面積 [ $m^2$ ] ( $= 0.282$ )

$T_a$  : 炉内平均温度 [°C]

$T_d(1)$  : 断熱材表面温度 [°C]

### (3) 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  $\Delta t$  毎の時間進行の式にすると

$$T_{d_{n+1}} = T_{d_n} + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

ここで、

<u>Q</u>	: 熱伝導量 [W]
<u><math>\rho</math></u>	: 鋼材又は断熱材の密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
<u>c</u>	: 鋼材又は断熱材の比熱 [J/kg/K]
<u>V</u>	: 鋼材又は断熱材の体積 [m <sup>3</sup> ]
<u>Td<sub>n+1</sub></u>	: $\Delta t$ 後の断熱材温度 [°C] (n+1 は $\Delta t$ 後の時間ステップ)
<u>Td<sub>n</sub></u>	: 現在の断熱材温度 [°C] (n は現在の時間ステップ)
<u><math>\Delta t</math></u>	: 時間刻み [s] (= 0.0006)

節点(j)ごとに熱伝達量 Q 及び鋼材又は断熱材の体積 V を以下のよう  
に設定する。

j=1

$$Q = Q_r - \frac{\lambda_d(j)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j) - T_d(j+1))$$

$$V = \frac{1}{2} \times A \times \frac{L_d}{N_d-1}$$

j=2~Nd-1

$$Q = \frac{\lambda_d(j-1)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j-1) - T_d(j)) - \frac{\lambda_d(j)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j) - T_d(j+1))$$

$$V = A \times \frac{L_d}{N_d-1}$$

j=Nd

$$Q = \frac{\lambda_d(j-1)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j-1) - T_d(j)) - \frac{\lambda_f(1)}{(L_f/(N_f-1))} \times A \times (T_f(1) - T_f(2))$$

$$\rho \cdot c \cdot V = \rho_d \times c_d \times \frac{1}{2} \times A \times \frac{L_d}{N_d-1} + \rho_f \times c_f \times \frac{1}{2} \times A \times \frac{L_f}{N_f-1}$$

ここで、

<u>Q<sub>r</sub></u>	: 輻射熱伝達 [W]
<u><math>\lambda_d</math></u>	: 断熱材の熱伝導率 [W/m/K] (別添 5 の第 3-2 表参照)
<u>L<sub>d</sub></u>	: 断熱材の厚さ [m] (別添 5 の 3. (4) 参照)
<u>N<sub>d</sub></u>	: 断熱材の節点数 [-] (26)
<u>A</u>	: 伝熱面積 [m <sup>2</sup> ] (= 0.282)
<u>T<sub>d</sub>(j)</u>	: 断熱材の節点温度 [°C]
<u><math>\lambda_f</math></u>	: 鋼材の熱伝導率 [W/m/K] (別添 5 の第 3-3 表参照)
<u>L<sub>f</sub></u>	: 鋼材の厚さ [m] (= 0.009)
<u>N<sub>f</sub></u>	: 鋼材の節点数 [-] (10)
<u>T<sub>f</sub>(j)</u>	: 鋼材の節点温度 [°C]
<u><math>\rho_d</math></u>	: 断熱材の密度 [kg/m <sup>3</sup> ] (別添 5 の第 3-2 表参照)
<u>c<sub>d</sub></u>	: 断熱材の比熱 [J/kg/K] (別添 5 の第 3-2 表参照)
<u><math>\rho_f</math></u>	: 鋼材の密度 [kg/m <sup>3</sup> ] (別添 5 の第 3-3 表参照)
<u>c<sub>f</sub></u>	: 鋼材の比熱 [J/kg/K] (別添 5 の第 3-3 表参照)

(4) 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、温度変化は次式にて設定する。

$$\rho_f \cdot c_f \cdot V_f \cdot \frac{d}{dt} T_f = Q$$

上式を陽解法により  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると、

$$T_{f_{n+1}} = T_{f_n} + \Delta t * \frac{Q}{\rho_f c_f V_f}$$

ここで、

<u>Q</u>	: 熱伝導量 [W]
<u><math>\rho_f</math></u>	: 鋼材の密度 [kg/m <sup>3</sup> ] (別添5の第3-3表参照)
<u><math>c_f</math></u>	: 鋼材の比熱 [J/kg/K] (別添5の第3-3表参照)
<u><math>V_f</math></u>	: 鋼材の体積 [m <sup>3</sup> ]
<u><math>T_{f_{n+1}}</math></u>	: $\Delta t$ 後の鋼材温度 [°C] <u><math>n+1</math></u> : $\Delta t$ 後の時間ステップ
<u><math>T_{f_n}</math></u>	: 現在の温度 [°C] <u><math>n</math></u> : 現在の時間ステップ
<u><math>\Delta t</math></u>	: 時間刻み [s] (=0.0006s)

節点(j)ごとに熱伝達量 Q 及び鋼材の体積  $V_f$  を以下のように設定する。

$j=1$

$$T_{f(1)} = T_d(Nd)$$

$j=2 \sim (Nf-1)$

$$Q = \frac{\lambda f(j-1)}{(Lf/(Nf-1))} \times A \times (T_{f(j-1)} - T_{f(j)}) - \frac{\lambda f(j)}{(Lf/(Nf-1))} \times A \times (T_{f(j)} - T_{f(j+1)})$$

$$V_f = A \times \frac{Lf}{(Nf-1)}$$

$j=Nf$

$$Q = \frac{\lambda f(j-1)}{(Lf/(Nf-1))} \times A \times (T_{f(j-1)} - T_{f(j)}) - Q_t$$

$$V_f = \frac{1}{2} \times A \times \frac{Lf}{(Nf-1)}$$

ここで、

$j$  : 節点

$T_{f(1)}$  : 鋼材の表面温度 [°C]

$T_d(Nd)$  : 断熱材の裏面温度 [°C]

$Lf$  : 鋼材の厚さ [m] (=0.009)

$Nf$  : 鋼材の節点数(10)

$A$  : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>] (=0.282)

(5) 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]  
 $h$  : 熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>/K]  
 $A$  : 受熱面積 [m<sup>2</sup>] (0.282m<sup>2</sup>)  
 $N_f$  : 鋼材の節点数 (10)  
 $T_f(N_f)$  : 鋼材裏面温度 [°C]  
 $T_i$  : 内部空気温度 [°C]

熱伝達率は、ヌセルト数の定義から、次式にて設定する。

$$h = Nul \cdot \lambda_a / HL \quad (\text{伝熱工学資料第 4 版 68 頁})$$

ここで、

- $h$  : 熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>/K]  
 $Nul$  : 平均ヌセルト数  
 $HL$  : 角鋼管の高さ [m] (= 1)  
 $\lambda_a$  : 空気の熱伝導率 [W/m/K] (第 1 表参照)

空気の熱伝達率を求めるに当たって、ヌセルト数  $Nu$ 、レイリー数  $Ra$  及びグラスホフ数  $Gr$  といった無次元数を算出する。これらの算出のために、空気物性としてプラントル数  $Pr$  を用いる。

熱伝達率を求めるに当たっての各無次元数の算出を、以下の (a) から (f) に示す。

(a) 平均ヌセルト数  $Nul$

一様温度伝熱面の平板の局所熱伝達率の積分することにより、次式にて設定する。

$$Nul = (4/3)Nux \quad (\text{伝熱工学資料第 4 版 69 頁})$$

ここで、

- $Nul$  : 平均ヌセルト数  
 $Nux$  : 局所ヌセルト数

(b) 局所ヌセルト数  $N_{ux}$

一様温度伝熱面の平板の局所熱伝達率から、次式にて設定する。

$$N_{ux} = C_T(\text{Pr}) \left( v_{\infty} / v_w \right)^{0.21} (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4} \quad (\text{伝熱工学資料第 4 版 69 頁})$$

ここで、

- $N_{ux}$  : 局所ヌセルト数  
 $\text{Pr}$  : プラントル数 (第 1 表参照)  
 $C_T(\text{Pr})$  : プラントル数の関数  
 $v$  : 動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] (第 1 表参照)  
(添字:  $\infty$ : 周囲流体の値,  $w$ : 壁面の値)  
 $(v_{\infty} / v_w)^{0.21} = 1$  (伝熱工学資料第 4 版 69 頁)  
 $\text{Gr}$  : グラスホフ数

(c) プラントル数の関数  $C_T(\text{Pr})$

次式で表される。

$$C_T(\text{Pr}) = \frac{3}{4} \left\{ \frac{\text{Pr}}{(2.4 + 4.9\sqrt{\text{Pr} + 5\text{Pr}})} \right\}^{1/4} \quad (\text{伝熱工学資料第 4 版 68 頁})$$

ここで、

- $C_T(\text{Pr})$  : プラントル数の関数  
 $\text{Pr}$  : プラントル数 (第 1 表参照)

(d) レイリー数  $Ra$

定義から次式で表される。

$$Ra = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (\text{伝熱工学資料第 4 版 68 頁})$$

ここで、

- $Ra$  : レイリー数  
 $\text{Gr}$  : グラスホフ数  
 $\text{Pr}$  : プラントル数 (第 1 表参照)

(e) グラスホフ数  $\text{Gr}$

定義から次式で表される。

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \text{HL}^3 \cdot (\text{Tf}(\text{NF}) - \text{Ti})}{\nu^2} \quad (\text{伝熱工学資料第 4 版 68 頁})$$

ここで、

- $\text{Gr}$  : グラスホフ数  
 $g$  : 重力加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] (= 9.80665)  
 $\beta$  : 体膨張率 [ $1/\text{K}$ ]  
 $\text{HL}$  : 角鋼管の高さ [ $\text{m}$ ] (= 1)

- Nf : 鋼材の節点数 (10)  
 Tf(Nf) : 鋼材裏面温度 [°C]  
 Ti : 内部空気温度 [°C]  
 v : 動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] (第 1 表参照)

(6) 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、次式にて設定する。

$$Na \cdot c_{va} \cdot \frac{d}{dt} T_i = 4 \cdot Qt$$

上式を陽解法により  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると、

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

ここで、

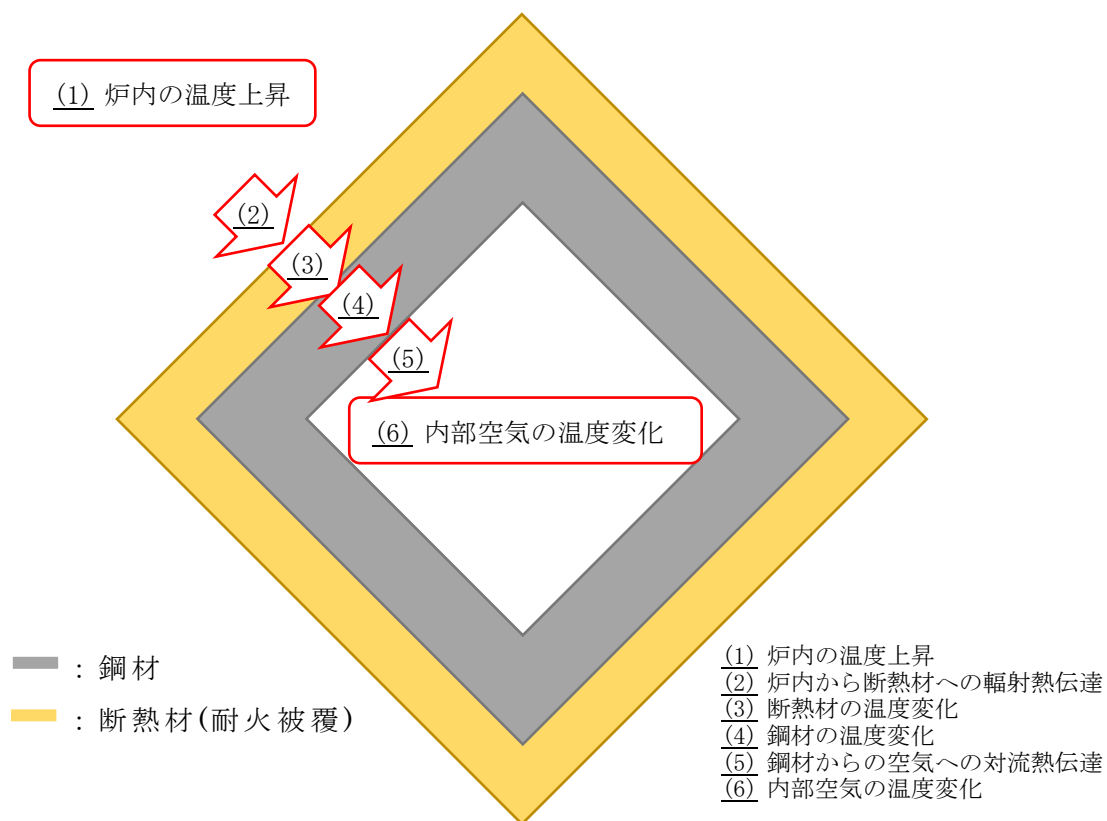
- $Q_t$  : 対流熱伝達 [W]  
 $Na$  : 内部空気量 [mol] ( $= \rho_a \cdot V_a \cdot 10^3 / M$ )  
 $\rho_a$  : 空気の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] (第 1 表参照)  
 $V_a$  : 空気の体積 [ $\text{m}^3$ ] ( $A \cdot HL = 0.079524$ )  
 $c_{va}$  : 定積モル比熱 [ $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$ ] ( $= c_p - R$ )  
 (岩波理化学辞典 第 5 版 1122 頁 マイヤーの関係式)  
 $c_{pa}$  : 定圧モル比熱 [ $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$ ]  
 (定圧比熱 ( $= c_p / M$ ) (第 1 表参照))  
 $M$  : 空気の分子量 [ $\text{g}/\text{mol}$ ] ( $= 28.97$ )  
 (伝熱工学資料 改訂 5 版 p. 279)  
 $R$  : 気体定数 [ $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$ ] ( $= 8.31$ )  
 $Ti_{n+1}$  :  $\Delta t$  後の内部空気温度 [°C]  
 $Ti_n$  : 現在の内部空気温度 [°C]  
 $\Delta t$  : 時間刻み [s] ( $= 0.0006\text{s}$ )

第 1 表 空気の物性値(常圧下)

温度 T		密度 $\rho$	定圧比熱 $c_p$	動粘性係数 <sup>*2</sup> $\nu$	熱伝導率 $\lambda$	プラントル数 Pr
[K]	°C <sup>*1</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg/K]	[mm <sup>2</sup> /s]	[mW/m/K]	—
280	6.85	1.2606	1.007	14.00	24.61	0.720
300	26.85	1.1763	1.007	15.83	26.14	0.717
320	46.85	1.1026	1.008	17.86	27.59	0.719
340	66.85	1.0376	1.009	19.88	29.00	0.718
360	86.85	0.9799	1.011	21.98	30.39	0.717
380	106.85	0.9282	1.012	24.15	31.73	0.715
400	126.85	0.8818	1.015	26.39	33.05	0.715
420	146.85	0.8398	1.017	28.70	34.37	0.713
440	166.85	0.8016	1.020	31.06	35.68	0.712
460	186.85	0.7667	1.023	33.51	36.97	0.711
480	206.85	0.7347	1.027	36.01	38.25	0.710
500	226.85	0.7053	1.031	38.58	39.51	0.710
550	276.85	0.6412	1.041	45.27	42.60	0.709
600	326.85	0.5878	1.052	52.36	45.60	0.710
650	376.85	0.5425	1.064	59.90	48.40	0.714
700	426.85	0.5038	1.076	67.70	51.30	0.715
800	526.85	0.4408	1.099	84.50	56.90	0.719

※1: Kから摂氏°C変換は-273.15°Cとする。

※2: 計算への適用は [m<sup>2</sup>/s] なので 10<sup>6</sup> を乗じた値を用いる。



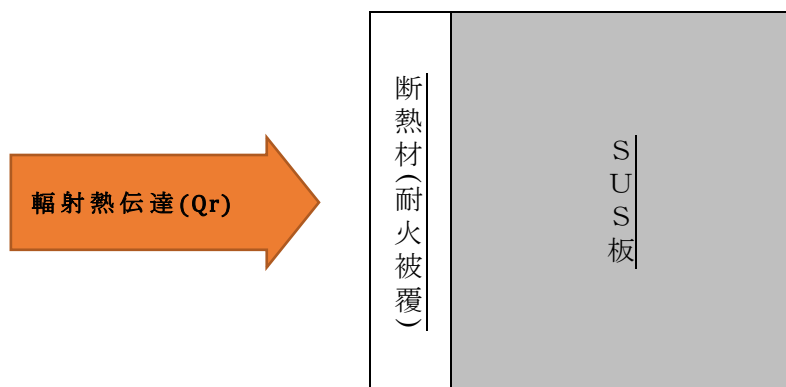
第 1 図 鋼材温度評価の評価モデル

## 参考2 耐火被覆を施工した鋼材の温度評価の方法

耐火被覆を施工した鋼材の温度評価の方法を以下に示す。評価モデルの概略を第1図に示す。

耐火被覆は温度に依存し化学反応によって形状変化することから、鋼材の温度評価式においては、熱物性値のパラメータ設定が困難である。したがって、評価式への反映が可能な高温熱物性値が明らかになっている断熱材へ置き換える。

耐火被覆を模擬した断熱材を施工した 9mmSUS 平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。計算は一次元熱伝導計算とし、耐火被覆側から輻射熱を受け、鋼材側へ熱伝導するものとする。鋼材裏面での放熱はないものとする。



第1図 評価モデル

### (1) 輻射強度

輻射強度は「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成25年6月19日 原子力規制委員会)」より、以下のとおり算出する。

$$E = R_f \cdot \phi + E_s$$

ここで、

$E$  : 輻射強度 [ $W/m^2$ ]

$R_f$  : 輻射発散度 [ $W/m^2$ ] (= 58,000)

$\phi$  : 円筒火災モデルの形態係数 (= 0.5)

$E_s$  : 太陽の影響による輻射強度 [ $W/m^2$ ] (= 400)

### (2) 鋼材への輻射熱伝達

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、以下のとおり算出する。



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

ここで、

$Q_r$  : 輻射熱伝達 [W]

$E$  : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]

$A$  : 受熱面積 [m<sup>2</sup>] (= 1)

$T_d(1)$  : 断熱材表面温度 [°C]

### (3) 断熱材の温度変化(非定常熱伝達)

断熱材は温度一様の複数節点の熱伝達とし、1 節点の温度変化は、以下の式にて設定する。

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

また、陽解法により上記式の  $\Delta t$  ごとの時間進行を以下の式に示す。

$$T_{d_{n+1}} = T_{d_n} + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

ここで

$T_{d_{n+1}}$  :  $\Delta t$  秒後の断熱材温度 [°C]

$T_{d_n}$  : 現在の断熱材温度 [°C]

$\Delta t$  : 時間刻み [s] (= 0.001)

$Q$  : 熱伝達量 [W]

$\rho$  : 鋼材又は断熱材の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  : 鋼材又は断熱材の比熱 [J/kg/K]

$V$  : 鋼材又は断熱材の体積 [m<sup>3</sup>]

節点(j)ごとに熱伝達量  $Q$  及び鋼材又は断熱材の体積  $V$  を以下のよう  
に設定する。

$j=1$ の場合

$$Q = Q_r - \frac{\lambda d(j)}{(Ld/(Nd-1))} \times A \times (T_d(j) - T_d(j+1))$$

$$V = \frac{1}{2} \times A \times \frac{Ld}{Nd-1}$$

j=2~Nd-1の場合

$$Q = \frac{\lambda_d(j-1)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j-1) - T_d(j)) - \frac{\lambda_d(j)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j) - T_d(j+1))$$

$$V = A \times \frac{L_d}{N_d-1}$$

j=Ndの場合

$$Q = \frac{\lambda_d(j-1)}{(L_d/(N_d-1))} \times A \times (T_d(j-1) - T_d(j)) - \frac{\lambda_f(1)}{(L_f/(N_f-1))} \times A \times (T_f(1) - T_f(2))$$

$$\rho \cdot c \cdot V = \rho_d \times c_d \times \frac{1}{2} \times A \times \frac{L_d}{N_d-1} + \rho_f \times c_f \times \frac{1}{2} \times A \times \frac{L_f}{N_f-1}$$

ここで

Qr : 輻射熱伝達 [W]

A : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>] (=1)

λd : 断熱材の熱伝導率 [W/m/K]  
(別添5の第3-2表参照)

Ld : 断熱材の厚さ [m] (=0.025)

Nd : 断熱材の節点数 (=26)

Td(j) : 節点 j での断熱材温度 [°C]

ρd : 断熱材の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (別添5の第3-2表参照)

cd : 断熱材の比熱 [J/kg/K]  
(別添5の第3-2表参照)

λf : 鋼材の熱伝導率 [W/m/K]  
(別添5の第4-2表参照)

Lf : 鋼材の厚さ [m] (=0.009)

Nf : 鋼材の節点数 (10)

Tf(j) : 節点 j での鋼材温度 [°C]

ρf : 鋼材の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (別添5の第4-2表参照)

cf : 鋼材の比熱 [J/kg/K] (別添5の第4-2参照)

耐火被覆厚さ 1 mm の断熱性能が、発泡前では断熱材 0.625mm に相当し、発泡後では断熱材 12.5mm に相当する設定とする。

なお、発泡前及び発泡後の断熱材の熱物性値の切り替えは、断熱材の温度及び熱物性値を考慮する計算節点毎に行うこととし、発泡後の断熱材の計算節点で与える熱物性値は、設定する断熱材の熱物性値とする。発泡前の熱物性値は、比熱の場合は設定する断熱材の熱物性値に対して

20分の1に、熱伝導率の場合は設定する断熱材の熱物性値に対して20倍に設定する。

(4) 鋼材の温度変化(非定常熱伝達)

鋼材は温度一様の複数節点の熱伝達とし、1節点の温度変化は、以下の式にて設定する。

$$\rho_f \cdot c_f \cdot V_f \cdot \frac{d}{dt} T_c = Q$$

また、陽解法により上記式の  $\Delta t$  ごとの時間進行を以下の式に示す。

$$T_{f_{n+1}} = T_{f_n} + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho_f c_f V_f}$$

ここで

$T_{f_{n+1}}$  :  $\Delta t$  秒後の鋼材温度 [°C]

$T_{f_n}$  : 現在の鋼材温度 [°C]

$\Delta t$  : 時間刻み [s] (=0.001)

$Q$  : 熱伝達量 [W]

$\rho_f$  : 鋼材の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (別添5の第4-2表参照)

$c_f$  : 鋼材の比熱 [J/kg/K]

(別添5の第4-2表参照)

$V_f$  : 鋼材の体積 [m<sup>3</sup>]

節点(j)ごとに熱伝達量  $Q$  及び鋼材の体積  $V_f$  を以下のように設定する。

$i=1$ の場合

$$T_{f(1)} = T_d(N_d)$$

$$V_f = \frac{1}{2} \times A \times \frac{L_f}{(N_f - 1)}$$

$i=2 \sim (N_f - 1)$ の場合

$$Q = \frac{\lambda_{f(j-1)}}{(L_f / (N_f - 1))} \times A \times (T_{f(j-1)} - T_{f(j)}) - \frac{\lambda_{f(j)}}{(L_f / (N_f - 1))} \times A \times (T_{f(j)} - T_{f(j+1)})$$

$$V_f = A \times \frac{L_f}{(N_f - 1)}$$

i=Nfの場合

$$Q = \frac{\lambda f(j-1)}{(Lf/(Nf-1))} \times A \times (Tf(j-1) - Tf(j))$$

$$V_f = \frac{1}{2} \times A \times \frac{Lf}{(Nf-1)}$$

ここで、

Tf(1) : 鋼材表面温度 [°C]

Td(Nd) : 断熱材裏面温度 [°C]

λf : 鋼材の熱伝導率 [W/m/K]  
(別添5の第4-2表参照)

A : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>] (= 1)

Lf : 鋼材の厚さ [m] (= 0.009)

Nf : 鋼材の節点数 (= 10)

Tf(j) : 節点 j での鋼材温度 [°C]

参考3 耐火被覆の必要厚さの評価の計算パラメータ設定の妥当性について

(a) 妥当性の確認の方法

拡散方程式を陽解法，特に差分法を用いて計算する場合，拡散数の大きさにより解析の数値的安定性をフォン・ノイマンの安定性解析等により評価することができる。

解析を安定に進めるためには，拡散数  $d$  が次の条件を満たす必要がある。

$$d \leq \frac{1}{2}$$

一次元の熱伝導方程式(拡散方程式)の拡散数は，以下の式から求めることができる。

$$d = \frac{\lambda}{c \times \rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

ここで，

$d$	: 拡散数
$\lambda$	: 熱伝導率 [W/m/K]
$c$	: 比熱 [J/kg/K]
$\rho$	: 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta t$	: 時間刻み [s]
$\Delta x$	: 区分厚さ [m]

計算モデル中の節点数は  $N$  とするが， $N$  が 3 未満になる場合は  $N=3$  と設定する。ここで，区分厚さは  $\Delta x = L/(N-1)$  とする。(L: 板厚 [m])

(b) 妥当性の確認の結果

断熱材と鋼材とで設定している物性値が異なるため，個別に拡散数  $d$  を評価する。確認の結果  $d \leq 0.2$  となることから，解析の安定性は確保できていることを確認した。

以下に確認結果を示す。

本解析では，時間刻み  $\Delta t$  を 0.001 [s]，区分厚さ  $\Delta x$  を 0.001 [m] に設定している。

なお，比熱  $c$ ，密度  $\rho$  及び熱伝導率  $\lambda$  は温度依存性を考慮するとともに，拡散数  $d$  の評価結果を厳しく考慮するために，鋼材温度を 327℃，断熱材温度を 600℃として高温の値を用いる。

以下表に算出結果を示す。

表 拡散数 d の算出結果

評価対象	単位	鋼材	断熱材 2mm	断熱材 3mm
評価対象温度	°C	327	600	600
拡散数 d		0.004	0.194	0.150
熱伝導率 λ	W/m/K	19	2.8* <sup>1</sup>	2.8* <sup>1</sup>
比熱 c	J	556	57.65* <sup>2</sup>	57.65* <sup>2</sup>
密度 ρ	kg/m <sup>3</sup>	7,810	250	250
時間刻み Δt	s	0.001	0.001	0.001
区部厚さ Δx	m	0.001	0.001	0.001

\*1：発泡倍率 20 倍を乗じた値

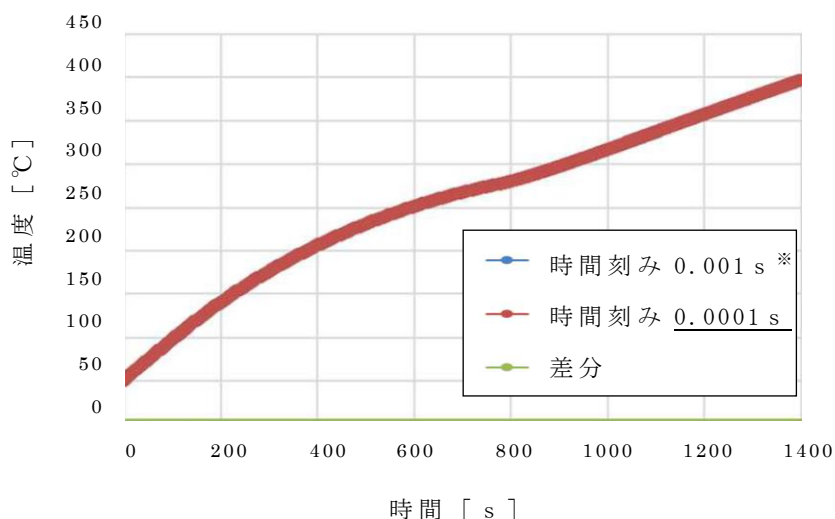
\*2：発泡を想定し 1/20 を乗じた値

参考 4 耐火被覆の必要厚さの評価への時間刻みの影響について

陽解法による解析においては、時間進行の計算を1ステップ進めるための時間間隔である時間刻みを設定しており、この時間刻みを大きく設定してしまうと計算結果が収束せず、正しい結果を得ることができない。

本温度評価で設定している時間刻み 0.001s の妥当性を確認するために、時間刻みをより小さい 0.0001s へ変更し解析を実施した。その結果を第 1 図に示す。全時間刻みにおいて有意な差は見られないことから、時間刻みの設定に問題はない。

なお、必要離隔距離の評価(耐火被覆なし)(別添 - 3)においても、本評価と同様に時間刻みの影響を確認し設定に問題ないことを確認している。



※ 時間刻み 0.001s と時間刻み 0.0001s の温度結果が重なっているため、赤線のみが表れている。

第 1 図 時間刻み 0.001s の鋼材温度及び時間刻み 0.0001s の鋼材温度並びにそれらの差分

参考 5 耐火試験後の試験体裏面の確認

耐火被覆を試験体の両面に施工し，耐火試験後の試験体の状況を目視にて確認した。（第 1 図参照）本試験体の情報を第 1 表に示す。

試験体裏面では，放射源鋼板から直接輻射を受熱する試験体表面と異なり，主に試験体の表面から受熱した輻射の裏面への伝熱による温度上昇に応じて発泡が生じているものの，表面での耐火被覆の発泡による断熱効果により伝熱が緩和され，炭化に至っていないことを確認した。

第 1 表 裏面確認の試験体情報

鋼材		耐火被覆		
種類	厚さ	施工面	厚さ	種類
SS400	6mm	両面	3mm	A



(表面)



(裏面)

第 1 図 耐火試験後の試験体の状況



参考6 耐火被覆を施工した SUS 平板の耐火試験結果のトレース解析モデルについて

(1) 概要

図1に計算モデルを示す。

耐火被覆は温度に依存し化学反応によって形状変化するため、鋼材の温度評価式において、熱物性値のパラメータ設定が困難である。したがって、評価式への反映が可能な高温熱物性値が明らかになっている断熱材へ置き換える。

耐火被覆を模擬した断熱材を施工した 9mmSUS 平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。計算は一次元熱伝導計算とし、耐火被覆側から輻射熱を受け、鋼材側へ熱伝導する。

温度評価と耐火試験の温度変化への放熱の影響の程度については、上記6.(2)b.(b)のとおり、試験体周辺の設備の温度上昇による二次輻射、試験体から周辺への対流放熱及び室内への輻射放熱は見込まないこととする。温度上昇をもたらす二次輻射及び温度低下をもたらす放熱の影響を同じ程度と仮定する。

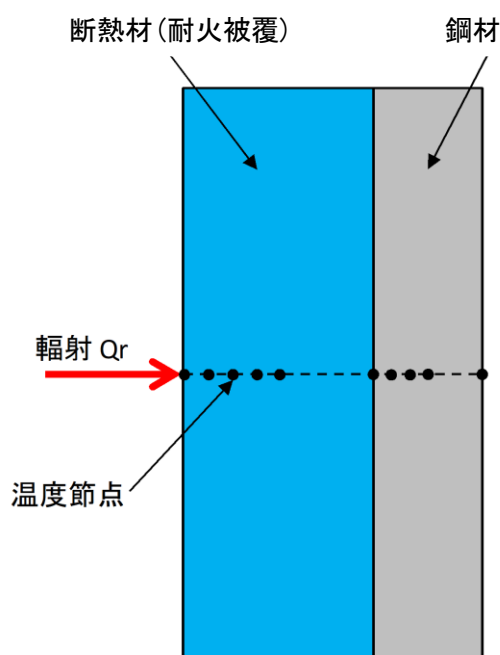


図1 計算モデル

(2) 輻射強度

耐火試験では試験体中心だけではなく、試験体の端部においても確実に設定した輻射強度となるよう  $E=30,000$  [W/m<sup>2</sup>] としており、本解析に

おいても同じ輻射強度  $E=30,000$  [W/m<sup>2</sup>] を設定する。

(3)放射源鋼板から鋼材への輻射

放射源鋼板から鋼材への輻射は，耐火試験より火炎柱の火炎温度を670℃，鋼材の初期温度を100℃として，次式にて設定する。

$$Q_r = E \cdot A \cdot \frac{((670 + 273.15)^4 - (T_d(1) + 273.15)^4)}{((670 + 273.15)^4 - (100 + 273.15)^4)}$$

ここで，

$Q_r$  : 輻射熱伝達 [W]

$E$  : 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]

$A$  : 受熱面積 [m<sup>2</sup>] (=1 単位面積)

$T_d(1)$  : 断熱材表面温度 [℃]

(4)断熱材の温度変化

断熱材は区間毎に温度一様とする複数節点の熱伝導とし，1 節点の温度変化は次式にて設定する。

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d}{dt} T_d(i) = Q$$

上式を陽解法により  $\Delta t$  毎の時間進行の式にすると

$$T_d(i)_{n+1} = T_d(i)_n + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V}$$

ここで，

$Q$  : 熱伝導量 [W]

$\rho$  : 鋼材又は断熱材の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  : 鋼材又は断熱材の比熱 [J/kg/K]

$V$  : 鋼材又は断熱材の体積 [m<sup>3</sup>]

$T_d(i)_{n+1}$  :  $\Delta t$  後の断熱材温度 [℃] ( $n+1$  は  $\Delta t$  後の時間ステップ)

$T_d(i)_n$  : 現在の断熱材温度 [℃] ( $n$  は現在の時間ステップ)

$\Delta t$  : 時間刻み [s] (=0.001 s)

節点(j)毎に熱伝導量  $Q$  及び鋼材又は断熱材の体積  $V$  を以下のように設定する。

$i=1$

$$Q = \frac{Q_r - \frac{\lambda_d}{(L_d/(M-1))} \cdot A \cdot (T_d(1) - T_d(2))}{1}$$

$$V = 1/2 \cdot A \cdot L_d / (M - 1)$$

$i=2 \sim M-1$

$$Q = \frac{\frac{\lambda_d}{(L_d/(M-1))} \cdot A \cdot (T_d(i-1) - T_d(i)) - \frac{\lambda_d}{(L_d/(M-1))} \cdot A \cdot (T_d(i) - T_d(i+1))}{1}$$

$$V = A \cdot L_d / (M - 1)$$

$i=M$

$$Q = \frac{\frac{\lambda_d}{(L_d/(M-1))} \cdot A \cdot (T_d(M-1) - T_d(M)) - \frac{\lambda_f}{(L_f/(N-1))} \cdot A \cdot (T_f(1) - T_f(2))}{1}$$

$$\rho \cdot c \cdot V = \rho_d \cdot c_d \cdot 1/2 \cdot A \cdot L_d / (M - 1) + \rho_f \cdot c_f \cdot 1/2 \cdot A \cdot L_f / (N - 1)$$

ここで、

$Q_r$  : 熱伝導量 [W]

$\lambda_d$  : 断熱材の熱伝導率 [W/m/K] (別添5の第3-2表参照)

$L_d$  : 断熱材の厚さ [m] (耐火被覆厚さ 2mm の場合 : 0.025  
耐火被覆厚さ 3mm の場合 : 0.0375)

$M$  : 断熱材の節点数 (耐火被覆厚さ 2mm の場合 : 26  
耐火被覆厚さ 3mm の場合 : 34)

$A$  : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>] (=1 単位面積)

$T_d(i)$  : 断熱材の節点温度 [°C]

$\lambda_f$  : 鋼材の熱伝導率 [W/m/K] (別添5の第4-2表参照)

$L_f$  : 鋼材の厚さ [m] (=0.009)

$N$  : 鋼材の節点数 (10)

$T_f(i)$  : 鋼材の節点温度 [°C]

$\rho_d$  : 断熱材の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (別添5の第3-2表参照)

$c_d$  : 断熱材の比熱 [J/kg/K] (別添5の第3-2表参照)

$\rho_f$  : 鋼材の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (別添5の第4-2表参照)

$c_f$  : 鋼材の比熱 [J/kg/K] (別添5の第4-2表参照)

また、耐火被覆の代替として断熱材の物性値を使用しているため、耐火被覆の発泡については、鋼材温度が 280°C を超えた時点で断熱材が 1 mm から 20mm 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、

280℃以下の場合、断熱材の比熱は20分の1に、熱伝導率は20倍に設定する。

(5) 鋼材の温度変化

鋼材は区分毎に温度一様とする複数節点の熱伝導とし、1節点の温度変化は次式にて設定する。

$$\underline{\rho_f \cdot c_f \cdot V_f \cdot \frac{d}{dt} Tf(i) = Q}$$

上式を陽解法により  $\Delta t$  毎の時間進行の式にすると

$$\underline{Tf(i)_{n+1} = Tf(i)_n + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho_f c_f V_f}}$$

ここで、

$Q$  : 熱伝導量 [W]

$\rho_f$  : 鋼材の密度 [kg/m<sup>3</sup>] (別添5の第4-2表参照)

$c_f$  : 鋼材の比熱 [J/kg/K] (別添5の第4-2表参照)

$V_f$  : 鋼材の体積 [m<sup>3</sup>]

$Tf(i)_{n+1}$  :  $\Delta t$  後の鋼材温度 [℃] ( $n+1$  は  $\Delta t$  後の時間ステップ)

$Tf(i)_n$  : 現在の温度 [℃] ( $n$  は現在の時間ステップ)

$\Delta t$  : 時間刻み [s] (=0.001s)

節点  $i$  毎に熱伝導量  $Q$  及び鋼材の体積  $V_f$  を以下のように設定する。

$i=1$

$$\underline{Tf(i) = Td(i)}$$

$i=2 \sim N-1$

$$\underline{Q = \frac{\lambda_f}{(Lf/(N-1))} \cdot A \cdot (Tf(i-1) - Tf(i)) - \frac{\lambda_f}{(Lf/(N-1))} \cdot A \cdot (Tf(i) - Tf(i+1))}$$

$$\underline{V_f = A \cdot Lf / (N - 1)}$$

$i=N$

$$\underline{Q = \frac{\lambda_f}{(Lf/(N-1))} \cdot A \cdot (Tf(N-1) - Tf(N))}$$

$$\underline{V_f = 1/2 \cdot A \cdot Lf / (N - 1)}$$

ここで,

Tf(i) : 鋼材の節点温度 [°C]

Td(i) : 断熱材の節点温度 [°C]

Lf : 鋼材の厚さ [m] (=0.009)

N : 鋼材の節点数(10)

A : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>] (=1 単位面積)

λf : 鋼材の熱伝導率 [W/m/K] (別添 5 の第 4-2 表参照)

別添－6

航空機墜落火災の

温度評価条件と大臣認定試験の条件との比較

## 目 次

<u>1.</u> はじめに .....	1
<u>2.</u> 大臣認定試験の条件 .....	1
<u>3.</u> <u>積算入熱量について</u> .....	2
<u>3.1 積算入熱量の結果</u> .....	2
<u>3.2 積算入熱量の比較結果に基づく考察</u> .....	3
<u>4.</u> 判定基準の比較 .....	3
<u>5.</u> まとめ .....	4

## 1. はじめに

航空機墜落火災に対する防護対策で用いる耐火被覆は、大臣認定(建築基準法第2条第七号 同法施工令第107条)を取得しているものを用いている。また、耐火被覆の断熱性能(発泡温度、発泡前後の熱伝導率、比熱等)の設定には、大臣認定試験の結果を用いている。

本資料では、大臣認定試験、温度評価(耐火被覆厚さの設定)及び当社が参考として実施した耐火試験の条件について比較・考察し、大臣認定から取得した耐火被覆の断熱性能(発泡温度、発泡前後の熱伝導率、比熱等)を用いて、航空機墜落火災の耐火被覆厚さを評価し設定することの妥当性を示す。

## 2. 大臣認定試験の条件

大臣認定試験は、「防耐火性能試験・評価業務方法書(一般財団法人建材試験センター)」に規定された方法で実施するものである。耐火被覆の厚さを設定するために用いた大臣認定試験と温度評価に用いた航空機墜落火災の条件を第1-1表のとおり比較した。

第1-1表 大臣認定試験と航空機墜落火災の条件

	大臣認定試験	温度評価(航空機墜落火災)
加熱条件	試験体を加熱炉内に設置し、炉内温度が IS0834 にて示される標準加熱曲線の温度となるように加熱	鋼材表面が航空機墜落火災の火炎の直近に位置することを模擬し、29.4kW/m <sup>2</sup> 相当の輻射を設定
加熱時間	耐火構造、準耐火構造、防火構造、特定防火設備、防火設備等の認定区分により設定 30min, 1hr, 2hr	火災継続時間により設定 1,400sec(23.3min)
合否判定	長期許容応力度に相当する応力度を載荷しながら加熱し、以下の値以下であること。 柱：hは試験体の初期高さ(mm) 最大軸方向収縮量(mm)：h/100 最大軸方向収縮速度(mm/分)：3h/1000 梁：Lは試験体の支点間距離 最大たわみ量(mm)：L <sup>2</sup> /400d 最大たわみ速度(mm/分)：L <sup>2</sup> /9000d 荷重を載荷しない場合にあつては 鋼材温度が最高450℃、平均温度が350℃を超えないこと	鋼材温度が、安全上重要な施設においては325℃、波及的影響を与えるおそれのある施設では450℃を超えないこと。



### 3. 積算入熱量について

#### 3.1 積算入熱量の結果

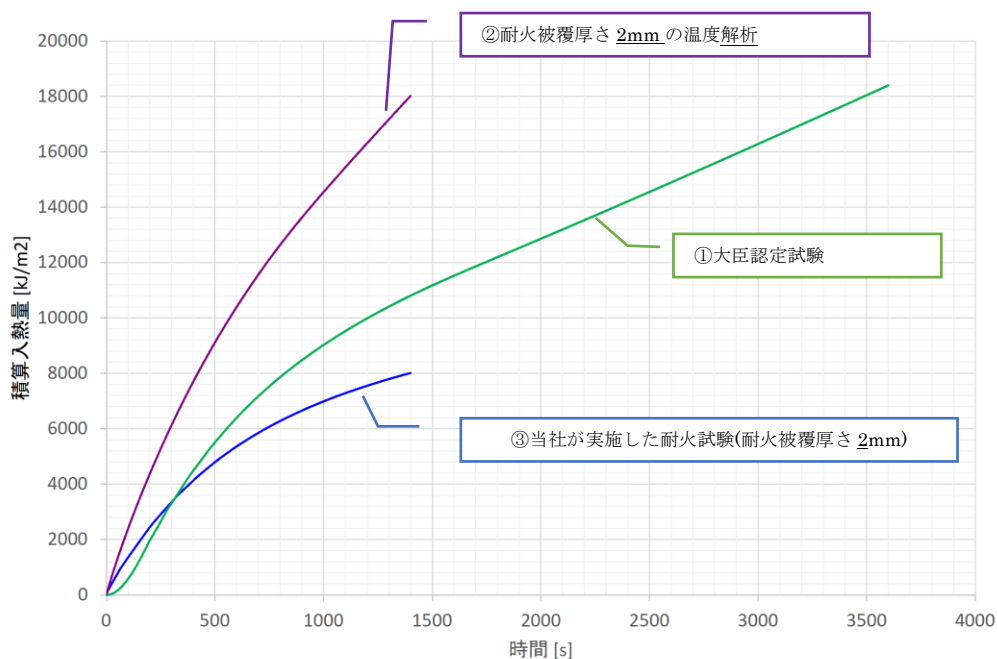
鋼板における積算入熱量について、「大臣認定試験」の測定結果(①)と当社で行った航空機墜落火災の「耐火被覆厚さ 2mm の温度評価」の評価結果(②)を第 1-1 図に示す。また、航空機墜落火災を模擬して「当社が参考として実施した耐火試験」の測定結果(③)についても図中に示す。

大臣認定試験においては、IS0834 にて示される標準加熱曲線に基づき、試験を実施している。当社で行った耐火被覆厚さ 2mm の温度評価及び当社の耐火試験については以下のとおり実施している。

耐火被覆厚さ 2mm の温度評価の輻射強度については、加熱初期において 29.4kW/m<sup>2</sup> の入熱を考慮しているが、実現象としては、被輻射体への入熱は被輻射体の温度上昇とともに減少するため、1,400 秒間に渡って 29.4kW/m<sup>2</sup> の輻射強度が一定入熱することは考えにくい。そのため、耐火被覆厚さ 2mm に対する温度解析においては、上記物理現象を考慮し、初期に約 29.4kW/m<sup>2</sup> の入熱があるものの、その後は断熱材表面温度の上昇を考慮した輻射入熱量を計算している(②)。

また、当社が実施した耐火試験においては、試験体位置において約 29.4kW/m<sup>2</sup> の輻射強度となるように放射源鋼板の温度を管理しており、放熱面と受熱面の温度データから輻射入熱量を算出している(③)。

耐火被覆厚さ 2mm の温度評価における 1,400 秒後の積算入熱量(②)と大臣認定試験の 3,600 秒後の積算入熱量(①)はほぼ同等であり、航空機墜落火災を模擬して試験体位置の輻射入熱量が 29.4kW/m<sup>2</sup> となるように実施した耐火試験(③)に対し、保守的であることを確認した。



分類		備考
①	大臣認定試験	放熱なし(全面入熱)
②	耐火被覆厚さ 2mm の温度解析	放熱なし(片面入熱)
③	当社が実施した耐火試験	放熱あり

第 1-1 図 積算入熱量の比較

### 3.2 積算入熱量の比較結果に基づく考察

加熱条件については、1 時間耐火の大臣認定試験が IS0834 にて示される標準加熱曲線に基づいた加熱である一方、航空機墜落火災は 29.4kW/m<sup>2</sup> の輻射による加熱であり、両者の加熱条件は異なるものの、耐火被覆厚さ 2mm の温度評価における 1,400 秒後の総入熱量(②)と大臣認定試験の 3,600 秒後の総入熱量(①)は同等である。

また、大臣認定試験は鋼材の加熱条件が明確であり、鋼材の温度変化が解析にて算出可能であることから、耐火被覆の断熱性能(発泡温度、発泡前後の熱伝導率、比熱等)を大臣認定試験から取得できる。

したがって、大臣認定試験の結果を航空機墜落火災の温度評価に適用することは妥当であるとともに、大臣認定試験の結果から耐火被覆の断熱性能を設定することは可能である。

なお、1 時間耐火の大臣認定試験における試験体及び航空機墜落火災の代表部材は 9mm の鋼材としており、耐火被覆厚さは両者ともに 2mm としている。部材の物性値の違いが、温度結果に有意に影響を及ぼすことがないことを確認している。(別添-5)

## 4. 判定基準の比較

次に大臣認定試験と航空機墜落火災に対する判定基準を比較する。大臣認定試験の判定基準は長期許容応力度相当の荷重をかけた状態の収縮量やたわみ量が一定値以下であ

ることであるのに対し、航空機墜落火災に対する温度評価では温度が一定温度以下であることであり、単純に比較はできない。一方、大臣認定試験では荷重を載荷しない場合には、平均 350℃以下であることが判定基準として設定されている。これは、外部火災防護対象施設の許容温度 325℃に近く、両者の判定基準は同等であるといえる。

## 5. まとめ

3.及び 4.の結果から、大臣認定試験と航空機墜落火災の加熱時間、加熱条件及び合否判定といった条件は直接比較するものではないものの、入熱量及び判定基準はほぼ同等であることから、大臣認定から取得した耐火被覆の断熱性能（発泡温度、発泡前後の熱伝導率、比熱等）を用いて、航空機墜落火災の耐火被覆厚さを評価し設定することは妥当である。

令和4年6月9日 R7

別添－7  
施工管理

目 次

1. 施工管理 ..... 1

## 1. 施工管理

耐火被覆が設計のとおり<sup>1</sup>の機能を発揮するため、施工時の品質確保に係る<sup>2</sup>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。

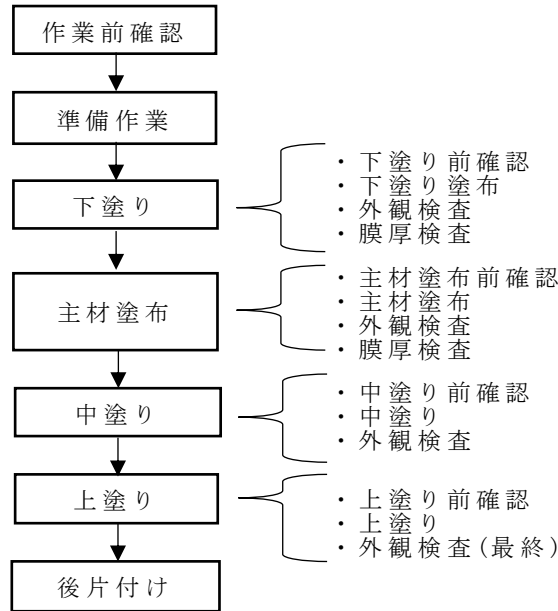
第 1-1 表 耐火塗料の施工時における管理項目と管理方法

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		メーカー規定内であること。 以下に規定例を示す。 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。	塗膜厚さは塗料の使用量で確認する。
		表面状態	浮き、汚れ、液だれ、傷が無く、硬化乾燥していること。	目視にて確認
	主材塗り (耐火被覆)	塗膜厚さ	外部火災防護対象施設：設定膜厚 3mm -0mm(全検査値)であること。 波及影響を与える施設：設定膜厚 2mm -0mm(全検査値)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	浮き、汚れ、液だれ、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、汚れ、液だれ、傷が無く、硬化乾燥していること。	目視にて確認

(2) 耐火塗料の施工手順

耐火塗料の施工手順を以下の第 1-1 図に示す。

各手順において作業箇所毎に検査記録や工事記録を作成し管理する。



第 1-1 図 耐火塗料の施工手順

(3) 耐火被覆厚さに関する測定方法

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

耐火被覆の必要厚さが確保されていることを確認するため、電磁膜厚計を用いて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。

主材被覆厚さは耐火被覆の施工後の厚さから下塗りの厚さ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

電磁膜厚計は、膜厚計本体とプローブ(検出部)で構成される。電磁膜厚計の仕様例は次のとおりとする。

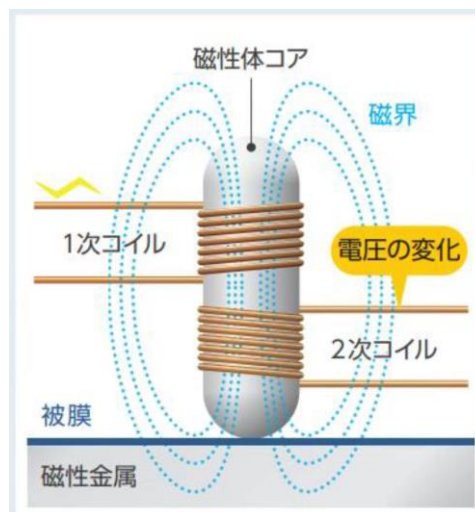
測定範囲：0～20mm

表示分解能：0.01mm(1～5mm)

なお、電磁膜厚計及びプローブ共に国家標準器までの体系で校正されている計測器を、耐火被覆の測定に使用する。

また、測定誤差を出来る限り小さくするため、ゼロ板と呼ばれる測定母材と同一材質で出来た試験板を用いて、ゼロ調整を行う。その後、標準厚板と呼ばれる測定する皮膜と同程度の厚さを有する試験板をゼロ板に重ねて、標準調整を行う。

耐火被覆厚さの測定原理を第 1-2 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、コイルの磁束数が増減し、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、耐火被覆厚さに換算する。



第 1-2 図 耐火被覆厚さの測定原理

#### (4) 耐火被覆厚さの測定管理について

##### a. 管理単位

鉄骨・防護板部材の耐火被覆厚さの管理は部材毎に実施し、耐火被覆面積が  $8\text{m}^2$  ごとの測定とし、1箇所あたりの測定点は 5点とする。測定点の選定は、部材の形状や長さを考慮し偏りが生じないように選定する。

測定箇所は、下塗り厚さと主材塗り厚さ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：  $-0\text{ mm}$  (全検査値)

上限値設定被覆厚：  $+1\text{ mm}$  (平均値) (目標)

##### (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 ( $8\text{m}^2$ ) 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。



耐火塗装の施工完了後に管理基準の逸脱や施工不良を確認した場合は、該当する部材の耐火塗装を剥離後、再度耐火塗料を施工し、上記「a. 管理基準」に従った耐火被覆の測定を実施する。

(b) 上限値

管理単位の範囲 ( $8\text{m}^2$ ) の測定値の平均が  $+1\text{mm}$  を上回った場合、管理単位の範囲 ( $8\text{m}^2$ ) 内で追加 1箇所 (5点) 測定し、上限値以下であることを確認する。追加 5箇所程度測定後も測定値が上限値を上回る場合は、測定された膜厚から耐震性機能に影響がないことを確認する。

令和4年6月9日 R7

別添－8  
維持管理

## 目 次

1.	維持管理	1
2.	損傷事例と原因	1
3.	耐火被覆の劣化	2
4.	定期点検の考え方	3
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	4
8.	耐火塗装の剥がれ等に対する補修方法	4

## 1. 維持管理

耐火被覆が設計どおりの機能を維持するためには、耐火塗装の維持管理が重要となる。




耐火被覆の損傷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、管理方法について説明する。

## 2. 損傷事例と原因

耐火被覆の性能を發揮する主材は、そ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、中塗り塗料・上塗り塗料の健全性を維持することにより性能を担保している。

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	
浮き (膨れ)	塗膜がガスまたは液体を含んでいる状態	
浮き (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とおりである。

- 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、耐火塗装を劣化させる。
- 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、耐火塗装を劣化させる。
- 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割れが発生することで、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装を劣化させる。
- 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、耐火塗装を劣化させる。また、傷の程度によっては、耐火被覆まで損傷することもある。

### 3. 耐火被覆の劣化

中塗り塗料・上塗り塗料に劣化が生じ、耐火被覆である主材まで損傷させた場合、耐火性能に影響を与えることになる。耐火被覆である主材に影響を与える要因は次のとおりである。

なお、耐火被覆である主材は、鋼材の地震等による歪みや温度変化による伸縮に対し追従できるよう微弾性を有することから地震や温度差による影響は受けない。

- ① 紫外線：紫外線が樹脂を分解し、耐火被覆である主材の厚さが減り、耐火性能が低下する等の影響を与える。
- ② 水分：耐火被覆である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。
- ③ 塩分：耐火被覆である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。
- ④ 衝突物：物理的損傷により耐火被覆である主材の層が減り、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. 耐火被覆の劣化」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。

耐火塗装は、下塗り塗料、耐火被覆である主材、中塗り塗料及び上塗り塗料の4層で構成されており、高耐候性のふっ素樹脂系の上塗り塗料で保護され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、耐火被覆である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、点検により上塗り塗料の塗膜劣化を早期に発見し、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の塗装面の外観点検に加えて 1回/年の頻度で詳細に外観点検を実施し、傷や上塗り塗料の塗膜劣化の早期発見に努めると共に、適切な補修または塗増し等を実施する。

飛来物防護ネット等の天面といった通常目視出来ない箇所については、1回/年の外観点検時に足場を立てて直接確認するか又はカメラ等を用いて点検する。また、狭隘部はハンドライトで照らして点検するなどの対応を行う。

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が、紫外線等による経年劣化が発生するため、第 6-1 表に示すサイクルで上塗り塗料の補修塗装(塗増し)をする。また、補修塗装作業に支障となる付属品(防護ネット等)は、作業に影響を与えない様一時的に取外して作業を行う。

なお、補修塗装に合わせて耐火被覆である主材に異常が見られないことを確認する。

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

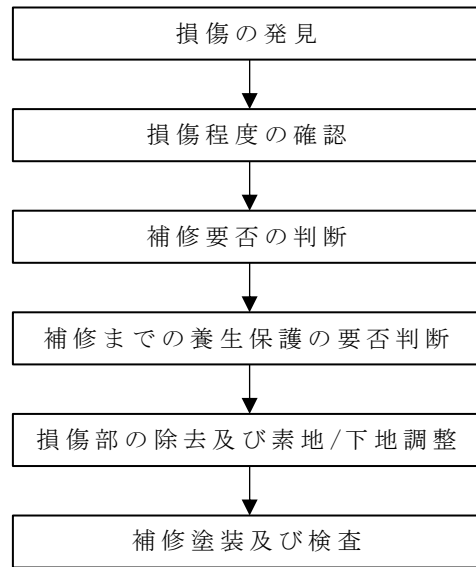
再処理施設は，寒冷地・塩害地域に該当するため，地域特有の劣化が生じる可能性について，耐火塗装の寒冷地・塩害地域での施工実績を確認した。確認の結果，施工後における塗膜劣化の事例は確認できないことから寒冷地と塩害地域特有の影響は生じないと考えられる。よって，寒冷地と塩害地域を限定とした特別な点検は不要と考えられる。

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「5. 点検概要」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。

代表的な損傷の事例とその補修要領について，第 8-1 表に示す。



第 8-1 図 耐火塗装補修作業概略手順

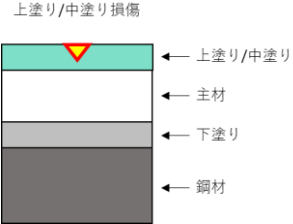
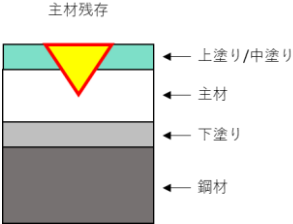
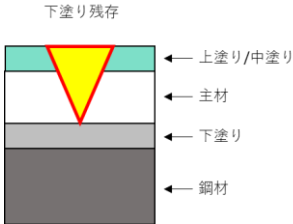
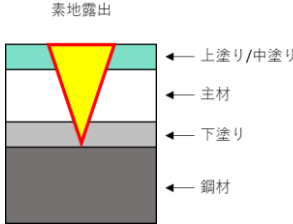


第 8-1 表 損傷事例及び補修要領一覧 (1/2)

	事例-1	事例-2	事例-3	事例-4
損傷事例	<p>上塗り/中塗り損傷</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>	<p>主材残存</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>	<p>下塗り残存</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>	<p>素地露出</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>
損傷範囲	上塗り/中塗りの損傷	主材まで損傷あり (主材残存)	主材まで損傷あり (下塗り露出あり)	主材まで損傷あり (素地露出あり)
補修仕様	<p>補修範囲</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>	<p>補修範囲</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>	<p>補修範囲</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>	<p>補修範囲</p> <p>← 上塗り/中塗り ← 主材 ← 下塗り ← 鋼材</p>
補修までの養生保護	不要	不要	不要	要
損傷部の除去	サンドペーパー等で擦る。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カッターや動力工具等で削り取る。</li> <li>・損傷部の端部から 5mm 程度の幅及び長さの範囲にある塗膜を除去する。</li> <li>・主材に剥がれや浮きがある場合は、損傷を有する深さまで塗膜を削り取りテーパ処理する。</li> </ul>	同左	同左

※ 上塗りは塗装部位毎で指定された色となり異なるが、主材は白色のため上塗りと主材は区別することができる。

第 8-1 表 損傷事例及び補修要領一覧 (2/2)

		事例-1	事例-2	事例-3	事例-4
損傷事例		<p>上塗り/中塗り損傷</p> 	<p>主材残存</p> 	<p>下塗り残存</p> 	<p>素地露出</p> 
素地/下地調整		被塗面(残存塗装表面)をサンドペーパー等で目荒らしして汚れや油分を除去する。	同左	同左	素地露出部は2種ケレン相当
補修塗装	プライマー	—	—	—	要
	下塗り	—	—	—	要
	主材	—	要 (必要に応じ)	要	要
	中塗り	要 (必要に応じ)	要 (必要に応じ)	要	要
	上塗り	要	要	要	要
塗装方法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・スプレー、ハケ、ローラー、ヘラ、コテ等を使用し均一に塗り付ける。</li> <li>・方法は、欠損形状(損傷部除去後の形状)や大きさ、現場の状況や施工性の観点から現地で決定する。</li> <li>・塗装色や塗装方法に応じた塗装基準等は、工場施工時の塗装要領書の記載に従うこと。</li> </ul>			

※ 上塗りは塗装部位毎で指定された色となり異なるが、主材は白色のため上塗りと主材は区別することができる。

令和4年6月9日 R5

別添－9  
対流熱伝達

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	影響の検討	1
3.	結論	6
4.	参考文献	6

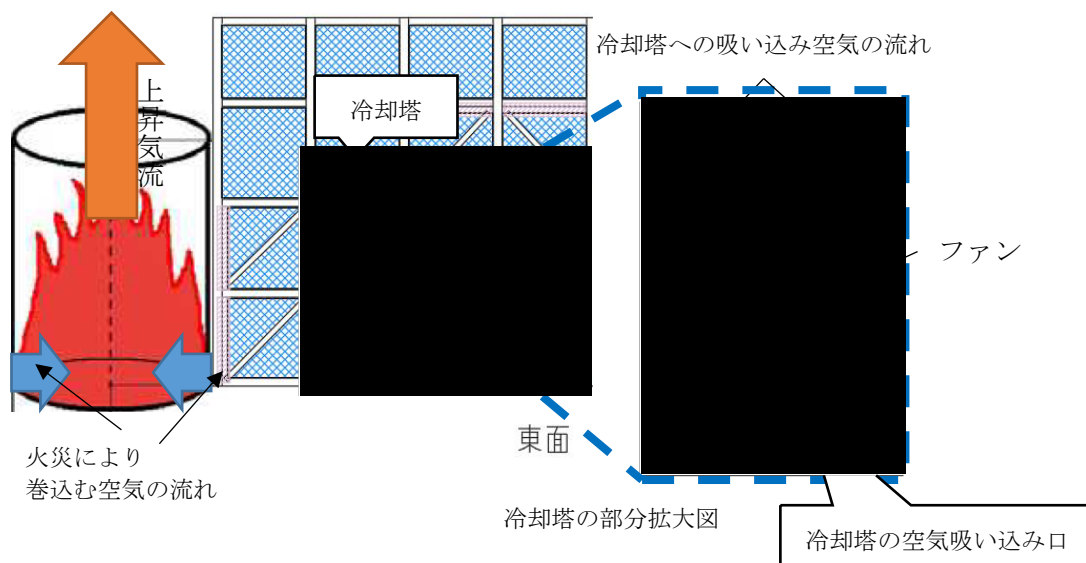
参考1 FDSの計算概要について

参考2 燃料組成の設定について

## 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、冷却塔の空気吸い込み口に流入し、高温空気の対流熱伝達により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。

航空機墜落火災発生時の空気の流れのイメージを第 1-1 図に示す。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が発生する。



第 1-1 図 航空機墜落火災発生時の空気流れ

## 2. 影響の検討

### (1) 解析による影響検討

航空機墜落火災を想定した火炎の周囲の風速と温度の分布について、Fire Dynamics Simulator (以下「FDS」という。)を用いた解析を実施する。FDSは、アメリカ国立標準技術研究所が開発し米国NRCが認証した火災シミュレーションソフトであり、燃焼による熱の発生、火炎の挙動、空気流動等を含む3次元シミュレーションが可能である。FDSによる計算の概要を参考1に示す。

FDSを用いた解析の設定条件を第2-1表に示す。航空機墜落火災の熱影響評価対象航空機はF-16であるが、ここでは同規模の航空機墜落火災による高温空気の影響を確認することを目的とし、過去に実施したF-2の諸元に基づく解析結果を流用する。F-16とF-2の円筒火炎の設定条件のうち異なるのは、燃焼面積、燃料積載量、燃焼継続時間及び燃焼半径である。

燃焼面積、燃料積載量及び燃焼半径については、F-16よりもF-2の方が若干大ではあるものの、ほぼ同等であることから、火災の規模は同等であると考えられる。よって、F-2の設定条件に基づく高温空気の影響と、F-16の高温空気の影響は同等であると考え

られる。

また、燃焼継続時間については、航空機墜落火災は開放空間で発生するものであり、時間経過によって火炎内部の風況や温度分布が変わることはなく、着火後に火炎が安定した状態における火炎柱付近の風速データ及び温度データをもとに影響を検討することから、燃焼継続時間が若干異なるF-2の諸元を用いた解析結果でも、F-16の高温空気による対流熱伝達の影響の傾向を把握することは可能である。

火炎柱付近の風速データを可視化した結果を第2-1図に、火炎柱付近の温度データを可視化した結果を第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高温空気が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、冷却塔に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。航空機墜落火災が竜巻防護対策設備の直近にて発生することを想定したとしても、冷却塔の空気吸い込み口までは3m以上の距離があることから、高温空気が冷却塔に影響を及ぼすことはないと考えられる。

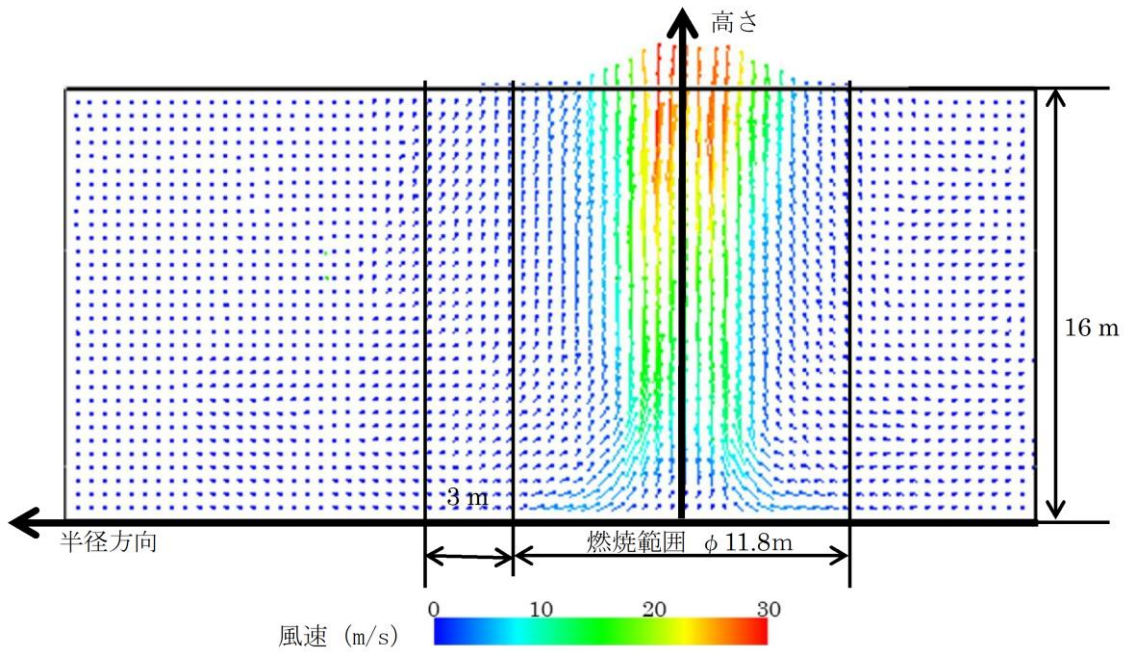
なお、データの取得は、火炎が安定した状態での開放空間での風況及び温度分布であり、燃焼継続時間により風況及び温度分布に大きな違いは生じない。

第2-1表 FDSによる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	約 110	$\text{m}^2$	F-2の燃焼面積に相当する諸元を用いた。F-16の燃焼面積は約 $90\text{m}^2$ 。
燃料積載量	10.4	$\text{m}^3$	F-2の燃焼面積に相当する諸元を用いた。F-16の燃料積載量は $9.8\text{m}^3$ 。
燃焼速度	$8.0 \times 10^{-5}$	$\text{m/s}$	石油コンビナートの防災アセスメント指針 <sup>※1</sup> より引用。
燃焼継続時間	約 1200	s	燃料積載量÷燃料面積÷燃焼速度より算出。F-16の場合の燃焼継続時間は約1400s。
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、ナフサの燃焼パラメータ(最大質量燃焼率、実験定数、燃焼熱、表面放射強度等)の値がデータベースになかったため、燃焼挙動の近いペンタンのデータを使用した。ペンタンのデータで代替することとした検討を参考2に示す。
燃焼半径(円形)	約 5.9	m	外部火災ガイド <sup>※2</sup> に基づき形状を円形とし算出。F-16の場合の燃焼半径は約5.4m。
外部風速	0	$\text{m/s}$	外部火災ガイド <sup>※2</sup> に基づき設定。
外部風向	—	—	外部火災ガイド <sup>※2</sup> に基づき設定。
初期温度	37	°C	外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度(八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年～2018年3月)における日最高気温の極値)である $37.0^\circ\text{C}$ を設定

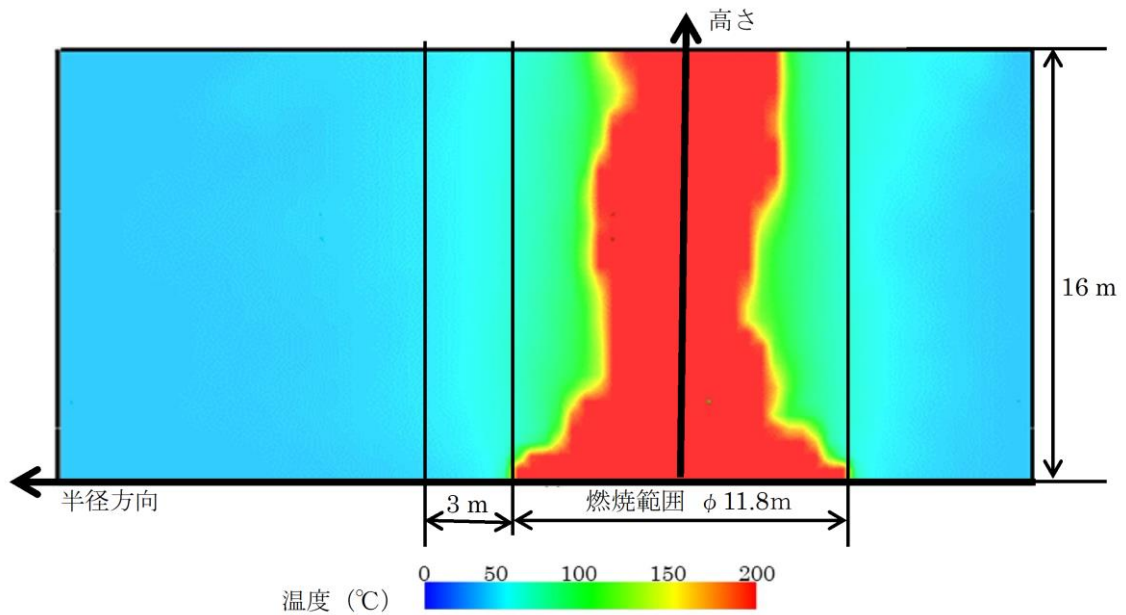
※1：消防庁特殊災害室 石油コンビナートの防災アセスメント指針,平成25年3月

※2：原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成25年6月19日 原子力規制委員会)



第 2-1 図 火炎柱近傍における風速データ※(単位系 : m/s)

※ 火炎の形状は着火から約 10 秒ではぼ安定するが, 100 秒の時点での可視化画像としている。



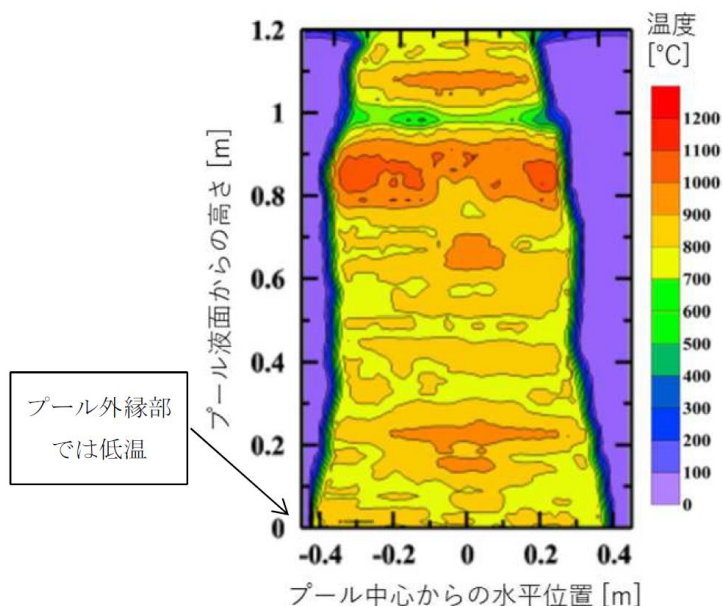
第 2-2 図 火炎柱近傍における温度データ※(単位 : °C)

※ 火炎の形状は着火から約 10 秒ではぼ安定するが, 100 秒の時点での可視化画像としている。



(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<sup>[1]</sup>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。



※ 風速  $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$  の屋外にて、雰囲気温度・燃料初期温度  $33^\circ\text{C}$  の環境下において、金属容器に燃料としてヘプタンを入れて発火させ、プール火災を模擬し、 $50 \text{ mm}$  間隔で配置した熱電対にて温度を測定した試験。

第2-3図 直径1mのヘプタンプール火災試験で測定された温度分布  
(Vinay and Prabhu<sup>[1]</sup> (2018)<sup>\*</sup>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(安全冷却水系冷却塔 B)，再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B(安全冷却水 B 冷却塔)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  $10 \text{ m/s}$  とした。
- 飛来物防護ネット外面における冷却塔への吸い込み風速は  $1 \sim 3 \text{ m/s}$  であるが、安全側に  $3 \text{ m/s}$  とした。
- 冷却塔への空気吸い込み口はファンリング下端の高さであるが、安全側に飛来物防

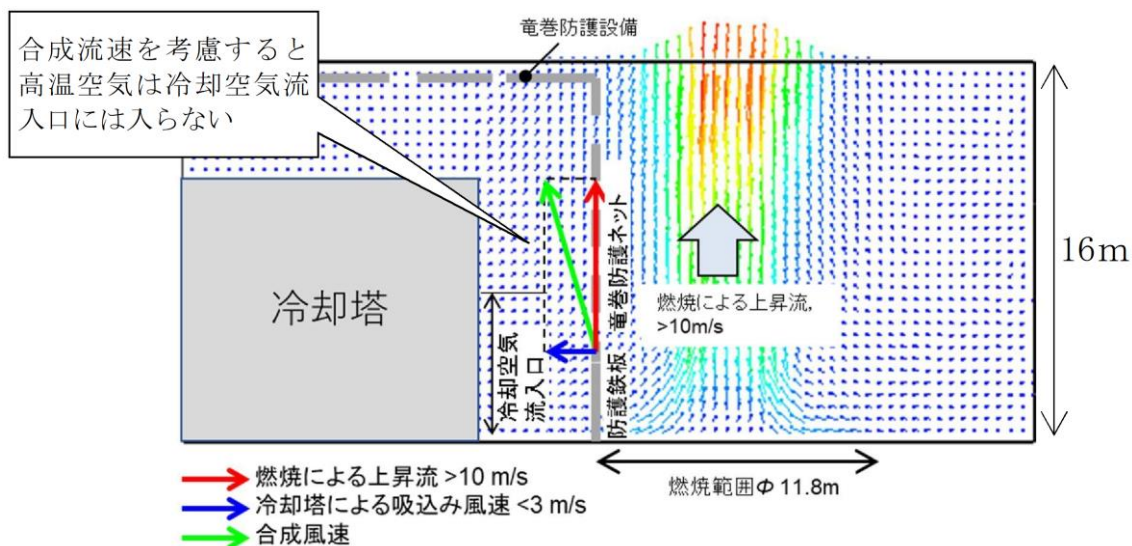
護ネット外面において空気の流入がある下端の高さとした。

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にはないと考えられる(第2-4図及び第2-2表参照)。また、実現象においては、周辺から火炎柱に向かって吸い込まれる空気の流速もあるため、冷却塔に向か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ことから、航空機墜落火災による高温空気が冷却塔に吸い込まれ、冷却塔に影響を及ぼすことはないと考えられる。

第2-2表 冷却塔における高温空気の流入の可能性検討結果

設備	安全冷却水系冷却塔 B	安全冷却水 B 冷却塔
飛来物防護ネット外面から冷却空気吸い込み口までの距離	3m	
冷却塔の空気吸い込み口高さ(ファンリング下端高さ)	6m	
飛来物防護ネット外面の冷却空気流入高さ	3.3m	
飛来物防護ネット外面からの仰角 (a)	42°	
高温空気の流入角度 (b)	73°	
高温空気の流入の有無※	なし	

※ a<b : 流入なし    a>b : 流入あり



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、火炎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

参考1 FDS の計算概要について

- ①コード名： Fire Dynamics Simulator (FDS)
- ②開発機関： National Institute of Standards and Technology, NIST)
- ③開発時期： 2000年(初版リリース)
- ④使用したバージョン： 6.7.1
- ⑤使用目的： プール火災時の温度・流れ場分布の数値解析
- ⑥コードの概要： 燃焼による熱の発生，火炎の挙動，空気流動等を含む3次元シミュレーションを可能とするCFDソフトウェア。
- ⑦検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)：
  - 【検証(Verification)】
    - ・開発機関が発行しているリファレンスガイド verification 編において，多数検証が行われている。
  - 【妥当性確認(Validation)】
    - ・開発機関が発行しているリファレンスガイド validation 編において，実測データに基づく妥当性確認が多数行われている。米国NRCの火災評価ガイド(U.S.Nuclear Regulatory Commission(2011). Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide(NPP FIRE MAG). NUREG-1934.)に取り上げられた実績を有する。

参考2 燃料組成の設定について

本数値解析に用いた Fire Dynamics Simulator (FDS) のライブラリではナフサのデータが用意されていなかった<sup>[1]</sup>。

このため、代替とする燃料を検討し、ペンタンとナフサのプール火災時の燃焼パラメータ (最大質量燃焼率, 実験定数, 燃焼熱, 表面放射強度等) が同じ値との知見<sup>[2]</sup>を得たことから, 本数値解析に用いるナフサの燃焼パラメータとして, ペンタンの燃焼パラメータを設定した。

第1表 プール火災時の燃焼パラメータの設定<sup>[2]</sup>

Fuel	Maximum Mass Burning Rate	Empirical Constant	Heat of Combustion	Surface Emissive Power	Empirical Constant	Carbon to Hydrogen Ratio	Un-obscuration Ratio $U_r$ ( $m^2 \cdot m^{-2}$ )		
	$\dot{m}_{max}$ ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	$k_p$ ( $m^{-1}$ )	$\Delta H_c$ (kJ/kg)	SEPmax ( $kW \cdot m^{-2}$ )	$K_m$ ( $m^{-1}$ )	C/H	D<10m	10m<D<20m	D<20m
Acetone	0.038	2.238	25.800	130	100	0.50	0.02	0.02	0.02
Benzine	0.085	2.700	40.100	130	100	1.00	0.02	0.02	0.02
Butane	0.110	0.852	45.700	225	0.937	0.40	0.23	0.12	0.08
Crude Oil	0.051	1.301	42.600	130	100	0.54	0.05	0.05	0.05
Diesel	0.054	1.301	44.400	130	100	0.53	0.02	0.02	0.02
Ethanol	0.029	100.000	29.700	130	100	0.33	1.00	1.00	1.00
Fuel Oil	0.034	1.67	39.700	130	100	0.61	0.02	0.02	0.02
Gasoline/ Petrol	0.055	1.480	43.700	130	100	0.43	0.02	0.02	0.02
Heptane	0.081	1.394	44.600	200	100	0.438	0.23	0.12	0.08
Hexane	0.075	1.394	44.700	200	100	0.429	0.23	0.12	0.08
Hydrogen/ Liquified	0.161	6.741		70	7.415	0.00	1.00	1.00	1.00
GP4	0.056	1.962	43.500	130	100	0.46	0.02	0.02	0.02
GP5/ Kerosene	0.063	1.269	43.000	130	100	0.45	0.02	0.02	0.02
LNG	0.141	0.136		265	0.149	0.25	0.77	0.69	0.55
LPG	0.181	0.500		250	0.55	0.375	0.55	0.23	0.16
Methanol	0.020	100.000	20.000	70	100	0.25	1.00	1.00	1.00
<b>Naphtha/ Pentane</b>	<b>0.095</b>	<b>100.000</b>		<b>200</b>	<b>100</b>	<b>0.417</b>	<b>0.23</b>	<b>0.12</b>	<b>0.08</b>
Octane	0.081	1.394		200	100	0.444	0.23	0.12	0.08
Toluene	0.066	3.370		130	100	0.875	0.02	0.02	0.02
Xylene	0.090	1.400	40.800	130	100	0.80	0.02	0.02	0.02

[1]Kevin B. McGrattan et al. “Fire Dynamics Simulator User’s Guide” NIST Special Publication 1019, sixth edition, revision FDS6.6.0-129-g951268a (2017).

[2]C.Goula, C.Malkotsi “Numerical simulation of pool hydrocarbon fires and their effect on adjacent tanks”, Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Greece (2017).

令和4年6月9日 R3

別添-10  
熱心力評価

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	熱応力評価	1
2.1	支持構造物本体の影響評価	1
2.2	<u>支持構造物を構成する部材</u> の影響評価	6
3.	結論	11

## 1. はじめに

冷却塔及び竜巻防護ネットの支持構造物を構成する部材には、耐火被覆を施工する部材と施工しない部材があり、航空機墜落地点に応じて輻射を受熱する部材と受熱しない部材が生じる。そのため、支持構造物内で温度差が発生することから、本資料では、支持構造物内での温度差による熱影響として熱応力について検討する。温度差により発生する熱応力は、変位制御型の二次応力に分類される。二次応力は、自己拘束によって発生する応力であり、部材が降伏又はひずみを生じた場合、それ以上の応力の増加は起こらないことから、熱応力によって支持架構が破損することはないため、本評価は、熱応力により生じる支持架構への影響について確認することを目的とする。

## 2. 熱応力評価

輻射による熱影響の検討においては、耐火被覆を施工する部材と施工しない部材の境界で温度差が生じる支持構造物本体に対する影響評価と、輻射を受ける面と受けない面で温度差が生じる支持構造物を構成する部材に対する影響評価を実施する。

### 2.1 支持構造物本体の影響評価

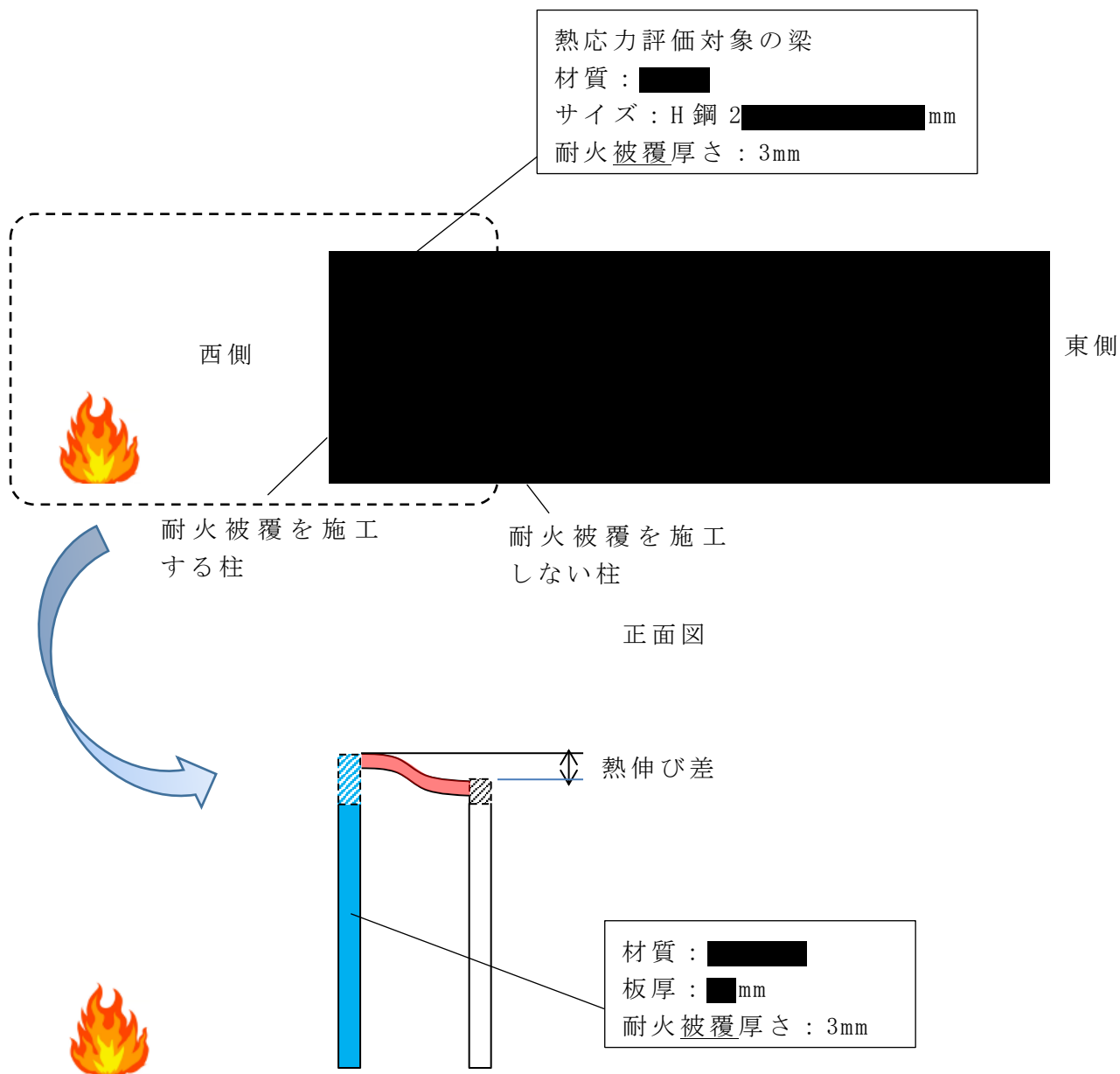
支持構造物本体に対する熱影響について検討する。本検討においては、火災により輻射を受けた部材の伸びを、接続する梁材等により、拘束されたことにより生じる応力に対し、構造健全性が維持できていることを確認する。

#### (1) 評価対象について

本評価は、支持構造物の主柱の間隔が短く、入熱量の差が大きい方が、梁による拘束力が大きくなり、主柱の熱伸びを拘束することとなるため、保守的な評価となる。竜巻防護対策設備は、直近に航空機墜落火災を想定することから、主柱と主柱を結ぶ梁材も耐火塗装の対象となり、それぞれの入熱量の違いは比較的小さいものとなる。一方、冷却塔は構成部材の離隔距離に応じて耐火被覆の有無及び入熱量の違いが生じることから、冷却塔を評価対象とする。

冷却塔を構成する部材のうち、評価対象とする部位は、熱伸び量が最も大きくなる部位を対象とし、その熱応力評価結果が許容値を満足することをもって、支持構造物本体の構造健全性に影響がないと評価する。評価モデルを第 2-1 図に示す。



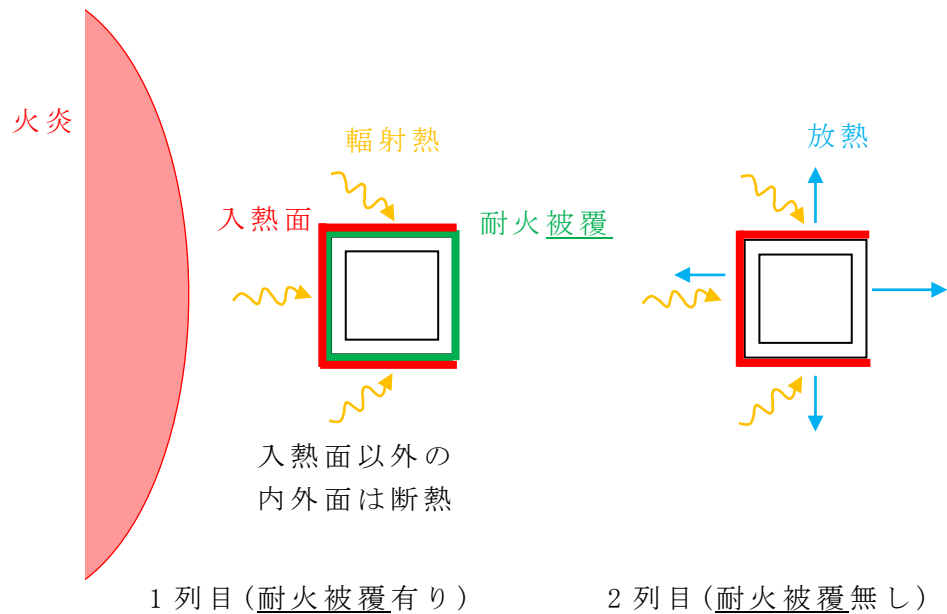


第 2-1 図 支持構造物本体の評価モデル

(2) 評価方法について

a. 部材の温度評価

熱伸び量を算出するため、評価対象の温度評価を実施する。温度上昇における評価モデルを第 2-2 図に示す。なお、1 列目は耐火被覆により入熱面以外は断熱条件で評価した。



第 2-2 図 部材の温度評価モデル

柱の温度を次式により計算する。

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = Q$$

上式を陽解法により時間刻み  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると次式となる。

$$T(t+\Delta t) = T(t) + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot V}$$

b. 熱応力評価

温度上昇による熱伸びを下式より算出する。

$$\delta = \alpha \times H \times \Delta T$$

熱伸びを拘束することにより生じる熱応力を下式より算出する。

$$\sigma = \frac{6 \times E \times I \times \delta}{L^2 \times Z}$$

(3) 評価条件について

部材の温度評価条件を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表 評価条件

記号	単位	定義	数値
T(t=0)	°C	評価点の初期温度 (外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度 (八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年~2018年3月)における日最高気温の極値)である 37.0°Cを設定)	37
t	sec	燃焼時間	1,400
Δt	sec	時間刻み	0.001
Q	$\frac{W}{m^2}$	熱の授受量(輻射入熱)	1 列目 : 14,262 <sup>※1</sup> 2 列目 : 7,998 <sup>※2</sup>
ρ	kg/m <sup>3</sup>	評価点の部材の密度	7,850 <sup>※3</sup>
c <sub>p</sub>	J/kg/K	評価点の部材の比熱	465 <sup>※3</sup>
V	m <sup>3</sup>	評価点の部材の体積	0.016 <sup>※4</sup>

※1 : (輻射発散度 58,000[W/m<sup>2</sup>]×形態係数 0.239+太陽輻射 400[W/m<sup>2</sup>])×単位面積。これに耐火被覆の熱抵抗を考慮し、鋼材への入熱を与える。

※2 : (輻射発散度 58,000[W/m<sup>2</sup>]×形態係数 0.131+太陽輻射 400[W/m<sup>2</sup>])×単位面積。これに放熱を考慮し、鋼材への入熱を与える。

※3 : 伝熱工学資料改訂第 5 版 p.284 機械構造用炭素鋼 S35c (at 300K)

※4 : 鋼材厚み ■mm×単位面積。

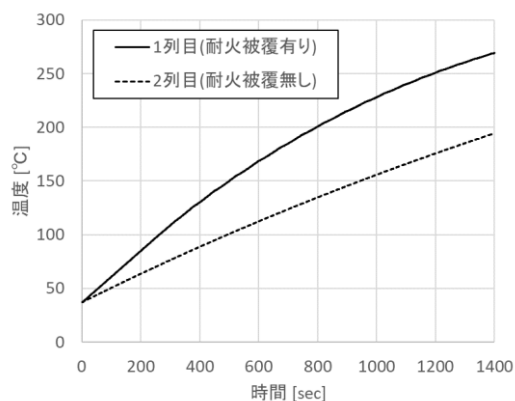
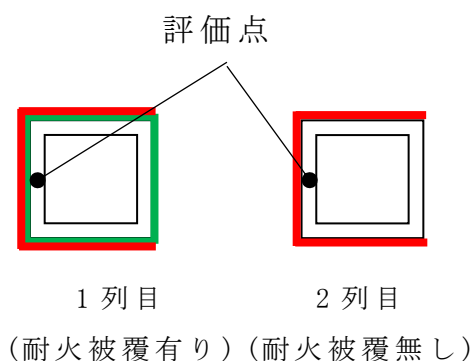
熱応力評価条件を第 2-2 表に示す。

第 2-2 表 熱応力評価条件

記号	単位	定義	数値
δ	mm	熱伸び差	10.9
α	1/K	線膨張係数	1.34×10 <sup>-5</sup> ※1
H	m	柱の高さ	10.75
E	MPa	弾性係数	205,000※2
I	mm <sup>4</sup>	梁の断面二次モーメント	4.72×10 <sup>7</sup>
L	m	梁の長さ	6.58
Z	mm <sup>3</sup>	梁の断面係数	4.72×10 <sup>5</sup>

※1 : 発電用原子力設備企画 材料規格(日本機械学会)

※2 : 鋼構造設計基準(日本建築学会)



第 2-3 図 部材の温度評価結果

熱応力評価結果を第 2-4 表に示す。発生する熱応力は許容値を満足するものであり、構造健全性に影響はない。

第 2-4 表 熱応力評価結果

発生応力 (MPa)	許容値 (MPa)
31	245

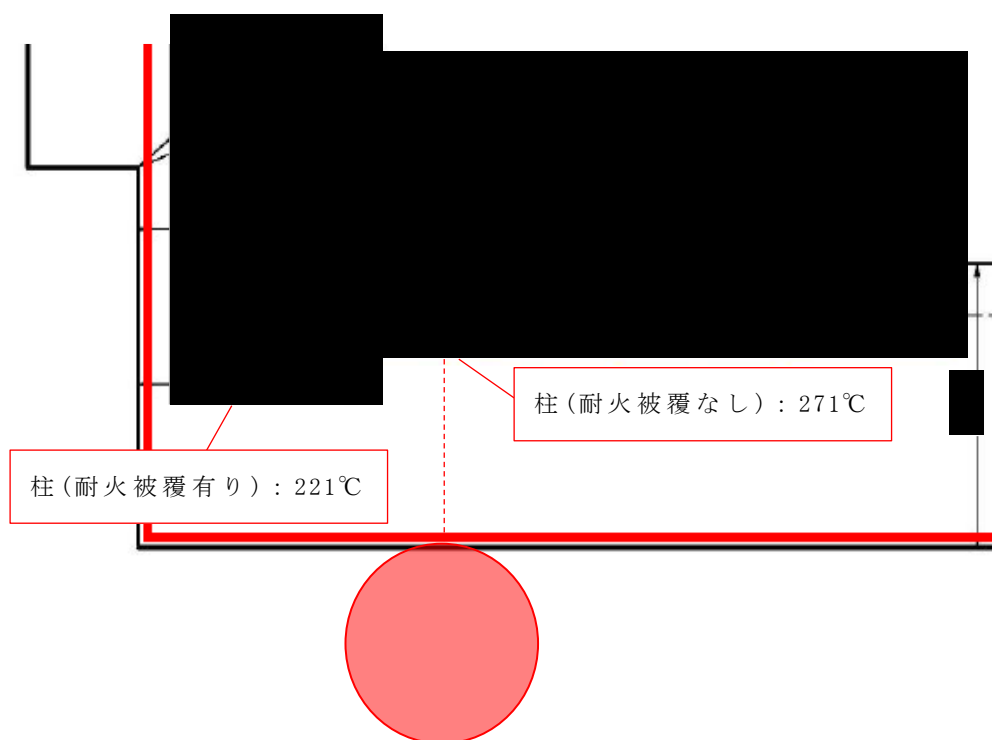
(5) 耐火被覆の有無による柱の温度上昇について

耐火被覆の有無による柱の温度上昇について、耐火被覆が施工されていない 2 列目の柱の方が、耐火被覆の施工されている 1 列目より温度が高くなるケースが無いか確認した。

安全冷却水 B 冷却塔以外の冷却塔も含めて確認し、火炎から見て 1 列目に耐火被覆有りの柱、2 列目に耐火被覆なしの柱が位置する場合は、2 列目の耐火被覆なしの柱の温度が 1 列目の耐火被覆有りの柱より高くなるケースは確認されなかった。

これは耐火被覆有りの柱の方が温度は上がり難いが火炎に近いこと、耐火被覆なしの柱は火炎から 1m 離れるごとに温度が 20°C 前後下がること、及び耐火被覆有無の柱間の距離は約 1m あることから、火炎から見て 1 列目に耐火被覆有りの柱、2 列目に耐火被覆なしの柱が位置する場合は耐火被覆有りの柱の方が温度は高くなると考えられる。

また、火炎から見て 1 列目に耐火被覆の有りの柱となしの柱が横並びしている場合の熱応力評価も実施(発生応力は約 21MPa)し、上記の結果に包絡されることを確認した。評価モデルを第 2-4 図に示す。



第 2-4 図 評価モデル

## 2.2 支持構造物を構成する部材の影響評価

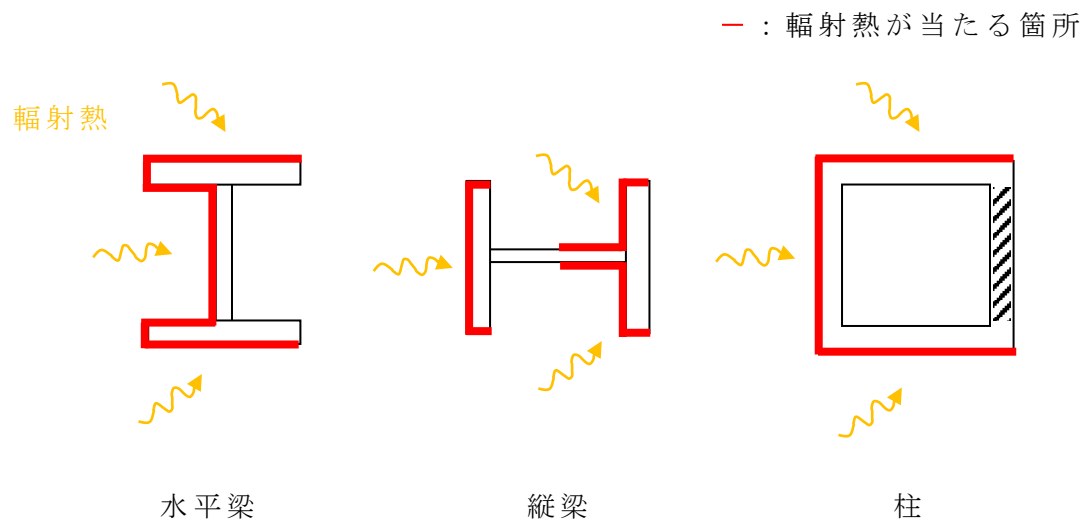
火炎からの輻射を受熱する部材に対する熱影響について検討する。本検討においては、火炎から受ける輻射を受ける面と受けない面で生じる温度差による影響について検討する。火炎に近い方が輻射の有無による温度差が大きいため、竜巻防護対策設備の支持架構を対象に評価を行う。

### (1) 評価対象について

支持架構を構成する代表的な部材には、梁(H鋼)、柱(角型鋼管)がある。そのため、どの部材を評価モデルに設定することが保守的な評価となるか検討する。

部材の評価モデルを第 2-5 図に示す。

H鋼は、全体的に輻射を受けるのに対し、角型鋼管は、火炎の反対面は輻射を受けず、鋼材の熱伝導による温度上昇しか見込めず、温度差が大きいと考えられることから、角型鋼管を評価対象とする。

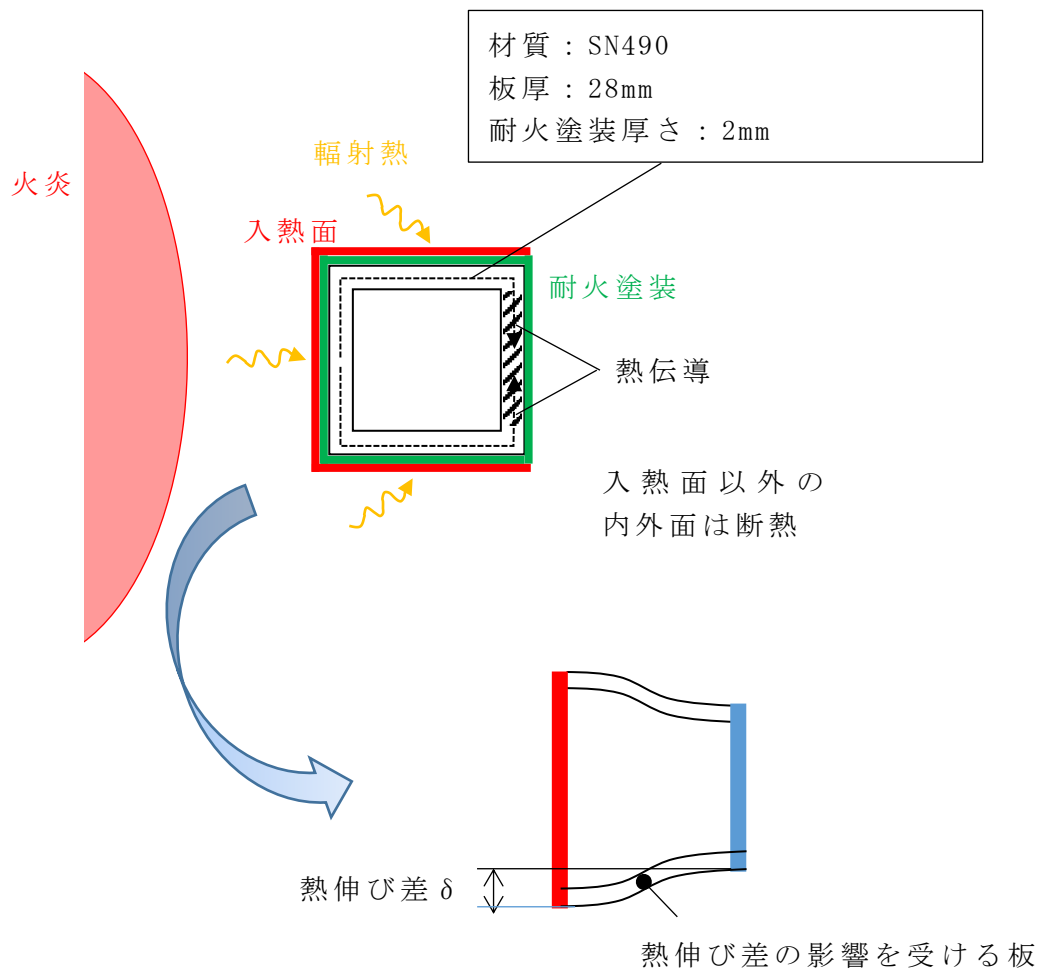


第 2-5 図 部材の評価モデル

(2) 評価方法について

a. 部材の温度評価

熱伸び量を算出するため、評価対象の温度評価を実施する。温度上昇における評価モデルを第 2-6 図に示す。



第 2-6 図 部材の温度評価モデル

部材の温度を次式により計算する。

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = Q$$

上式を陽解法により時間刻み  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると次式となる。

$$T(t+\Delta t) = T(t) + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot V}$$

b. 熱応力評価

温度上昇による熱伸びを下式より算出する。

$$\delta = \alpha \times H \times \Delta T$$

熱伸びを拘束することにより生じる熱応力を下式より算出する。

$$\sigma = \frac{6 \times E \times I \times \delta}{L^2 \times Z}$$

(3) 評価条件について

部材の温度評価条件を第 2-5 表に示す。

第 2-5 表 部材の温度評価条件

記号	単位	定義	数値
T(t=0)	°C	評価点の初期温度 (外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度 (八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年～2018年3月)における日最高気温の極値)である 37.0°Cを設定)	37
t	sec	燃焼継続時間	1,400
Δt	sec	時間刻み	0.001
Q	W	熱の授受量(輻射入熱)	正面 : 574 <sup>*1</sup> 側面 : 133 <sup>*2</sup>
ρ	kg/m <sup>3</sup>	評価点の部材の密度	7,850 <sup>*3</sup>
c <sub>p</sub>	J/kg/K	評価点の部材の比熱	465 <sup>*3</sup>
V	m <sup>3</sup>	評価点の部材の体積	7 × 10 <sup>-4</sup> <sup>*4</sup>

※1 : (輻射発散度 58,000 [W/m<sup>2</sup>] × 形態係数 0.389 + 太陽輻射 400 [W/m<sup>2</sup>]) × 区分面積 (= 周方向区分長さ 25mm × 軸方向単位長さ)。これに耐火被覆の熱抵抗を考慮し、鋼材への入熱を与える。

※2 : (輻射発散度 58,000 [W/m<sup>2</sup>] × 形態係数 0.085 + 太陽輻射 400 [W/m<sup>2</sup>]) × 区分面積 (= 周方向区分長さ 25mm × 軸方向単位長さ)。これに塗装の熱抵抗を考慮し、鋼材への入熱を与える。

※3 : 伝熱工学資料改訂第 5 版 p.284 機械構造用炭素鋼 S35C (at 300K)

※4 : 鋼材厚み 28mm × 周方向区分長さ 25mm × 軸方向単位長さ。

熱応力評価条件を第 2-6 表に示す。



第 2-6 表 熱応力評価条件

記号	単位	定義	数値
$\delta$	mm	熱伸び差	0.60
$\alpha$	1/K	線膨張係数	$1.34 \times 10^{-5} \text{※}^1$
H	mm	角型鋼管のサイズ÷2	250
E	MPa	弾性係数	$205,000 \text{※}^2$
I	mm <sup>4</sup>	板の断面二次モーメント	1,829
L	mm	板の長さ	500
Z	mm <sup>3</sup>	板の断面係数	130

※1：発電用原子力設備企画 材料規格（日本機械学会）

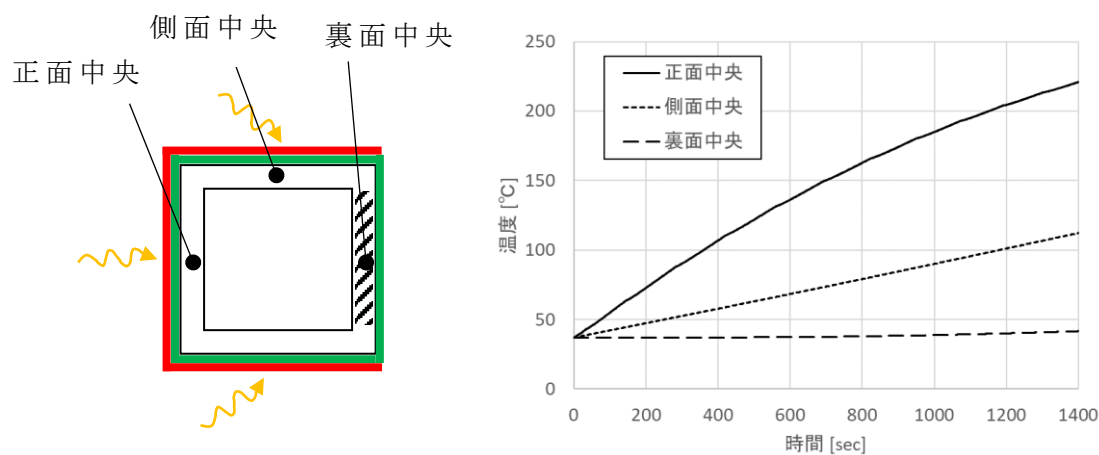
※2：鋼構造設計基準

(4) 評価結果について

角型鋼管の 1400 秒後の各面の温度評価結果を第 2-7 表、第 2-7 図に示す。

第 2-7 表 部材の温度上昇結果

	温度 [°C]
正面	221
裏面	42



第 2-7 図 温度評価結果

部材の熱応力評価結果を第 2-8 表に示す。発生する熱応力は許容値を満足するものであり、構造健全性に影響はない。

第 2-8 表 部材の熱応力評価結果

発生応力 (MPa)	許容値 (MPa)
42	325

### 3. 結論

評価結果から支持架構の構造体としても、部材としても、発生応力は許容値内であり、航空機墜落火災による輻射を受けた場合の温度差を考慮しても、支持架構の構造健全性を維持できていることを確認した。

# 別紙



令和 4 年 6 月 9 日 R4

別紙 - 1

燃料加工建屋の評価書

## 目 次

1. 概要	1
2. 評価対象部位	1
3. 評価方法	1
4. 許容温度	2
5. 評価条件	2
6. 評価結果	3
6.1 外壁温度評価結果	3
6.2 建屋内に収納する外部火災防護対象施設への影響	4
6.3 許容温度を超える領域がある場合の建屋及び建屋外壁への影響	4
6.3.1 建屋外壁への要求機能の確認結果	5
6.3.2 建屋全体の支持機能について	7
7. 参考文献	8

### 1. 概要

航空機墜落火災に対する燃料加工建屋への熱影響について、補足説明資料本文中の「4.1 航空機墜落火災の影響を考慮する部位」及び「5.1 評価方針」に基づき、建屋外壁温度及び建屋外壁の内部温度を評価した結果を示す。また、建屋内部に収納する外部火災防護対象施設への影響を確認した結果及び建屋外壁で許容温度を超えた領域で想定される損傷の状態及び建屋外壁が有する機能への影響を確認した結果を示す。

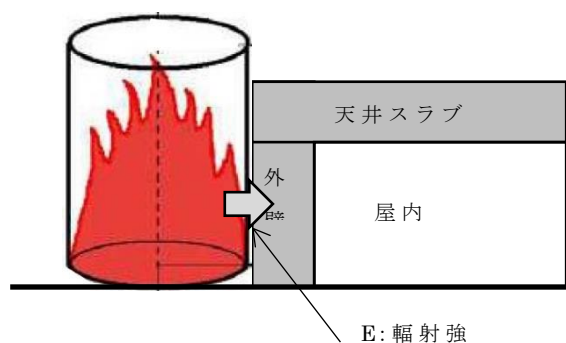
### 2. 評価対象部位

補足説明資料本文中の「4.1 航空機墜落火災の影響を考慮する部位」に基づき外部火災防護対象施設を収納する建屋の建屋外壁とする。

### 3. 評価方法

建屋に対する航空機墜落火災の評価については、建屋外壁の直近で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、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(輻射強度)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 3-1 図に示す。

第 3-1 図の計算モデルを用いた熱影響評価により、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及び建屋外壁が要求される機能を損なわないことを評価する。



第 3-1 図 建屋の計算モデル

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<sup>(2)</sup>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)

$t$  : 燃焼継続時間(s)

$T_0$  : 初期温度(°C)

$E$  : 輻射強度(W/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 温度伝導率(m<sup>2</sup>/s) ( $\alpha=\lambda/\rho/c$ )

$\lambda$  : コンクリート熱伝導率(W/m/K)

$\rho$  : コンクリート密度(kg/m<sup>3</sup>)

$c$  : コンクリート比熱(J/kg/K)

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

#### 4. 許容温度

補足説明資料本文中の「5.2 評価条件の設定」に基づき、外壁の許容温度として、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。建屋外壁で許容温度を超えた領域については、コンクリートの強度低下を想定する。

#### 5. 評価条件

燃料加工建屋外壁に対する熱影響評価の評価条件を第 5-1 表に示す。

第 5-1 表 燃料加工建屋の外壁を対象とした熱影響評価の評価条件

項目	記号	数値	単位
初期温度	$T_0$	50 *1	°C
燃焼継続時間	$t$	1400	s
輻射強度	$E$	30 *2	kW/m <sup>2</sup>
コンクリート熱伝導率	$\lambda$	1.74 (1)	W/m/K
コンクリート密度	$\rho$	2150 *3	kg/m <sup>3</sup>
コンクリート比熱	$c$	963 (1)	J/kg/K

注記 \*1: 外壁の評価における初期温度は、評価が厳しくなるように、屋内最高温度及び外気温度を踏まえ設定。

\*2: 太陽光の入射を考慮し、0.4kW/m<sup>2</sup>を加算。

\*3: 遮蔽設計の最小値

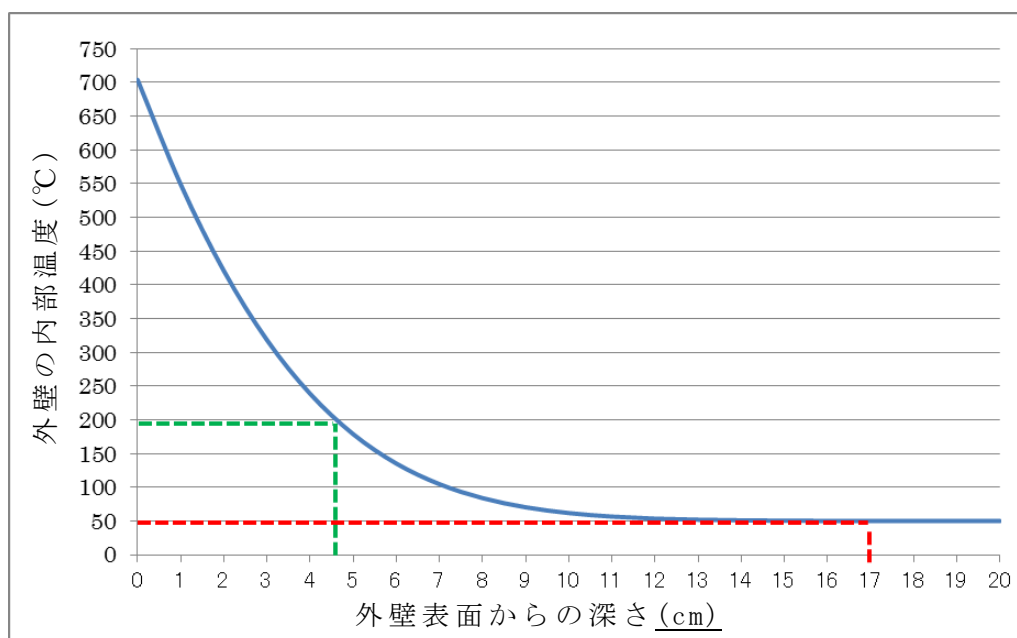


## 6. 評価結果

本別紙「3. 評価方法」及び「5. 評価条件」に基づき、本別紙「6.1 外壁温度評価結果」に示すとおり建屋外壁温度及び建屋外壁の内部温度を評価した。また、温度評価結果を踏まえて、建屋内部に収納する外部火災防護対象施設への影響を確認した結果を本別紙「6.2 建屋内に収納する外部火災防護対象施設への影響」に示す。さらに、建屋外壁で許容温度を超えた領域で想定される損傷の状態及び建屋外壁が有する機能への影響を確認した結果を本別紙「6.3 許容温度を超える領域がある場合の建屋及び建屋外壁への影響」に示す。

### 6.1 外壁温度評価結果

評価対象航空機である F-16 の墜落による火災に対して燃料加工建屋の外壁の熱影響評価の結果を第 6-1 図に示す。



第 6-1 図 燃料加工建屋外壁を対象とした熱影響評価結果

## 6.2 建屋内に収納する外部火災防護対象施設への影響

第 6-1 図に示す通り、外壁表面より約 17cm で初期温度 (50℃) 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 130cm 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。

## 6.3 許容温度を超える領域がある場合の建屋及び建屋外壁への影響

第 6-1 図に示す通り、内部温度は外壁表面から深さ約 5cm までの領域においてはコンクリートの許容温度 200℃<sup>(3)</sup> 以上となる。このため、文献<sup>(4)</sup>及び文献<sup>(5)</sup>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 5cm 未満までのコンクリート強度低下が想定される。

一方、鉄筋は受熱温度が 500～600℃ 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<sup>(4)</sup>であるとされており、鉄筋位置は外壁表面から 5cm 以上内側 (設計かぶり厚さ：外壁 6cm, 屋根 5cm) にあることから、鉄筋に影響を及ぼすことはない。

また、外壁に設けられた扉部等の開口部について、開口面積の大きいものは、堅固な壁等による迷路構造により開口内部を直接見込めない構造となっているため、火災による輻射が直接建屋内に及ばない。その他の比較的開口面積が小さい扉はコンクリート製フードが設置されており、火災による輻射が直接建屋内へ及ぶことはない。

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以下の通り確認する。

### 6.3.1 建屋外壁への要求機能の確認結果

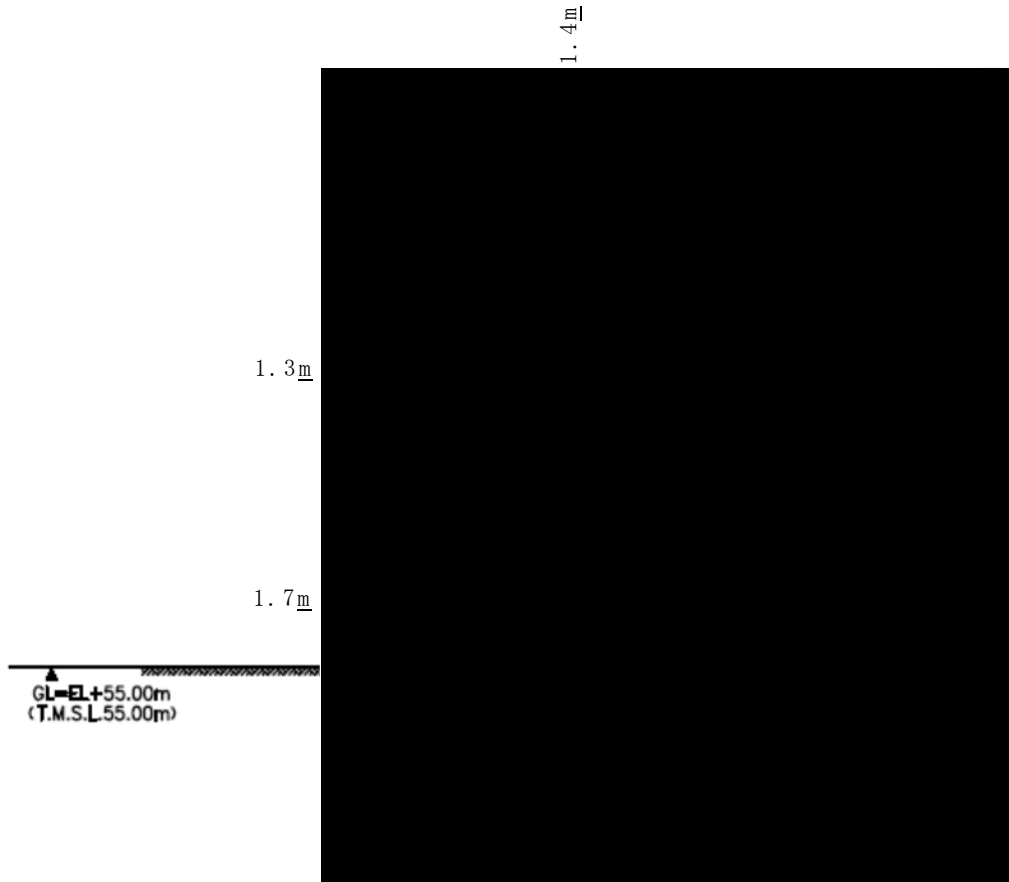
上記 6.3 の結果を踏まえ、燃料加工建屋外壁に要求される機能と想定される損傷を考慮した影響評価を実施した結果は第 6-1 表に示すとおりであり、燃料加工建屋外壁が要求される機能を損なわない。

第 6-1 表 燃料加工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	損傷した部分(外壁表面から 5cm)が存在しないものとして壁厚を評価しても必要遮蔽厚 150cm*1 が確保できること*2、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。

注記 \*1：事業許可(変更許可)において平常時における MOX 燃料加工施設からの直接線及びスカイシャイン線による公衆の線量を求める際の遮蔽条件として、燃料集合体貯蔵設備を取り囲むコンクリート壁等を考慮した設定値

\*2：燃料集合体貯蔵設備とその周辺の建屋外壁厚さを第 6-2 図に示す。燃料集合体は地下 1 階に貯蔵し、その外壁厚さは 170cm となる。また、地上階以上の外壁厚さは 130cm であるが、建屋内のスラブ、壁又は遮蔽蓋の厚さを合計すると必要遮蔽厚を確保できる構造となっている。



第 6-2 図 集合体貯蔵エリア周辺の壁厚

### 6.3.2 建屋全体の支持機能について

熱影響評価の結果を踏まえ、建屋外壁に想定される損傷を考慮した場合においても、燃料加工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。

<確認方法>

- ・ 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  $\sigma(W/A')$ 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。

$$\alpha = f_c / \sigma \geq 1$$

<評価条件>

- ・ 損傷範囲は長辺方向の外壁一面の深さ 5cmとする。
- ・ 許容圧縮応力度  $f_c$  は「建築基準法施行令第 91 条」を参考に下式より 10N/mm<sup>2</sup>とする。

$$f_c = F/3$$

ただし、 $F$ ：設計基準強度（普通コンクリート設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>）(6)

上記の内容に基づき実施した評価結果を第 6-2 表に示す。

第 6-2 表 燃料加工建屋の損傷後の軸応力評価結果

要素 番号	地上高さ T. M. S. L.	支持重量	軸断面積		軸 応力度	許容 応力度	断面 裕度
		W	A	A'	$\sigma$	$f_c$	$\alpha$
	m	kN	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	$1 < \alpha$
1	70.2～77.5	174000	420.5	416.1	0.42	10	23.8
2	62.8～70.2	503000	760.0	755.6	0.67	10	14.9
3	56.8～62.8	888000	957.1	952.7	0.93	10	10.8
4	50.3～56.8	1317000	1208.1	1203.7	1.09	10	9.2

以上より、燃料加工建屋全体の支持機能が損なわれないことを確認した。

## 7. 参考文献

- (1) 日本建築学会 原子炉建屋構造設計指針 同解説. 1988.
- (2) 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第4版 1986.
- (3) 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.
- (4) 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. 2015.
- (5) 日本建築学会. 構造材料の耐火性ガイドブック
- (6) 建築工事標準仕様書 同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事 (2013 改定)

令和 4 年 6 月 9 日 R4

別紙－2

安全冷却水 B 冷却塔の評価書

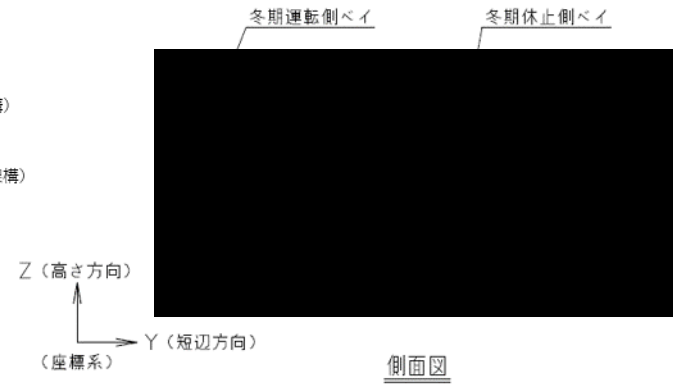
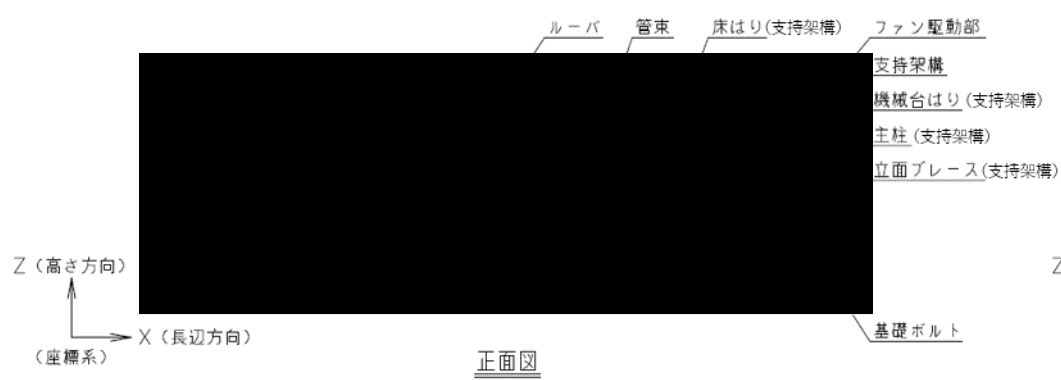
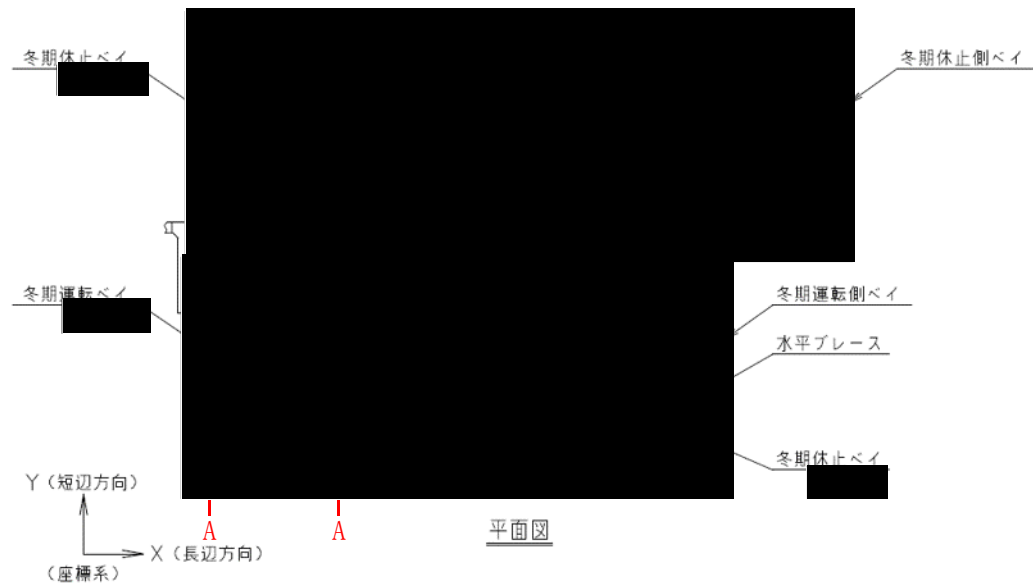
## 目 次

1.	概要	1
2.	評価対象機器の選定について	1
2.1	冷却能力の維持に必要な機器の選定	4
2.2	評価対象部位の選定	4
3.	遮熱板	10
3.1	遮熱板の構造図	10
4.	評価方法について	11
4.1	冷却水の評価方法	11
4.2	管束・配管及びファン駆動部の評価方法	13
4.2.1	チューブサポート(管束・配管)の評価方法	13
4.2.2	ファンブレードの評価方法	14
4.2.3	減速機の評価方法	17
4.2.4	原動機の評価方法	20
4.2.5	その他の部材の評価方法	22
4.3	支持構造物の評価方法	23
5.	許容温度	23
5.1	冷却水の許容温度	23
5.2	冷却機能に必要な部位の許容温度	23
6.	評価条件	24
6.1	冷却水の評価条件	24
6.2	ファン駆動部, 管束・配管の評価条件	24
6.3	支持構造物の評価条件	27
7.	評価結果	28
7.1	冷却水の評価結果	28
7.2	冷却機能に必要な部位の評価結果	28
7.2.1	チューブサポートの評価結果	28
7.2.2	ファンブレードの評価結果	28
7.2.3	減速機の評価結果	29
7.2.4	原動機の評価結果	29
7.2.5	その他の部位の評価結果	30
7.3	支持構造物の評価結果	31

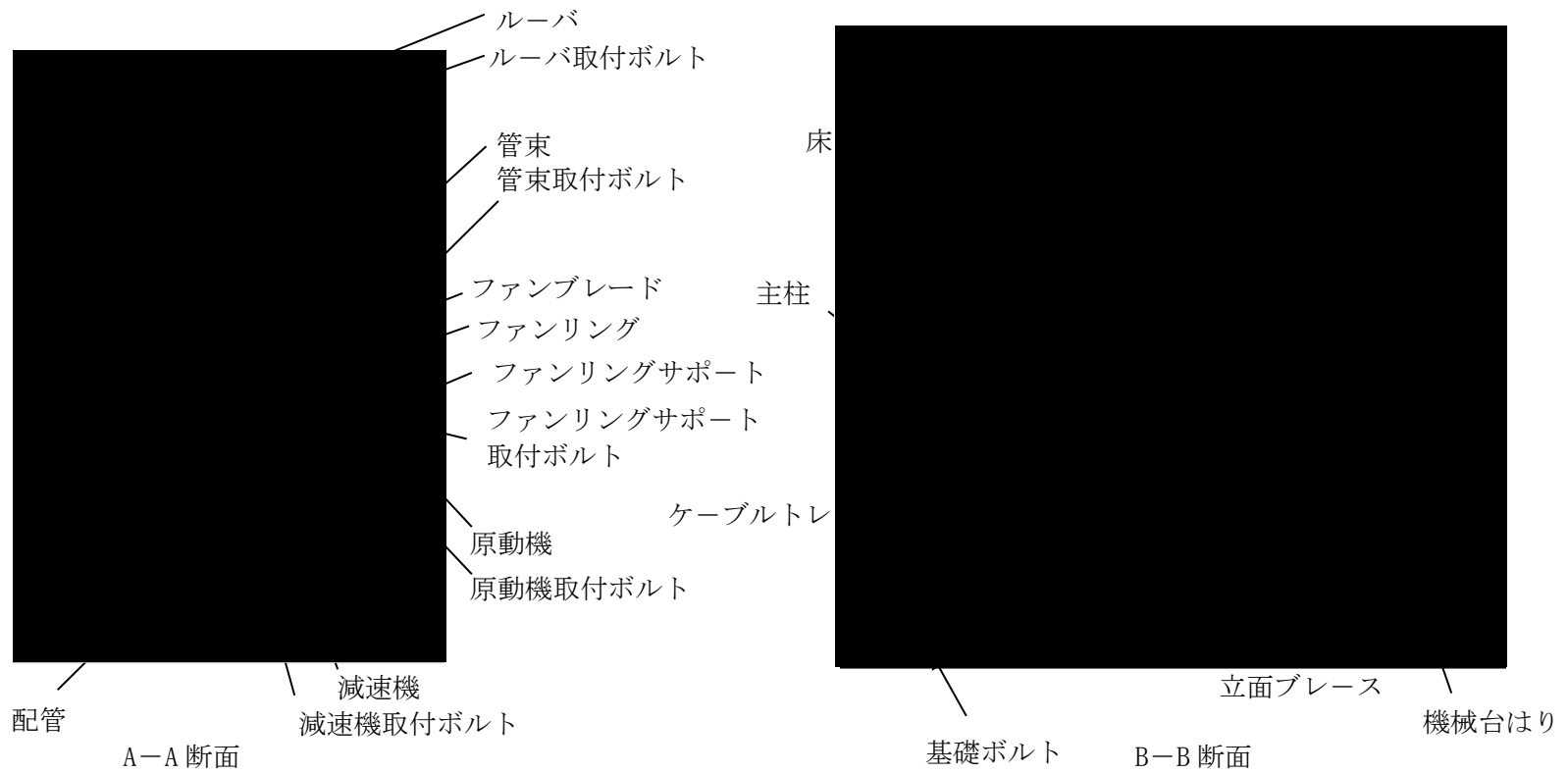
参考 その他の悪影響を及ぼし得る部位











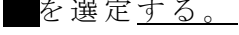
第2-1図 安全冷却水 B 冷却塔 概要図



第 2-2 図 安全冷却水 B 冷却塔 断面概要図

## 2.1 冷却能力の維持に必要な機器の選定

冷却塔の冷却能力を維持するため、  
冷却水を評価対象として選定する。

また、冷却塔の安全機能を維持するために、必要となる機器として、  
  
  
を選定する。

## 2.2 評価対象部位の選定

第 2-1 表にて選定された機器に対し、航空機墜落火災の影響を考慮する部位を選定する。

### (1) 冷却水

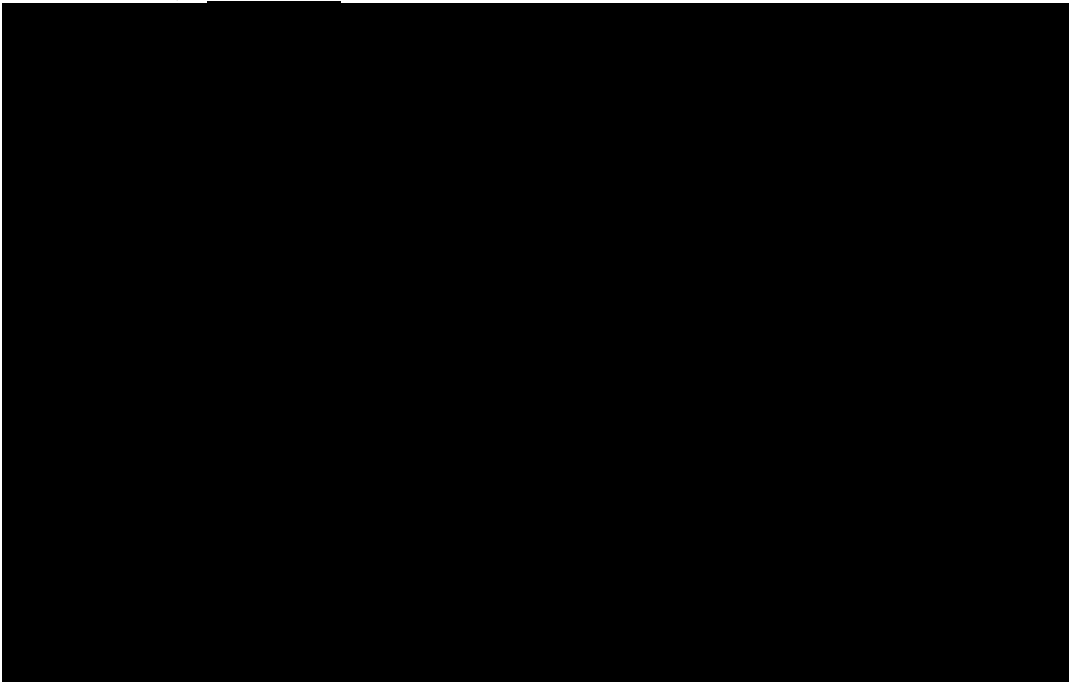
冷却水を評価対象とする。

補足説明資料 外外火 04「航空機墜落による火災の防護設計について」の 4.3(2)「冷却塔の冷却能力」に基づいた設計を実施する。

### (2) 管束・配管

管束構造図を第 2-3 図に示す。また、管束の評価対象部位の選定理由を第 2-2 表に示す。

補足説明資料 外外火 04「航空機墜落による火災の防護設計について」の 4.3(2)「冷却塔の冷却能力」に基づいた設計を実施することとし、耐火被覆の施工を前提とする。



第 2-3 図 管束構造図

第 2-2 表 管束及び配管の評価対象部位の選定

部位	機能	選定結果	選定理由
伝熱管		—	伝熱管は評価対象外とする。
チューブサポート		○	評価対象とする。
管束フレーム		○	評価対象とする。
ヘッダー		—	ヘッダーは評価対象外とする。
配管		—	配管は評価対象外とする。
管束取付けボルト *1	—	○	評価対象とする。

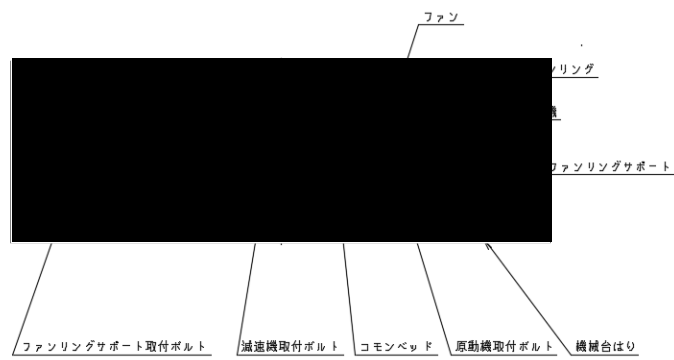
<凡例> ○：選定対象部位，—：選定対象外

注記 \*1：

(3) ファン駆動部

ファン駆動部構造図を第 2-4 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 2-3 表に示す。

補足説明資料 外外火 04「航空機墜落による火災の防護設計について」の 4.3(2)「冷却塔の冷却能力」に基づいた設計を実施することとし、耐火被覆又は遮熱板の施工を前提とする。



第 2-4 図 ファン駆動部構造図

第 2-3 表 ファン駆動部の評価対象部位の選定

部位	機能	選定結果	選定理由
ファンリング		○	評価対象とする。
ファンブレード		○	評価対象とする。
減速機		○	評価対象とする。
原動機		○	評価対象とする。
ファンリングサポーター		○	評価対象とする。
ボルト類*1	—	○	評価対象とする。
コモンベッド		○	評価対象とする。
ケーブル		—	評価対象外とする。
ケーブルトレイ	—	○	評価対象とする。

<凡例> ○：選定対象部位，—：選定対象外

注記 \*1：

(4) 支持架構

により構成されている。

評価対象とする。

補足説明資料 外外火 04「航空機墜落による火災の防護設計について」の 4.3(3)「支持構造物」に基づいた設計を実施することとし、耐火被覆の施工を前提とする。

(5) まとめ

安全冷却水 B 冷却塔の評価対象の評価内容及び防護設計を第 2-4 表に示す。



第2-4表 安全冷却水 B冷却塔 評価対象の評価内容及び防護設計

機器	部位	評価内容・防護設計	温度評価
冷却水	(配管の内部流体)		○
管束・配管	チューブサポート		○
	管束フレーム		×
	ボルト類		×
ファン駆動部	ファンリング		×
	ファンブレード		○
	減速機		○
	原動機		○
	ファンリングサポート		×
	ボルト類		×
	コモンベッド		×
	ケーブルトレイ		×
支持架構	主柱		○
	床はり		○
	機械台はり		○
	立面ブレース		○
	水平ブレース		○
	基礎ボルト		○

<凡例>○：温度評価により確認，×：耐火試験，他の評価への包絡性，又は必要離隔距離との比較により確認

### 3. 遮熱板

#### 3.1 遮熱板の構造図

遮熱板の構造の概要図を第 3-1 図，遮熱板の仕様を第 3-1 表に示す。



遮熱板は，基準地震動及び設計竜巻による風荷重に対し強度評価を行い，問題ないことを確認する。



第 3-1 図 遮熱板の構造概要図※

第 3-1 表 遮熱板の仕様

材質	炭素鋼
板厚	6mm
耐火被覆	厚さ 3mm

#### 4. 評価方法について

前項 2.2(5)において整理した対象について、許容温度以下となることを確認するための温度評価の方法を評価対象毎に示す。

##### 4.1 冷却水の評価方法

冷却水の評価方法を以下に示す。

###### (1) 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外部火災ガイドを参考として(1)式から算出する。

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

ここで、

R : 燃焼半径 (m)

S : 燃焼面積 (m<sup>2</sup>)

###### (2) 形態係数の算出

以下の条件において外部火災ガイドを参考として(2)式から形態係数を算出する。計算モデルの概略を第 4-1 図に示す。

- ・ 受熱面の姿勢は、鉛直とする。
- ・ 冷却塔本体による遮熱は考慮しない。
- ・ 冷却塔については、第 4-1 図のとおり、南北中心位置で東西に向かって入口配管、出口配管を平行するように敷設している、火炎に近い配管の位置を代表距離とする。冷却水配管は東西方向へ約 35m 敷設しており、形態係数の算出ではベイ配置に合わせて 5 分割し、分割した配管の中央位置までの離隔からそれぞれ形態係数を算出する。算出した各形態係数の平均値を温度評価に用いる。

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

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

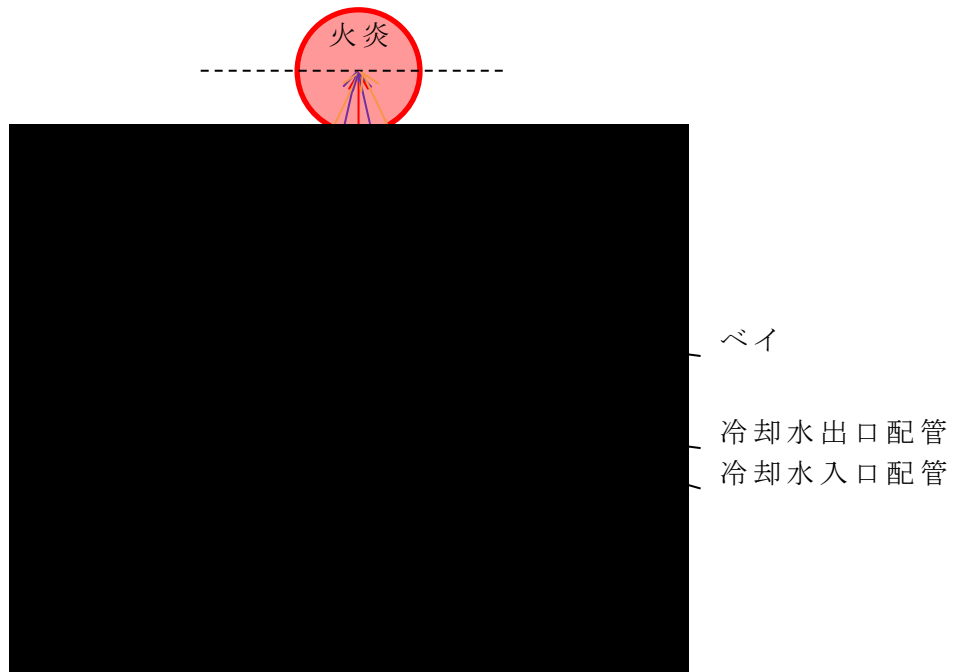
ここで、

$\emptyset$  : 形態係数

L : 離隔距離 (m)

H : 火炎の高さ (m)

R : 燃焼半径 (m)



第 4-1 図 形態係数を求める母管位置

(3) 輻射強度の算出

(2)で求めた形態係数を用いて外部火災ガイドを参考として(3)式より輻射強度を算出する。なお、輻射強度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る。

$$E = R_f \cdot \varnothing + E_s \cdots (3)$$

ここで、

$E$  : 輻射強度 ( $W/m^2$ )

$R_f$  : 輻射発散度 ( $W/m^2$ )

$\varnothing$  : 形態係数

$E_s$  : 太陽の影響による輻射強度 ( $W/m^2$ )

(4) 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の温度上昇を以下の(4)式(伝熱工学資料改訂第5版, p.40, 式(131))により算出する。

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

ここで、

$\Delta T$  : 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 ( $W/m^2$ )

$A$  : 配管の受熱面積 ( $m^2$ )

$G$  : 冷却水流量 ( $m^3/s$ )

$\rho$  : 冷却水密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $c_p$  : 冷却水比熱 (J/kg/K)

#### 4.2 管束・配管及びファン駆動部の評価

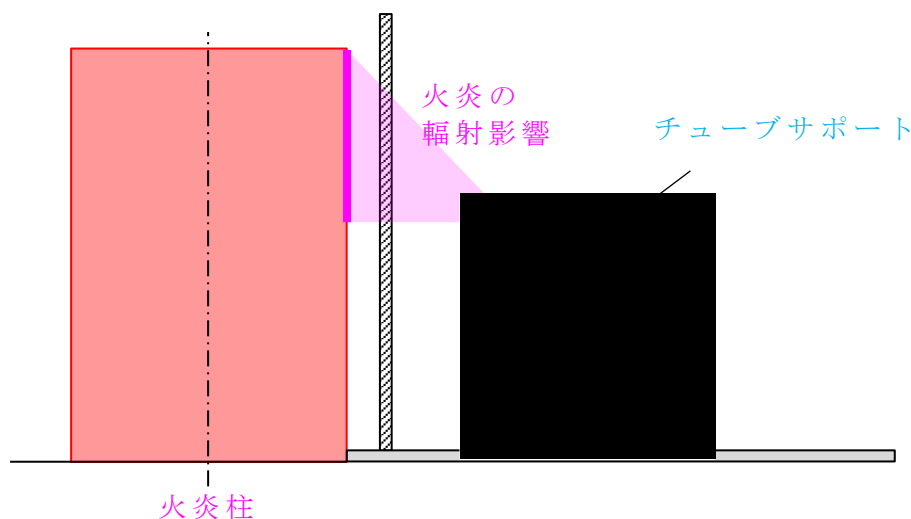
##### 4.2.1 チューブサポート(管束・配管)の評価方法

###### (1) 燃焼半径の算出

「4.1(1)燃焼半径の算出」の(1)式と同様に算出する。

###### (2) 形態係数の算出

チューブサポートの形態係数においては、外部火災ガイドと同様の円筒火炎(火炎柱)を想定し、上方からの火炎の輻射熱を考慮する。チューブサポートが受ける輻射影響の概略を第4-2図に示す。



第4-2図 チューブサポートが受ける輻射影響

###### a. 火炎輻射熱

火炎柱から水平受熱面の形態係数は(5)式にて算出する。

$$\varnothing = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \frac{n+1}{n-1} - \frac{n^2-1+m^2}{\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \frac{A(n-1)}{B(n+1)} \right] \right\} \dots (5)$$

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、

$\varnothing$  : 形態係数

L : 離隔距離 (m)

H : 火炎の高さ (m)

R : 燃焼半径 (m)

※ : (C. J. H. van den Bosch, R. A. P. M Weterings, Methods for the calculation of physical effects より)

### (3) 温度評価

上面の入熱と上下面の放熱がつり合う保守的な定常状態を考え、チューブサポートの温度を次式(伝熱工学資料改訂第5版, p.23, 式(1))により算出する。

$$T = T_a + \frac{R_f \cdot \emptyset + E_s}{2 \cdot h}$$

T : チューブサポートの温度(°C)

T<sub>a</sub> : 雰囲気温度(°C)

R<sub>f</sub> : 輻射発散度(W/m<sup>2</sup>)

∅ : 形態係数

E<sub>s</sub> : 太陽の影響による輻射強度(W/m<sup>2</sup>)

h : 熱伝達率(W/m<sup>2</sup>/K)

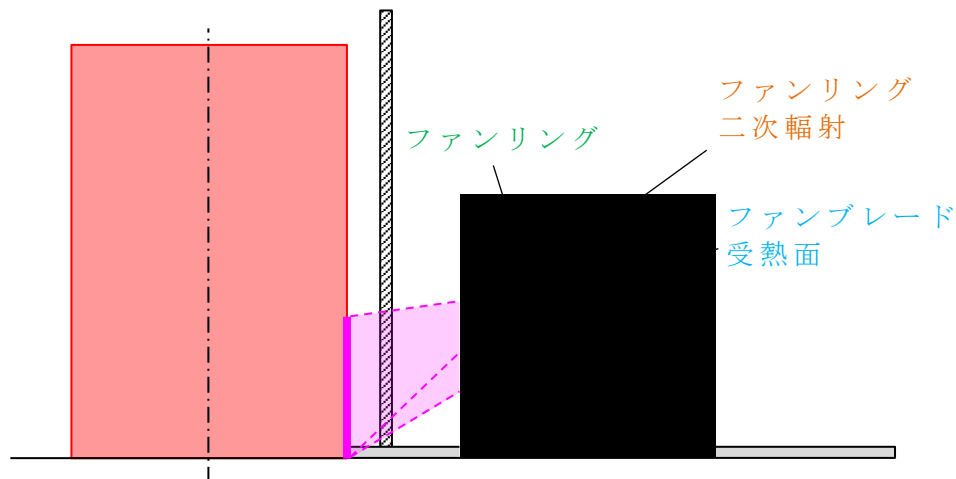
#### 4.2.2 ファンブレードの評価方法

##### (1) 燃焼半径の算出

「4.1 冷却水の評価方針 (1)燃焼半径の算出」と同様に算出する。

##### (2) 形態係数の算出

ファンブレードが受ける輻射影響の概略を第4-3図に示す。ファンブレードの周囲には耐火被覆を施工したファンリングがあり、その遮熱効果によりファンブレードは火炎の輻射熱を下方から受ける。また、火炎の輻射によって温度が上昇するファンリングからの二次輻射をファンブレードの上下面に受ける。



第4-3図 ファンブレードが受ける輻射影響

a. 火炎輻射熱

ファンブレードの受熱面も水平であるから、4.2.1 (2) a. 火炎輻射熱の(5)式を用いて形態係数を算出する。

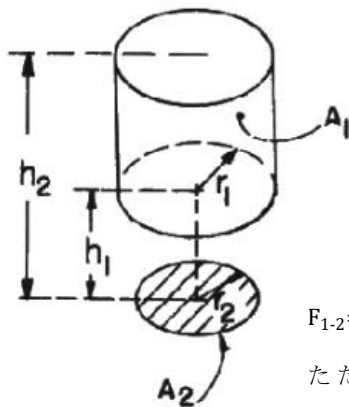
b. ファンリング二次輻射

ファンリングの温度上昇は火炎側だけで生じるが、本評価では保守的に全周からの二次輻射を考慮するものとする。この場合、第4-4図に示す円筒内面と円盤面の計算モデルにおいて、円筒をファンリング、円盤をファンブレードと考え、形態係数を算出する。

(3) 温度評価

評価モデルを第4-5図に示す。評価モデルの考え方を以下に示す。

- ・ファンブレードの材質の[ ]は熱伝導率が小さいことから、ファンブレードの厚み方向の熱伝導を考慮し、一次元非定常熱伝導計算により燃焼継続時間 1,400 秒後の温度評価を行う。なお、断面積は単位面積当たりとして考える。
- ・火炎及びファンリングの輻射熱，周囲への放熱をファンブレードの上・下面にそれぞれ境界条件として与える。
- ・輻射熱で考慮するファンリングの内面温度については，保守的に鋼材の許容温度である 325℃で一定とする。
- ・ファンブレードは静止しているものとし，放熱には一般的な外表面の熱伝達率を使用する。



- $h_1$  : 円筒下面と円盤の距離 (m)  
(本評価では  $h_1 = 0$ )
- $h_2$  : 円筒上面と円盤の距離 (m)
- $r_1$  : 円筒内半径 (m)
- $r_2$  : 円盤半径 (m)
- $A_1$  : 円筒内面積 ( $m^2$ )
- $A_2$  : 円盤面積 ( $m^2$ )

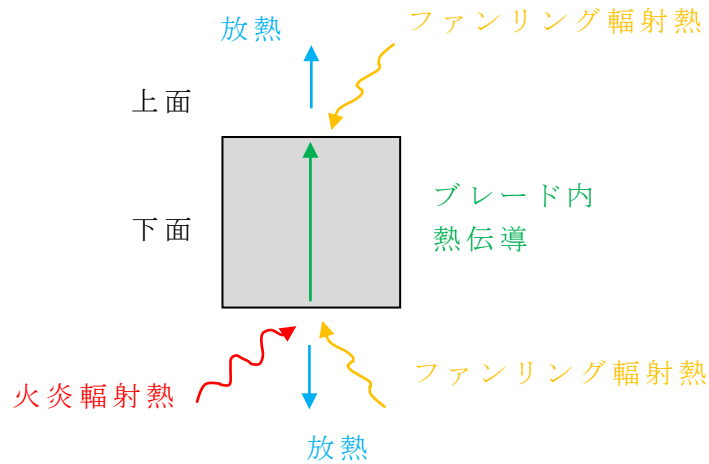
$$F_{1-2} = \frac{1}{4R(H_2 - H_1)} \left[ (X_1 - X_2) - (X_1^2 - 4R^2)^{1/2} + (X_2^2 - 4R^2)^{1/2} \right]$$

ただし、 $R = r_1/r_2$ 、 $H_1 = h_1/r_2$ 、 $H_2 = h_2/r_2$ 、 $X_{\xi} = H_{\xi}^2 + R^2 + 1$

円盤(ブレード)を基準とする形態係数は次式である。

第4-4図 円筒内面と円盤面の形態係数

(John R. Howell, A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors, 3rd Edition より)



第 4-5 図 ファンブレードの温度評価モデル

ファンブレードの評価点の温度は次式（伝熱工学資料改訂第 5 版, p. 2)により計算する。

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = Q$$

上式を陽解法により時間刻み  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると次式となる。

$$T(t+\Delta t) = T(t) + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot V}$$

T : 評価点の温度 (°C)

t : 時間 (s)

$\Delta t$  : 時間刻み (s)

Q : 熱の授受量 (輻射入熱, 放熱, 熱伝導) (W)

$\rho$  : 評価点の部材の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  : 評価点の部材の比熱 ( $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ )

V : 評価点の部材の体積 ( $\text{m}^3$ )



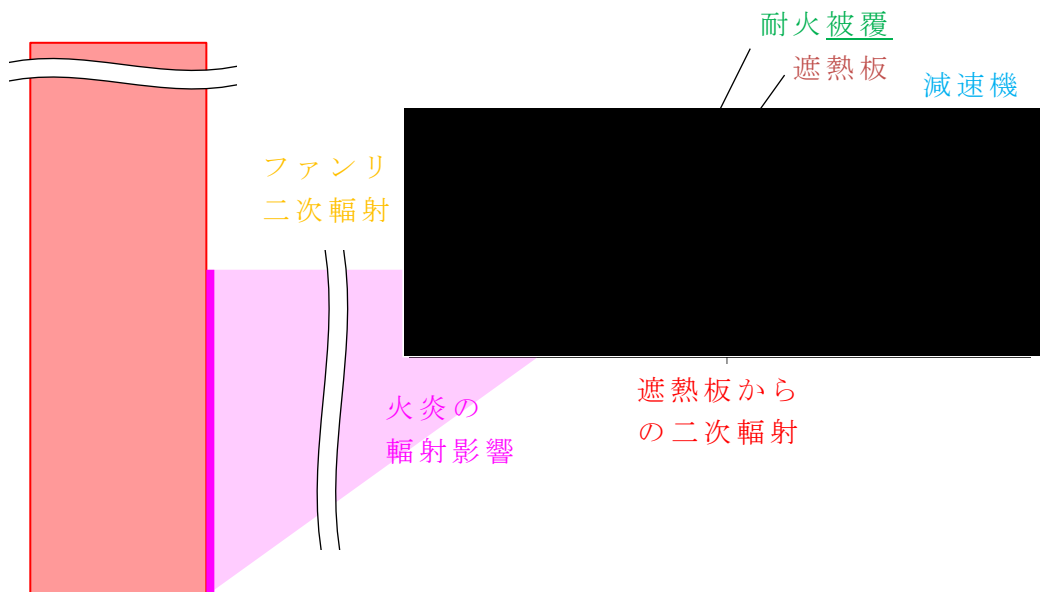
#### 4.2.3 減速機の評価方法

##### (1) 燃焼半径の算出

「4.1(1)燃焼半径の算出」と同様に算出する。

##### (2) 形態係数の算出

減速機の形態係数算出においては，遮熱板からの間接的な熱影響を考慮することとし，減速機が受ける輻射影響の概略を第4-6図に示す。



第4-6図 減速機が受ける輻射影響

それぞれの輻射熱について，以下のとおり形態係数を算出する。

##### a. 火炎輻射熱

「4.1(2)形態係数の算出」の(2)式と同様に算出する。

##### b. ファンリングからの二次輻射

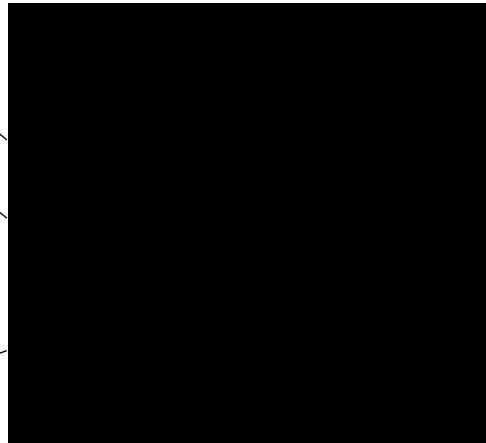
ファンリングの温度上昇は火炎側だけで生じるが，本評価では保守的に全周からの二次輻射を考慮するものとする。さらに，第4-7図に示すように，減速機周囲の遮熱板について，遮熱板の外側にあるファンリングとの距離が近くなるよう円筒型として仮定し，第4-8図に示す二重円筒の計算モデルを参照する。この場合，外筒をファンリング，内筒を遮熱板と考える。

##### c. 遮熱板－減速機

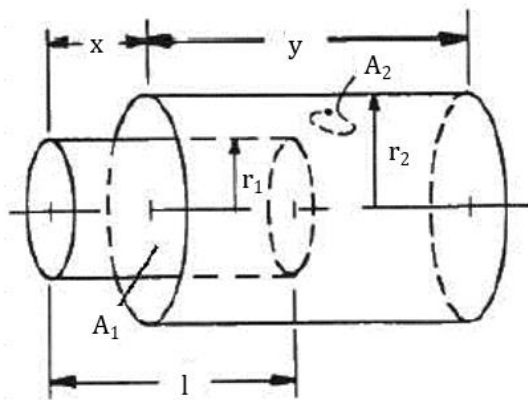
入熱が大きくなるよう形態係数は1とする。

遮熱板(西)  
 形態係数算出時  
 に仮定する遮熱  
 板(円筒型)

減速機



第 4-7 図 減速機・遮熱板 平面図



$A_1$ : 内筒の外表面積 (m<sup>2</sup>)  
 $A_2$ : 外筒の内表面積 (m<sup>2</sup>)  
 $l$ : 内筒の高さ (m)  
 $r_1$ : 内筒の外半径 (m)  
 $r_2$ : 外筒の内半径 (m)  
 $x$ : 内筒の突出し高さ (m)  
 $y$ : 外筒の高さ (m)

$$X=x/r_2 \quad Y=y/r_2 \quad L=l/r_2 \quad R=r_1/r_2$$

$$A_\xi = \xi^2 + R^2 - 1 \quad B_\xi = \xi^2 - R^2 + 1$$

$$F_\xi = \frac{B_\xi}{8R\xi} + \frac{1}{2\pi} \left\{ \cos^{-1} \frac{A_\xi}{B_\xi} - \frac{1}{2\xi} \left[ \frac{(A_\xi+2)^2}{R^2} - 4 \right]^{1/2} \cos^{-1} \frac{A_\xi R}{B_\xi} - \frac{A_\xi}{2\xi R} \sin^{-1} R \right\}$$

$$F_{1-2} = \frac{X}{L} \cdot F_X + \frac{L-X}{L} \cdot (1-F_{L-X}) + \frac{Y+X-L}{L} \cdot F_{Y+X-L} - \frac{X+Y}{L} \cdot F_{X+Y}$$

第 4-8 図 二重円筒の形態係数

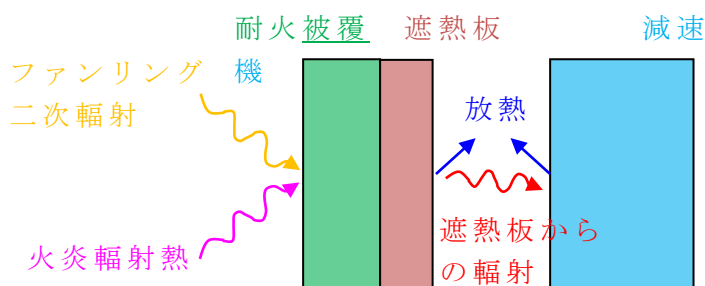
(John R. Howell, A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors, 3rd Edition より)

### (3) 温度評価

減速機の温度評価モデルの概略図を第 4-9 図に示す。本評価では、耐火被覆、遮熱板、減速機のそれぞれに設定した評価点で熱の授受を考え、温度評価を行う。ファンリングについては、保守的に鋼材の許容温度である 325℃まで上昇したものとして評価する。

西側配置の火炎を考える場合、減速機への入熱は西面が最も大き

く、南北及び上下面はそれよりも小さいと考えられるが、本評価では、保守的に減速機の全周囲に対して西面の遮熱板を介した入熱条件を設定するものとする。放熱についても減速機の全周囲に設定する。また、ファンブレードの回転による対流がない条件(停止中)を設定する。



第 4-9 図 減速機の温度評価モデル

それぞれの評価点の温度は次式(伝熱工学資料改訂第 5 版, p. 2)により計算する。

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = Q$$

上式を陽解法により時間刻み  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると次式となる。

$$T(t+\Delta t) = T(t) + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot V}$$

T : 評価点の温度 (°C)

t : 時間 (s)

$\Delta t$  : 時間刻み (s)

Q : 熱の授受量(輻射入熱, 放熱, 熱伝導) (W)

$\rho$  : 評価点の部材の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  : 評価点の部材の比熱 ( $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$ )

V : 評価点の部材の体積 ( $\text{m}^3$ )

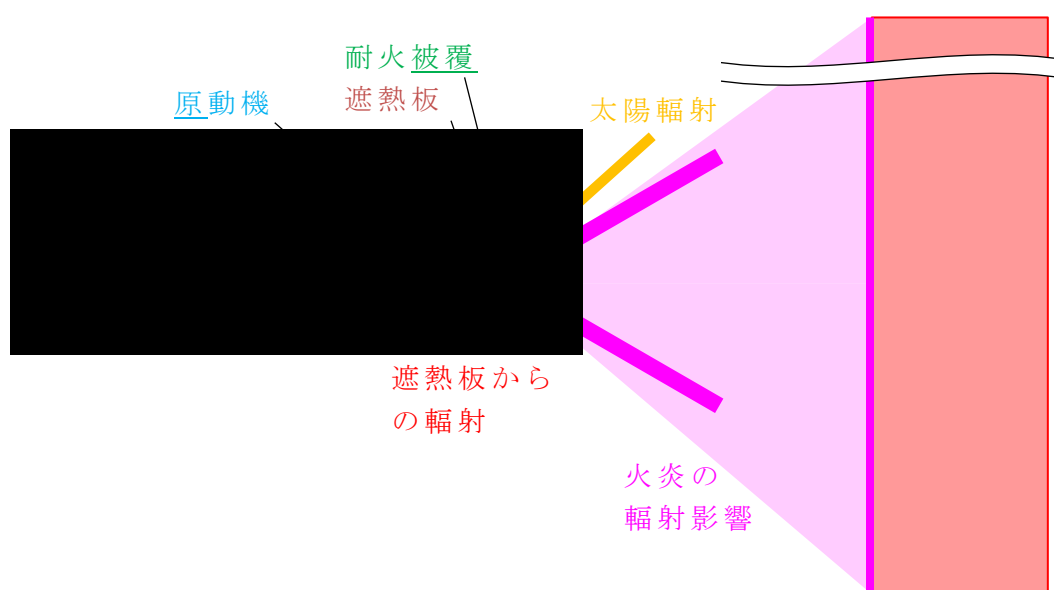
#### 4.2.4 原動機の評価方法

##### (1) 燃焼半径の算出

「4.1(1)燃焼半径の算出」の(1)式と同様に算出する。

##### (2) 形態係数の算出

原動機の形態係数算出においては，遮熱板からの間接的な熱影響を考慮することとし，原動機が受ける輻射影響の概略を第 4-10 図に示す。



第 4-10 図 原動機が受ける輻射影響

##### a. 火炎輻射熱

「4.1(2)形態係数の算出」の(2)式と同様に算出する。太陽輻射を考慮し，ファンリングによる遮熱は考慮しないものとする。

##### b. 遮熱板－原動機

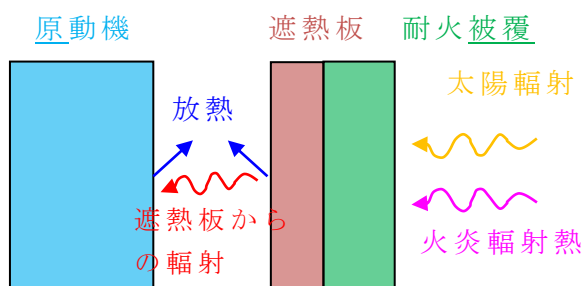
入熱が大きくなるよう形態係数は1とする。

##### (3) 温度評価

減速機の温度評価モデルの概略図を第 4-11 図に示す。本検討では，耐火被覆，遮熱板，原動機のそれぞれに設定した評価点で熱の授受を考え，温度評価を行う。

東側配置の火炎を考える場合，原動機への入熱は東面が最も大きく，南北及び上下面はそれよりも小さいと考えられるが，本評価では，保守的に原動機の全周囲に対して東面の遮熱板を介した入熱条

件を設定するものとする。放熱についても原動機の全周囲に設定する。また、ファンブレードの回転による対流がない条件(停止中)及び対流がある条件(運転中)を設定する。



第 4-11 図 減速機の温度評価モデル

それぞれの評価点の温度は次式(伝熱工学資料改訂第 5 版, p. 2)により計算する。

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = Q$$

上式を陽解法により時間刻み  $\Delta t$  ごとの時間進行の式にすると次式となる。

$$T(t+\Delta t) = T(t) + \frac{Q \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot V}$$

T : 評価点の温度(°C)

t : 時間(s)

$\Delta t$  : 時間刻み(s)

Q : 熱の授受量(輻射入熱, 放熱, 熱伝導)(W)

$\rho$  : 評価点の部材の密度(kg/m<sup>3</sup>)

$c_p$  : 評価点の部材の比熱(J/kg/K)

V : 評価点の部材の体積(m<sup>3</sup>)

#### 4.2.5 その他の部材の評価方法

減速機，原動機，ファンブレード及びチューブサポート以外の部位については，耐火被覆を施工することにより，許容温度以下とする設計としている。これらの部材については，耐火被覆施工後の温度上昇が許容温度以下であることを当社の実施した耐火試験にて確認する。当社の実施した耐火試験の試験方法を別添－4に示す。

当社の実施した耐火試験においては，それぞれの部材の最小板厚及び火炎からの距離を考慮し，最も厳しい評価条件となる部材にて試験を実施する。

第 4-1 表に対象部材の板厚と火炎からの距離を示す。

第 4-1 表 板厚と火炎距離

部材	板厚 (mm)	火炎からの距離 (m)
管束フレーム		約 5.5
ファンリング		約 6.5
ファンリングサポート		約 6.0
コモンベッド		約 7.5
ケーブルトレイ		約 2.5

第 4-1 表より，板厚と火炎からの距離のパラメータがあるが，当社の実施した耐火試験においては，これらを網羅させるため，最も薄い板厚であるケーブルトレイの           mm を試験体の板厚として選定し，火炎との距離はこれらより近い 2.0m の輻射強度にて試験を実施する。



## 6. 評価条件

### 6.1 冷却水の評価条件

冷却水の温度評価に用いた評価条件を、第 6-1 表及び第 6-2 表に示す。

第 6-1 表 形態係数及び輻射強度

形態係数	輻射発散度 (W/m <sup>2</sup> )	太陽の影響による輻射 強度 (W/m <sup>2</sup> )	輻射強度 (W/m <sup>2</sup> )
0.074	58,000	400	4692

第 6-2 表 熱影響評価に用いた諸元

パラメータ	単位	値
配管の受熱面積	(m <sup>2</sup> )	
冷却水流量	(m <sup>3</sup> /s)	
冷却水密度	(kg/m <sup>3</sup> )	1,040
冷却水比熱	(J/kg/K)	3,700

### 6.2 ファン駆動部、管束・配管の評価条件

チューブサポートの評価条件を第 6-3 表、ファンブレードの評価条件を第 6-4 表、減速機の評価条件を第 6-5 表、原動機の計算評価条件を第 6-6 表に示す。

第 6-3 表 チューブサポートの評価条件

パラメータ	単位	値
火炎の輻射発散度	W/m <sup>2</sup>	58000
太陽の輻射熱	W/m <sup>2</sup>	400
形態係数	-	0.086
放熱の熱伝達率*1	W/m <sup>2</sup> /K	17
雰囲気温度*2	℃	37

注記 \*1: 空気調和・衛生工学会, 空気調和・衛生工学便覧第 14 版, p.402, 表 17・19, 「総合」の最小値

\*2: 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度 (八戸特別地域気象観測所での観測記録 (1937 年～2018 年 3 月)における日最高気温の極値)である 37.0℃を設定



第 6-4 表 ファンブレードの評価条件

パラメータ		単位	値
火炎の輻射発散度		$\text{W/m}^2$	58000
形態係数	火炎－ファンブレード(下面)	-	0.030
	ファンリング－ファンブレード(上面)	-	0.175
	ファンリング－ファンブレード(下面)	-	0.245
放熱の熱伝達率* <sup>1</sup>		$\text{W/m}^2/\text{K}$	17
初期・霽囲気温度* <sup>2</sup>		°C	37
ファンブレード	密度* <sup>3</sup>	$\text{kg/m}^3$	
	比熱* <sup>3</sup>	$\text{J/kg/K}$	
	熱伝導率* <sup>3</sup>	$\text{W/m/K}$	
	厚み	m	

注記 \*1: 空気調和・衛生工学会, 空気調和・衛生工学便覧第 14 版, p.402, 表 17・19, 「総合」の最小値

\*2: 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度(八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年～2018年3月)における日最高気温の極値)である 37.0°Cを設定

\*3: 化学工学会, 改訂六版 化学工学便覧, p.1294, 表 28・1

第 6-5 表 減速機の評価条件

パラメータ		単位	値
火炎の輻射発散度		W/m <sup>2</sup>	58000
形態係数	火炎－遮熱板	-	0.121
	ファンリング－遮熱板	-	0.318
	遮熱板－減速機	-	1
放熱の熱伝達率* <sup>1</sup>		W/m <sup>2</sup> /K	12
初期・雰囲気気温度* <sup>2</sup>		°C	37
耐火被覆 (断熱ボード)	密度	kg/m <sup>3</sup>	250
	比熱	J/kg/K	温度依存性を考慮して、 耐火被覆の温度に応じて 設定
	熱伝導率	W/m/K	
遮熱板	密度* <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	7850
	比熱* <sup>3</sup>	J/kg/K	465
	熱伝導率* <sup>3</sup>	W/m/K	43
	厚み	m	0.006
減速機	重量	kg	
	比熱* <sup>3</sup>	J/kg/K	
	入・放熱面積	m <sup>2</sup>	

注記 \*1: 空気調和・衛生工学会, 空気調和・衛生工学便覧第 14 版, p.402, 表 17・19, 「対流」の最小値。

\*2: 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度(八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年～2018年3月)における日最高気温の極値)である 37.0°C を設定

\*3: 伝熱工学資料改訂第 5 版, p.284, S35C 300K の値

第 6-6 表 原動機の評価条件

パラメータ		単位	値
火炎の輻射発散度		W/m <sup>2</sup>	58000
太陽の輻射熱		W/m <sup>2</sup>	400
形態係数	火炎－遮熱板	-	0.199
	遮熱板－原動機	-	1
放熱の熱伝達率(停止中) <sup>*1</sup>		W/m <sup>2</sup> /K	12
放熱の熱伝達率(運転中)		W/m <sup>2</sup> /K	14(遮熱板) <sup>*2</sup> 21(原動機) <sup>*3</sup>
初期・雰囲気温度 <sup>*4</sup>		℃	37
耐火被覆 (断熱ボード)	密度	kg/m <sup>3</sup>	250
	比熱	J/kg/K	温度依存性を考慮して、 耐火被覆の温度に応じて 設定
	熱伝導率	W/m/K	
遮熱板	密度	kg/m <sup>3</sup>	7850
	比熱	J/kg/K	465
	熱伝導率	W/m/K	43
	厚み	m	0.006
原動機	重量	kg	
	比熱	J/kg/K	
	入・放熱面積	m <sup>2</sup>	

注記 \*1: 空気調和・衛生工学会, 空気調和・衛生工学便覧第 14 版, p.402, 表 17・19, 「対流」の最小値  
 \*2: 伝熱工学資料改訂第 5 版, p.28, 式(10), (13)から, 風速 7.16m/s, 代表長 L=0.5m を用いて算出。  
 \*3: 伝熱学(理工学社), p.173, 式(7.328) から, 風速 7.16m/s, 代表径 d=0.5m を用いて算出。  
 \*4: 外部からの衝撃による損傷防止での高温の設計外気温度(八戸特別地域気象観測所での観測記録(1937年～2018年3月)における日最高気温の極値)である 37.0℃を設定

### 6.3 支持構造物の評価条件

支持構造物の評価条件については別添-3の「必要離隔距離の算出」を参照のこと。

## 7. 評価結果

### 7.1 冷却水の評価結果

輻射による冷却水の温度上昇は ■■■℃ である。一方、実際の伝熱面積を考慮し、仮に外気温度を 37℃ とした場合の冷却水温度は ■℃ であり、■■■℃ 温度上昇したとしても安全冷却水系（再処理設備本体用）の最高使用温度 ■℃ を超えることはなく、安全機能に影響を与えることはない。

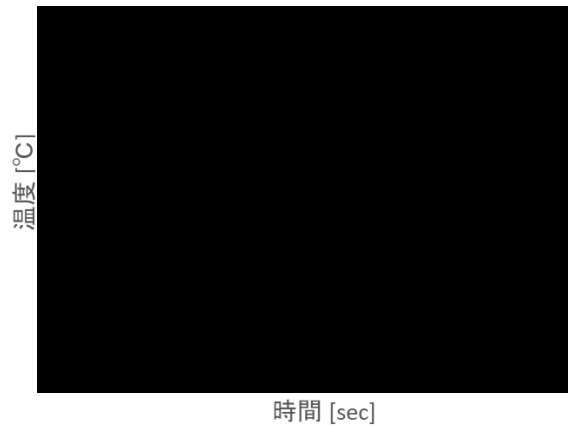
### 7.2 冷却機能に必要な部位の評価結果

#### 7.2.1 チューブサポートの評価結果

チューブサポートの定常状態での温度は ■■■℃ であり、許容温度 ■■■℃ 未満であることを確認した。

#### 7.2.2 ファンブレードの評価結果

ファンブレードの評価結果を第 7-1 図に示す。1400 秒後の温度は ■■■℃ であり、許容温度 ■■■℃ 未満であることを確認した。



第 7-1 図 ファンブレードの評価結果

### 7.2.3 減速機の評価結果

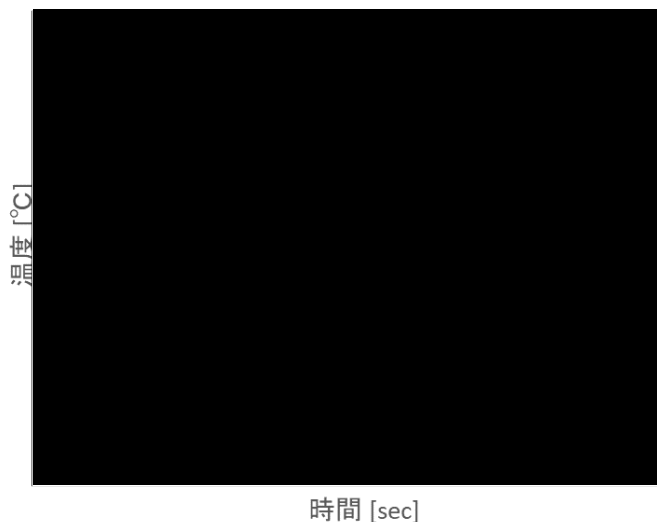
減速機の評価結果を第 7-2 図に示す。1400 秒後の温度は ■℃であり、許容温度 ■℃未満であることを確認した。



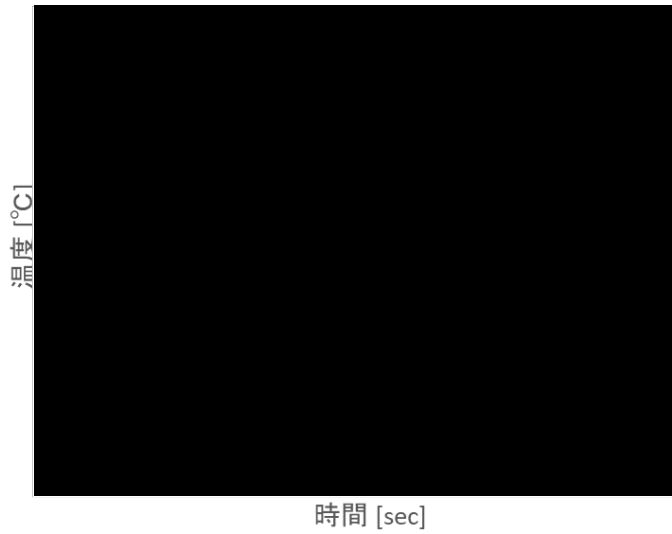
第 7-2 図 減速機の評価結果

### 7.2.4 原動機の評価結果

原動機の評価結果を第 7-3 図及び第 7-4 図に示す。停止中の原動機の 1400 秒後の温度は ■℃(許容温度 ■℃)，運転中の原動機の 1400 秒後の温度は ■℃(許容温度 ■℃)であり，それぞれ許容温度未満であることを確認した。



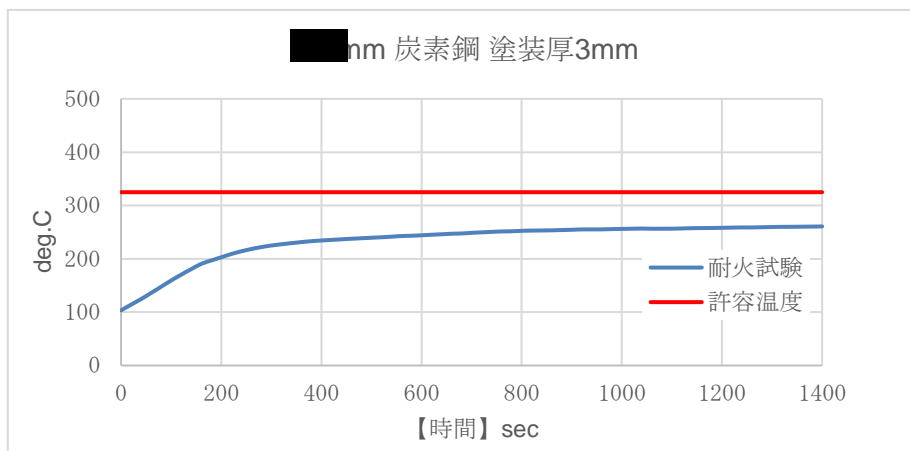
第 7-3 図 原動機の評価結果(停止中)



第 7-4 図 原動機の評価結果(運転中)

7.2.5 その他の部位の評価結果

ケーブルトレイの板厚にて耐火試験を実施した結果を第 7-5 図に示す。1400 秒後の温度は約 260°Cであり，許容温度 325°C未満であることを確認した。

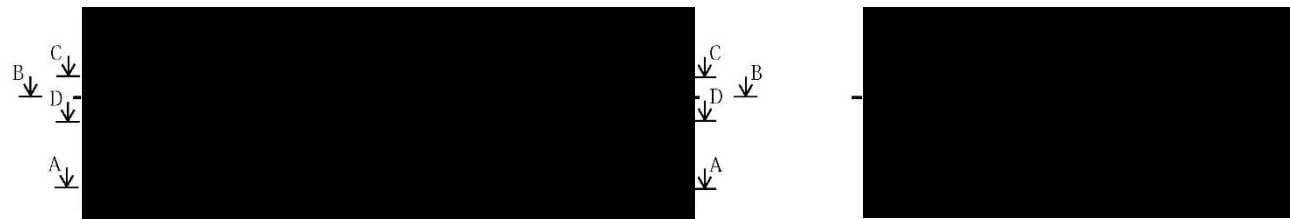
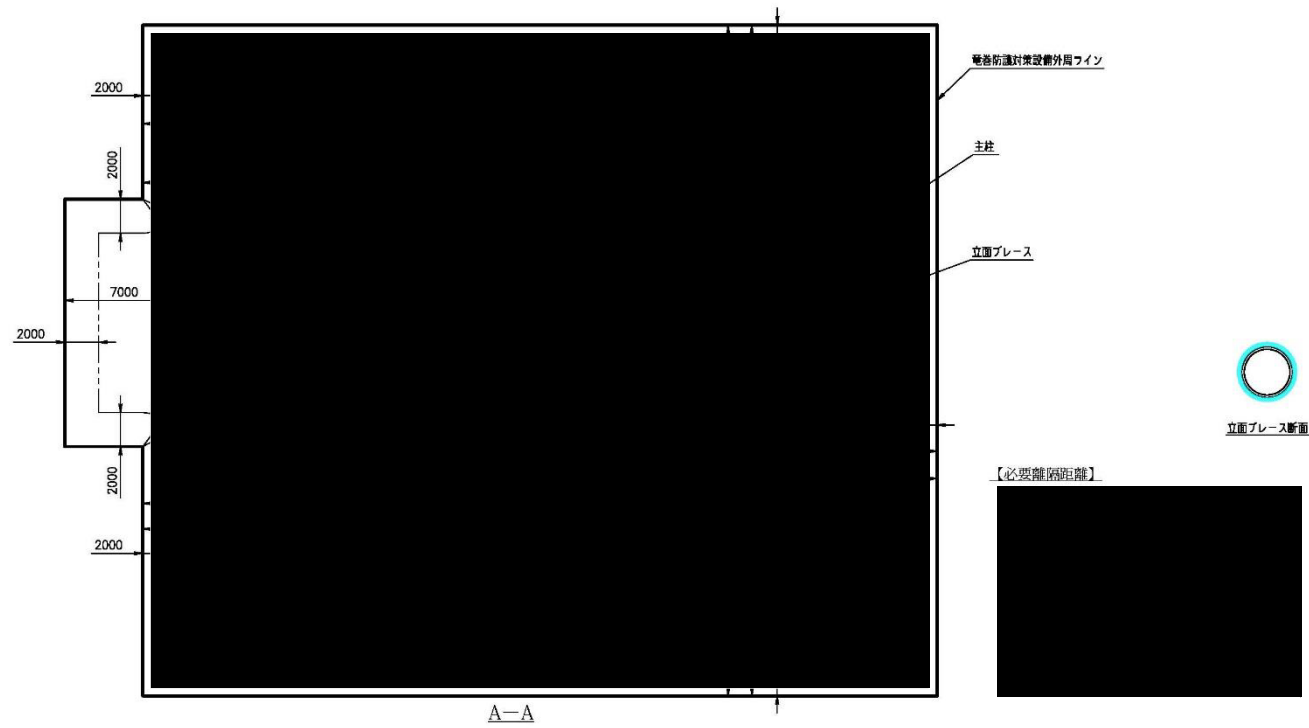


第 7-5 図 t■■■■m 炭素鋼 耐火塗装厚 3mm の耐火試験結果

### 7.3 支持構造物の評価結果

離隔距離表に基づき、支持架構を構成する柱、梁及びブレースに対し、火炎との距離を評価した。

評価の結果、離隔距離を満足しない部材が確認されたため、耐火被覆を施工する。耐火被覆の施工範囲を第 7-6 図から第 7-9 図に示す。

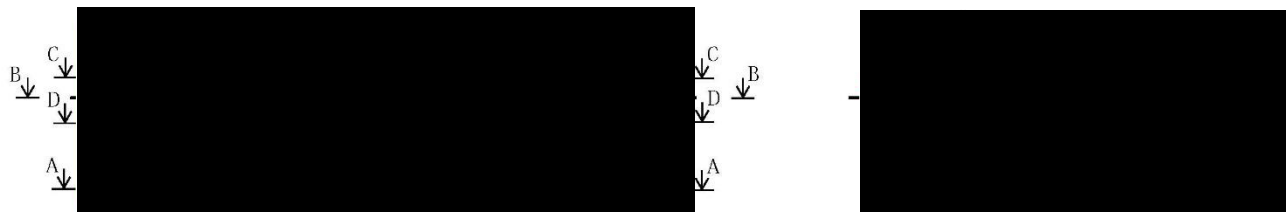
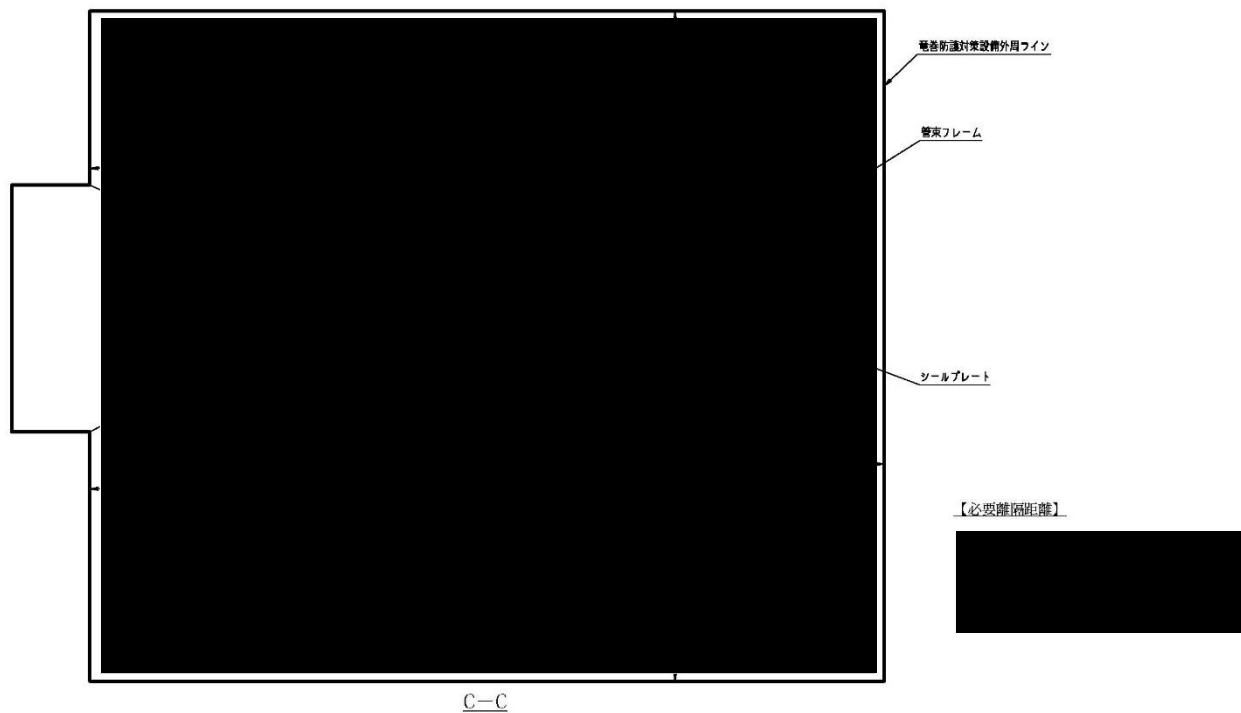


第 7-6 図 冷却塔の耐火被覆範囲図 (1/4)

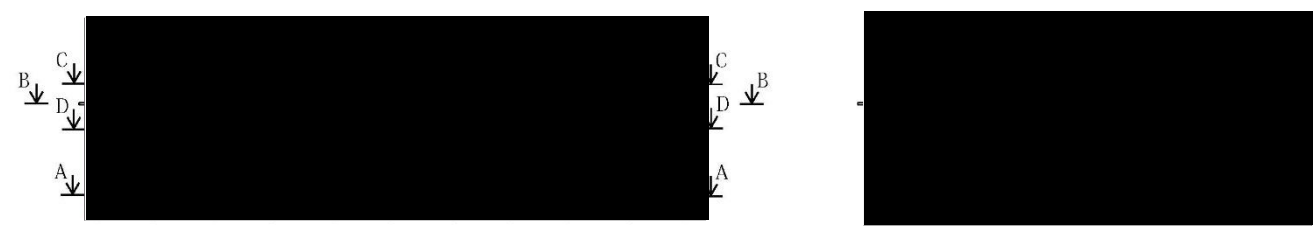
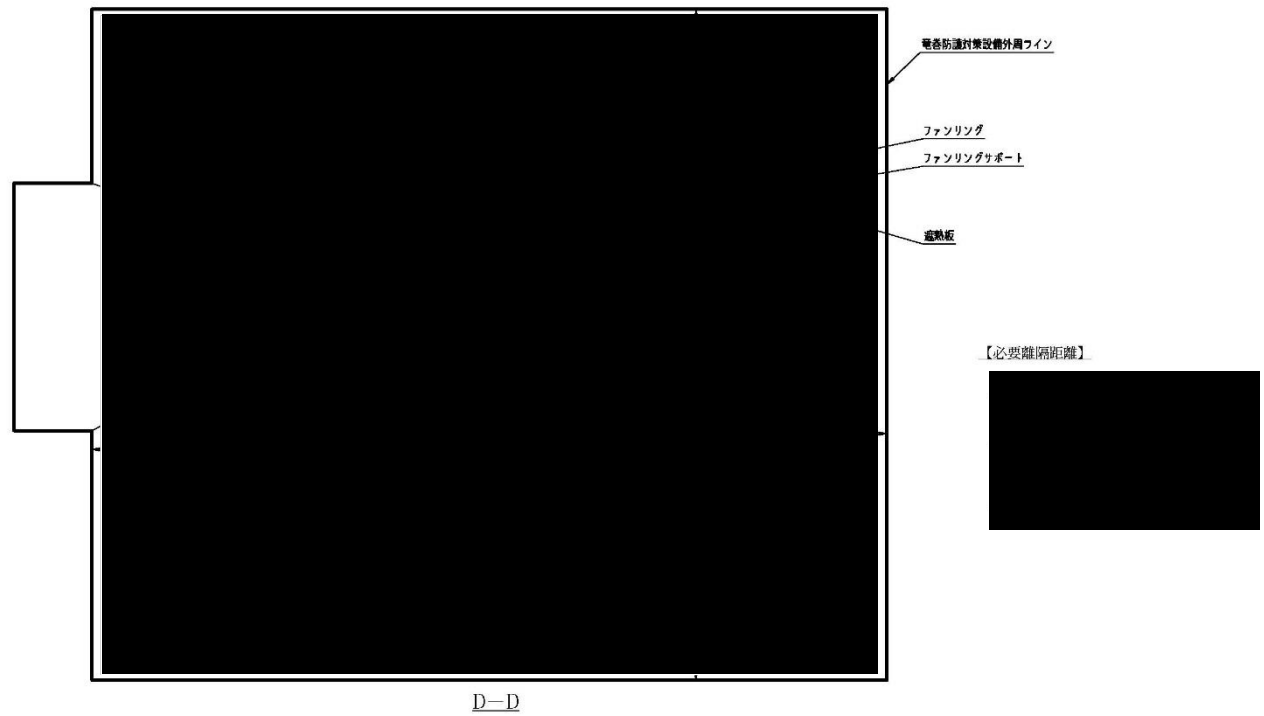




第 7-7 図 冷却塔の耐火被覆範囲図(2/4)



第 7-8 図 冷却塔の耐火被覆範囲図(3/4)



第 7-9 図 冷却塔の耐火被覆範囲図(4/4)



令和 4 年 6 月 9 日 R6

別紙－ 3

安全冷却水 B冷却塔 飛来物防護ネットの評価  
書

## 目 次

<u>1.</u>	概要	1
<u>2.</u>	評価対象部位の選定について	1
<u>2.1</u>	安全冷却水 B 冷却塔へ波及的影響を及ぼさないために必要な部位の選定	5
<u>2.2</u>	評価対象部材の選定	6
<u>3.</u>	評価方針について	8
<u>3.1</u>	支持構造物の評価方針	8
<u>4.</u>	評価結果	8
<u>4.1</u>	支持構造物の評価結果	8

## 1. 概要

本資料は、航空機墜落火災に対する、再処理施設の飛来物防護ネット（再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B）（以下「飛来物防護ネット」という。）の評価について補足説明するものである。

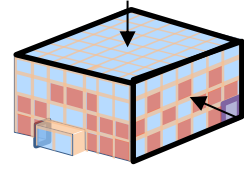
また、本資料は、第1回申請のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・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. 評価対象部位の選定について

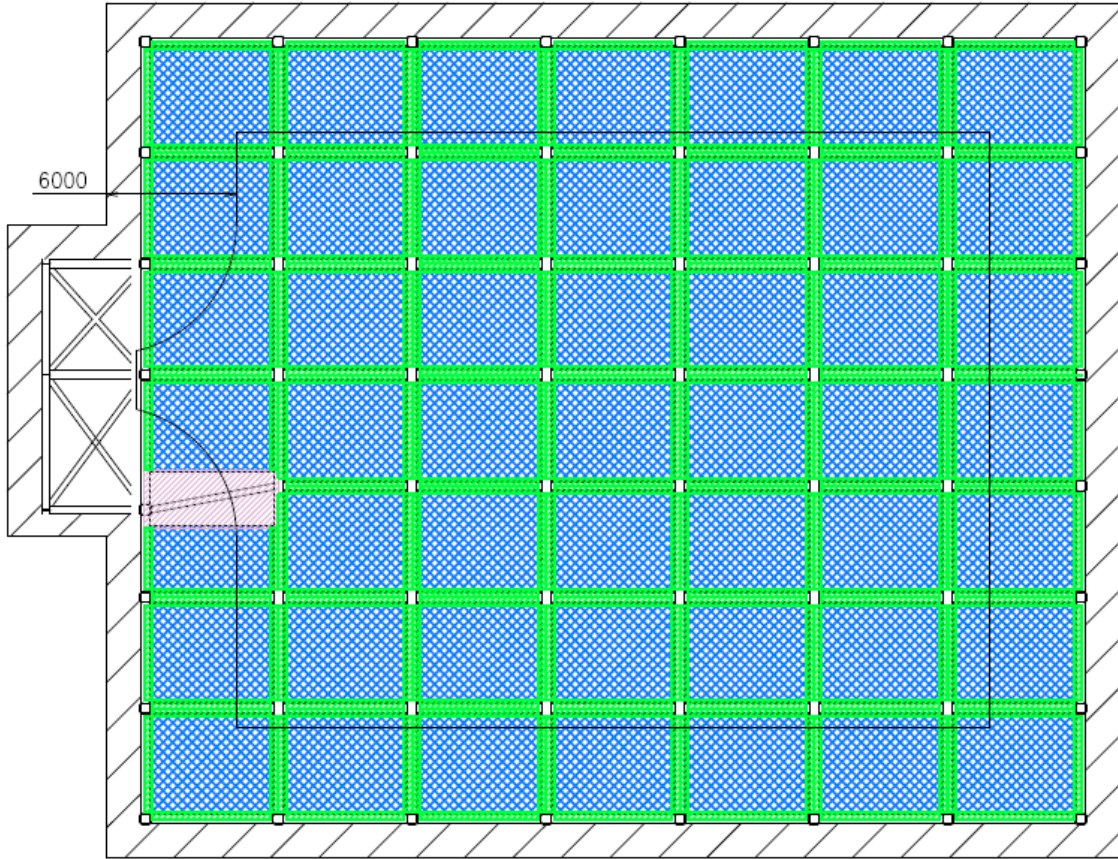
飛来物防護ネットは、竜巻襲来時に安全冷却水 B 冷却塔に飛来物が衝突することを防止するための設備であり、竜巻襲来時にその機能を求められる。そのため、航空機墜落火災においては、飛来物の衝突を考慮する必要がないことから、安全冷却水 B 冷却塔へ波及的影響を及ぼさないことが求められる。安全冷却水 B 冷却塔へ波及的影響を及ぼさないために必要な部位と評価対象を抽出する。

飛来物防護ネットの概要図を第 2-1 図に示す。

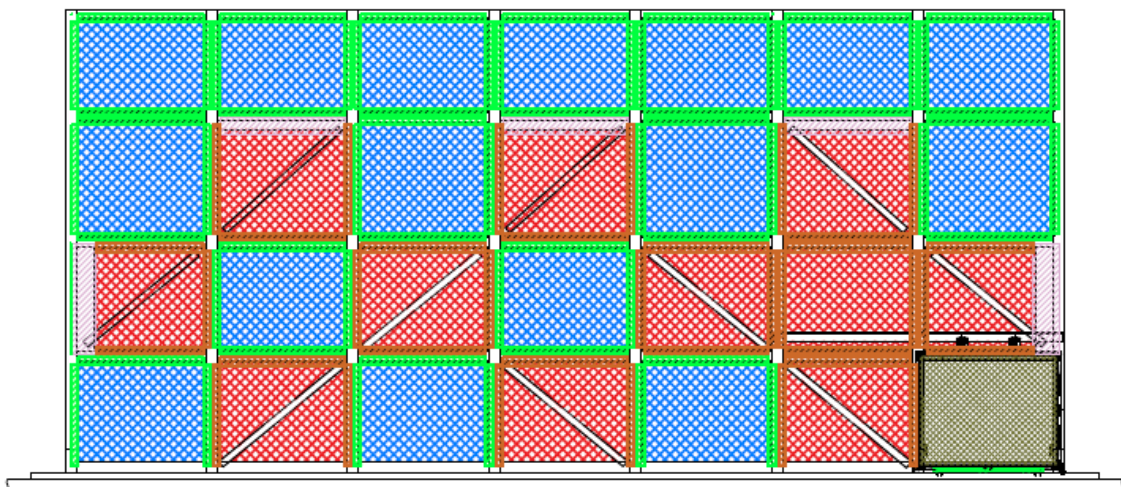


【凡例】

- : 外張りネット
- : 内張りネット
- : 防護板
- : 車両用扉
- : 補助防護板（外取付）
- : 補助防護板（内取付）



(天面)



(南面)

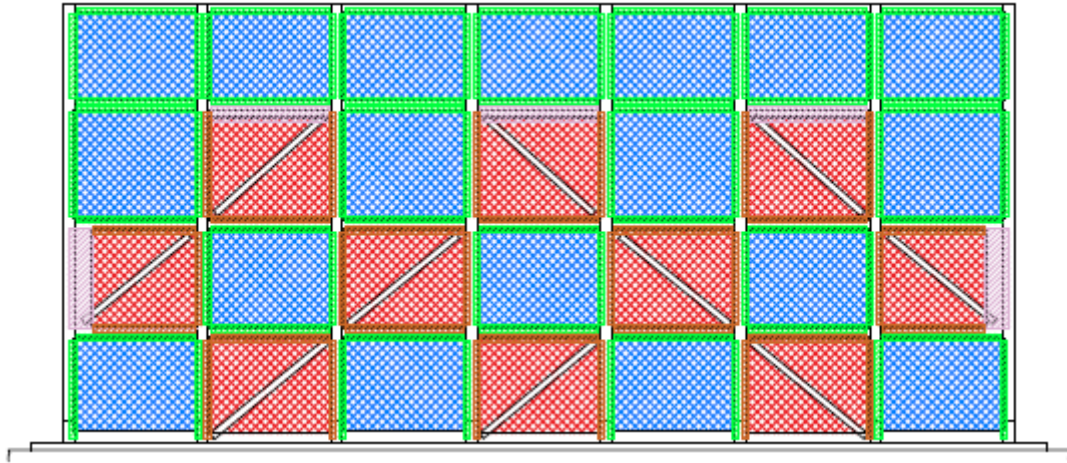
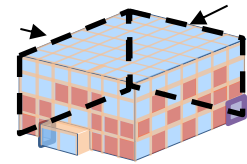
第 2-1 図 飛来物防護ネットの概要図 (1/3)



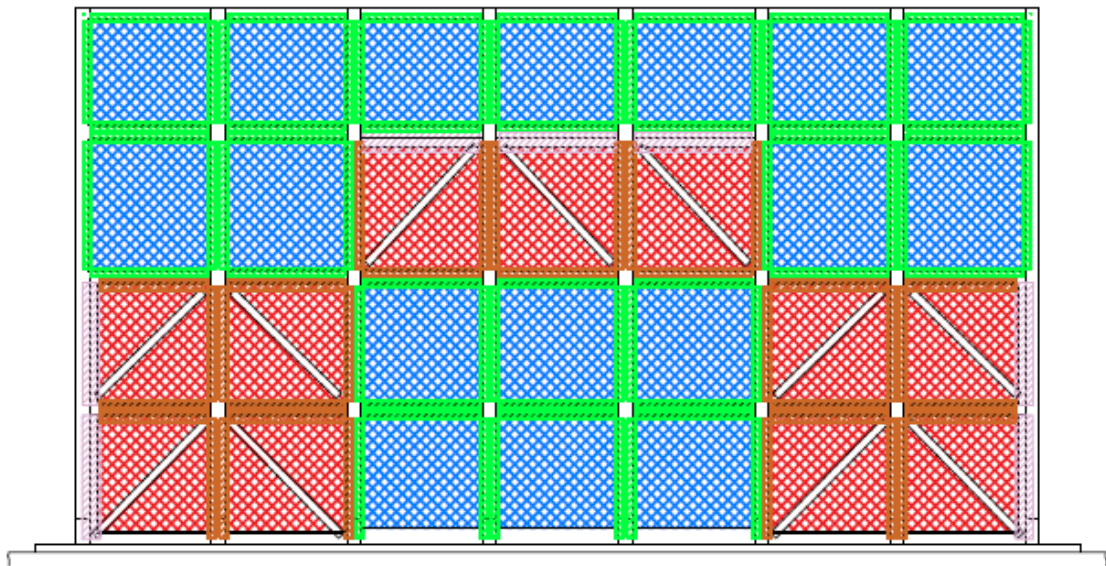
【凡例】

外張りネット : 内張りネット : 防護板

車両用扉 : 補助防護板（外取付） : 補助防護板（内取付）



（北面）



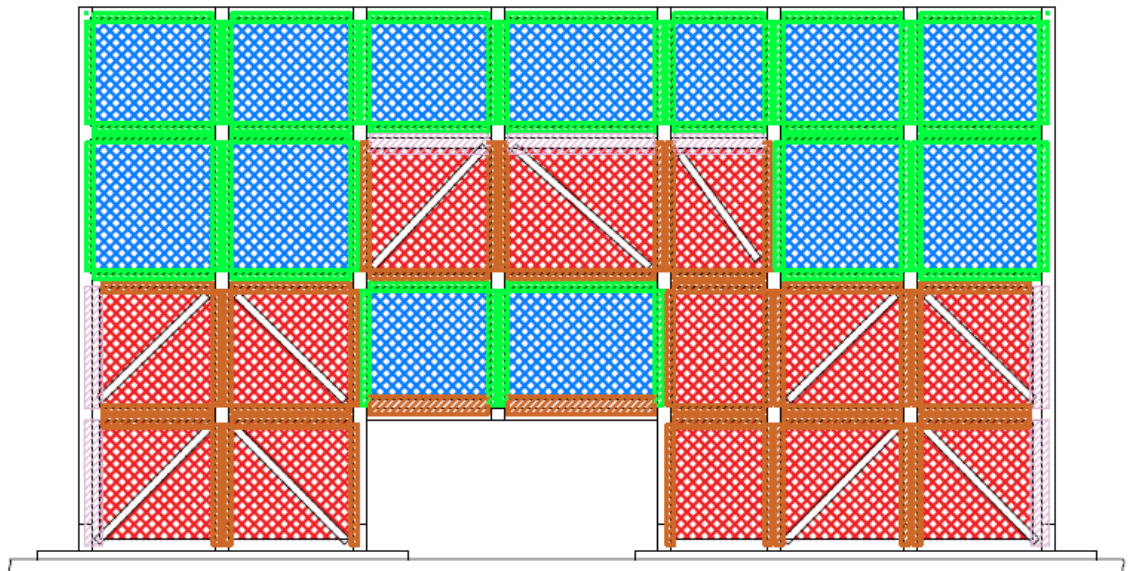
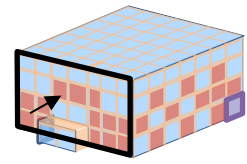
（東面）

第 2-1 図 飛来物防護ネットの概要図 (2/3)

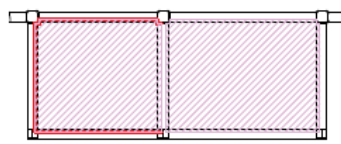
【凡例】

外張りネット 内張りネット 防護板

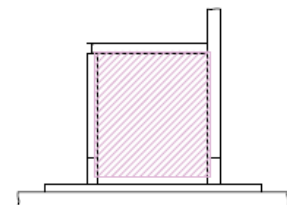
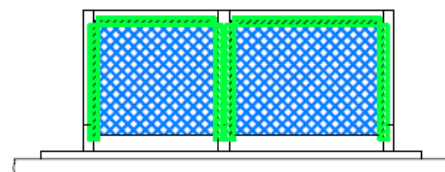
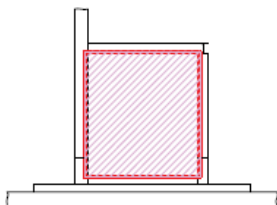
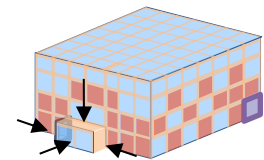
車両用扉 補助防護板（外取付） 補助防護板（内取付）



(西面)



(張出し部天面)



(張出し部南面，北面及び西面)

第 2-1 図 飛来物防護ネットの概要図 (3/3)

2.1 安全冷却水 B\_冷却塔へ波及的影響を及ぼさないために必要な部位の選定

安全冷却水 B\_冷却塔へ波及的影響を及ぼさないためには、安全冷却水 B\_冷却塔へ衝突等の物理的な影響を及ぼさないことが求められる。よって、物理的影響を及ぼし得る部位を抽出する。

抽出結果を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表 評価対象部位の選定結果

部位	選定理由	設計方針
支持架構	支持架構は倒壊もしくは脱落すると、安全冷却水 B_冷却塔の損傷を引き起こす可能性があることから、評価対象とする。	支持構造物
防護ネット	天面に設置している防護ネットのうちネット及びワイヤロープの落下が想定されるが、単位面積当たりの重量が〇〇kg/m <sup>2</sup> と軽量であることからたとえ天面から脱落したとしても、ルーバで止まることから、安全冷却水 B_冷却塔への物理的な影響は考えにくいことから、評価対象外とする。 また、車両を通行させるため支持架構にガイドレールを取付け、トロリを用いて鋼製枠防護ネットを吊り下げて、レールを走行させることにより開閉できる構造としているものがあるが、当該ネットが脱落したとしても当該ネット自身が支持架構の開口部より大きいことから、安全冷却水 B_冷却塔への物理的な影響は考えにくいことから、評価対象外とする。	—
防護板	天井部の防護板が脱落した場合、安全冷却水 B_冷却塔の損傷を引き起こす可能性があることから、評価対象とする。	支持構造物
補助防護板	天井部の補助防護板が脱落した場合、安全冷却水 B_冷却塔の損傷を引き起こす可能性があることから、評価対象とする。	支持構造物

## 2.2 評価対象部材の選定

第 2-1 表にて選定された部位に対し、航空機墜落火災の影響を考慮する部材を選定する。

### (1) 支持架構

柱，梁，トラス水平ブレース，トラス鉛直ブレース，座屈拘束ブレースにより構成されている。

支持架構を構成する部材が損傷した場合，支持架構は倒壊もしくは脱落し，安全冷却水 B 冷却塔に波及的影響を及ぼし得るおそれがあることから，評価対象とする。

支持架構は，補足説明資料 外外火 04「航空機墜落による火災の防護設計について」の 4.3(3)「支持構造物」に基づいた設計を実施することとし，耐火被覆の施工を前提とする。

### (2) 防護板／補助防護板

鋼板及び取付けボルトにより構成されている。

天井部の鋼板が脱落した場合，安全冷却水 B 冷却塔に波及的影響を及ぼし得るおそれがあることから，評価対象とする。防護板／補助防護板は，補足説明資料 外外火 04「航空機墜落による火災の防護設計について」の 4.3(3)「支持構造物」に準じた設計を実施することとし，耐火被覆の施工を前提とする。

### (3) まとめ

飛来物防護ネットの評価対象部位の選定結果一覧を第 2-2 表に示す。

第2-2表 飛来物防護ネット 評価対象の選定

機器	部位	評価対象	評価内容・防護設計
支持架構	柱	○	飛来物防護ネットは、至近で航空機墜落火災が発生することを想定することから、耐火被覆を施工する。施工範囲は離隔距離表を用いて設定する。施工後の支持架構が許容温度内であることを、離隔距離表及び温度評価にて確認する。
	大梁		
	小梁		
	トラス柱		
	トラス水平ブレース		
	トラス鉛直ブレース		
	座屈拘束ブレース		
防護ネット		—	—
防護板 補助防護板	鋼板	○	飛来物防護ネットは、至近で航空機墜落火災が発生することを想定することから、耐火被覆を施工する。施工範囲は離隔距離表を用いて設定する。施工後の鋼板が許容温度内であることを、温度評価にて確認する。
	取付けボルト	○	耐火被覆を施工する鋼板の取付けボルトには耐火被覆を施工する。

<凡例> ○：評価対象部位，—：評価対象外

### 3. 評価方針について

#### 3.1 支持構造物の評価方針

##### (1) 温度評価

火炎からの輻射を受けた時の、支持架構構成部材の温度上昇を評価する。飛来物防護ネットは至近で航空機墜落火災が発生することを踏まえ、直近の部材はその板厚によらず耐火被覆 2mm を施工する。また、耐火被覆の施工範囲は、別添-5の離隔距離表を基に設定する。

耐火被覆施工後の支持架構構成部材が許容温度内であることを、耐火試験にて確認する。

耐火試験による確認の対象とする部材は、飛来物防護ネットの支持架構を構成する部材のうち、最小板厚であるブレース材(板厚6mm)とし、耐火被覆2mmを施工し許容温度以下となることを確認する。

##### (2) 構造強度の評価

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、その許容温度が450℃であり、一時的に鋼材の強度低下が発生する。そのため、強度低下が発生した場合においても、支持架構は必要な構造強度を維持していることを評価する。

評価においては、自重、積雪及び風による荷重を考慮する。

### 4. 評価結果

#### 4.1 支持構造物の評価結果

##### (1) 温度評価

飛来物防護ネットの構成部材と必要離隔距離の関係を第4-1表に示す。第4-1表から支持架構、防護板それぞれの耐火被覆の施工範囲を第4-1図、第4-2図、第4-3図に示す。また、飛来物防護ネットの支持架構に取り付けられる防護ネットについては、飛来物に対する防護機能に影響する部材は耐火被覆を施工しないことから、施工対象外となる防護ネット取付金物周辺の施工範囲及び防護ネット(車両用扉)周辺の施工範囲を第4-4図、第4-5図に示す。

耐火被覆を施工しない部材は離隔距離表から、許容温度を満足する部材となることを確認した。

耐火被覆を施工する部材のうち、最小板厚はブレース材の板厚6mm(H鋼)である。そのため、本部材を包絡する当社の実施した耐火試験結果を第4-6図に示す。試験結果より、許容温度内であることを確認した。耐火試験の条件を別添-4に示す。

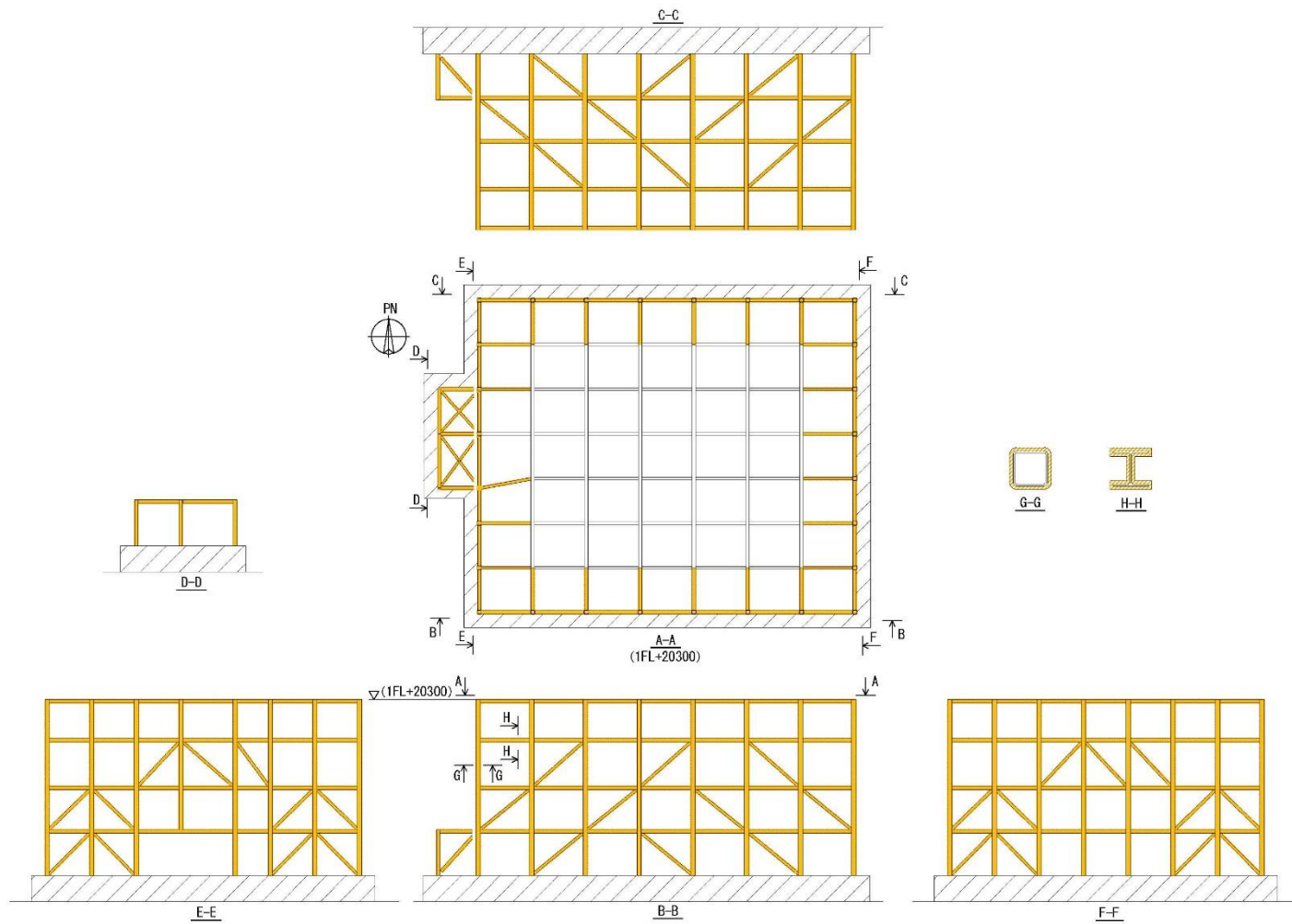
なお、中心鋼材をモルタルと鋼管で覆う複合材である座屈拘束ブレースについて、鋼管(板厚6mm以上)へ耐火被覆を施工することにより、中心鋼材も許容温度以下となる。



また、航空機墜落火災時の耐火被覆の発泡と防護ネットのワイヤロープ等の部材との干渉については、熱を受け発泡した耐火被覆は柔らかく周囲の部材(ワイヤロープ等)があった場合でもそれらを避けて包み込むように発泡が進み断熱層を形成するため、耐火性能への影響はない。防護ネットの飛来物防護機能は喪失するが別紙-2に記載のとおり、復旧までの期間中に竜巻の影響を考慮する必要はない。

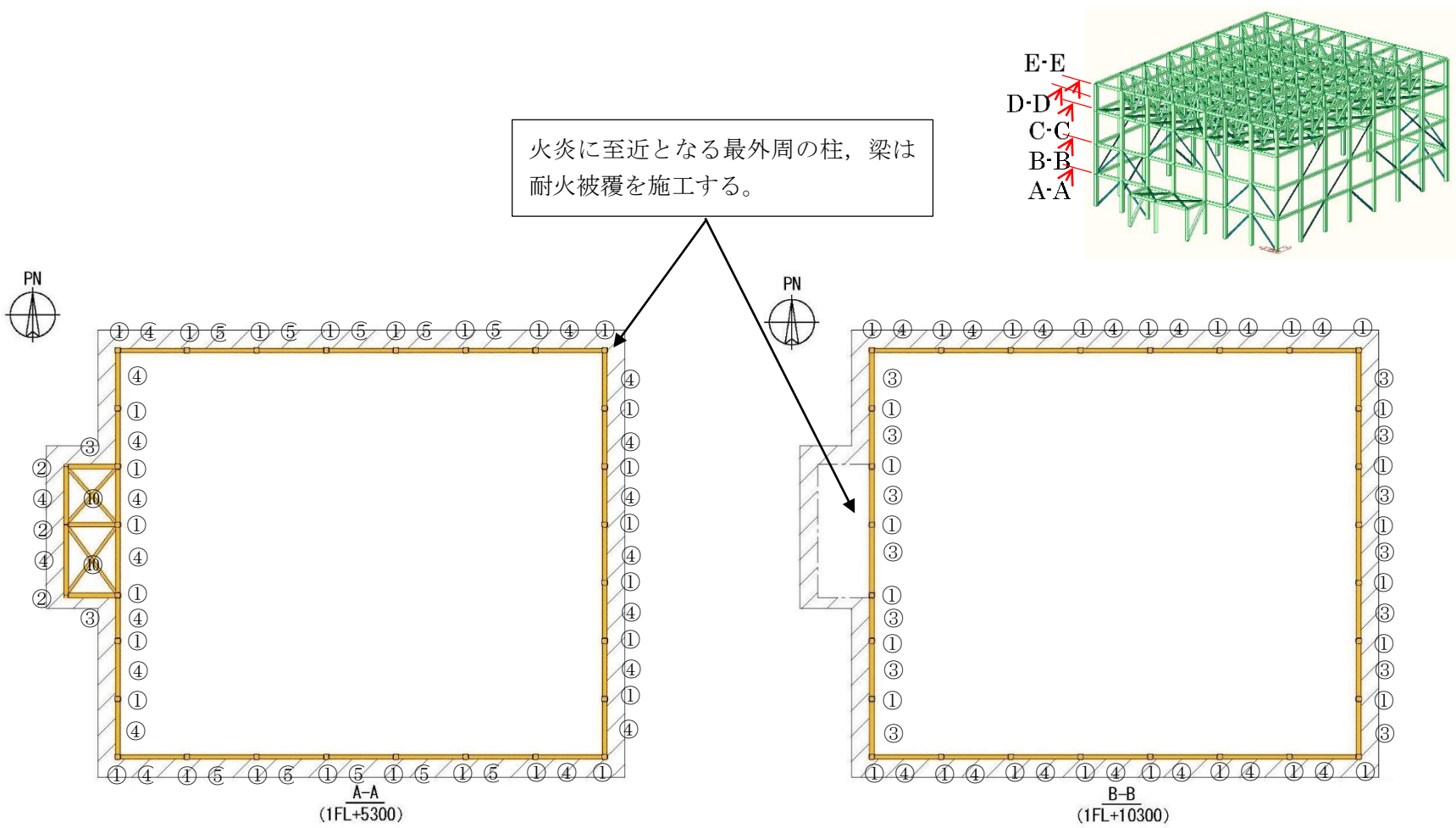
第 4-1 表 構成部材と必要離隔距離の関係

No	材質	板厚	必要離隔距離	備考
①	炭素鋼	28mm	0m	火炎の至近にあるため、離隔距離に関わらず耐火被覆を <u>施工</u> (外外火 04-1 4.3(3)参照)
②		13mm	4m	
③		20mm	1m	
④		18mm	3m	
⑤		13mm	4m	
⑥		10mm	6m	<u>必要離隔距離を満足しない</u> 部材に耐火被覆を <u>施工</u>
⑦		13mm	4m	
⑧		18mm	3m	
⑨		10mm	6m	
⑩		9mm	7m	
⑪		12mm	4m	
⑫		9mm	7m	
⑬		8mm	8m	
⑭		10mm	6m	
⑮		9mm	7m	
⑯		13mm	4m	
⑰		10mm	6m	



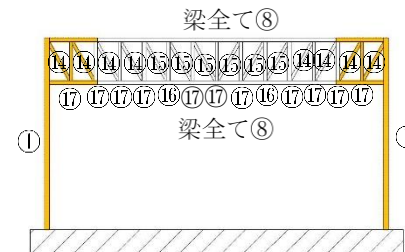
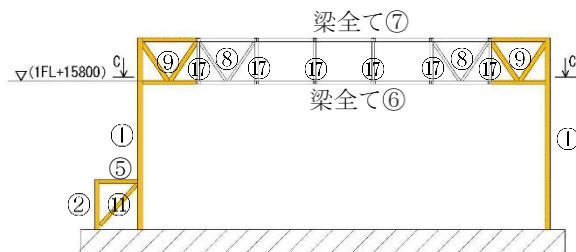
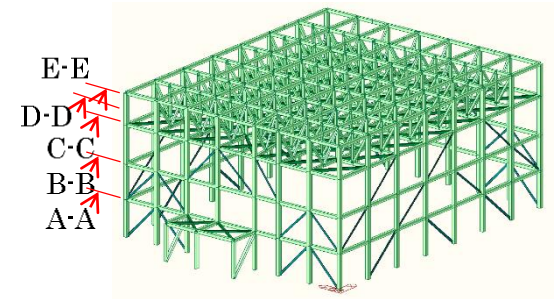
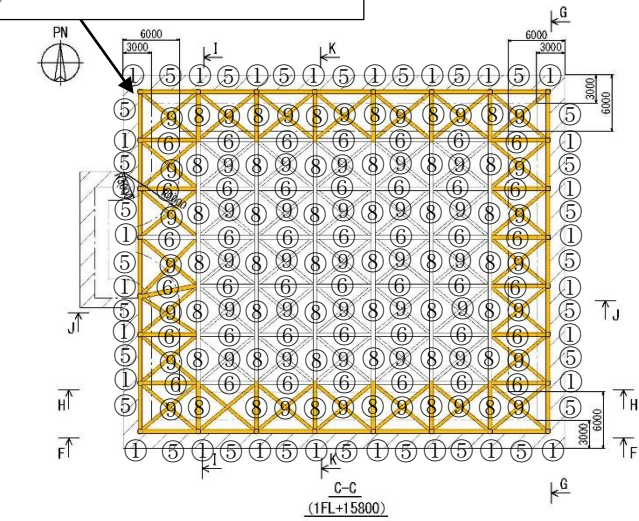
第 4-1 図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット(1/4) 全体図



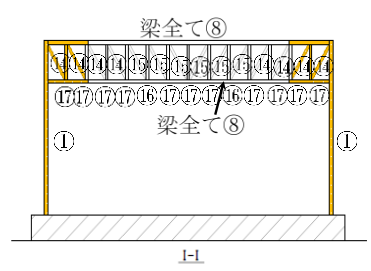
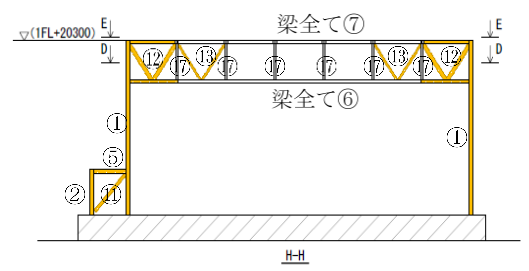
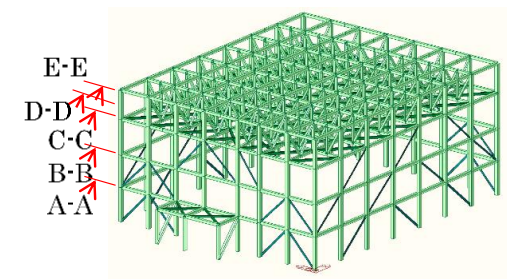
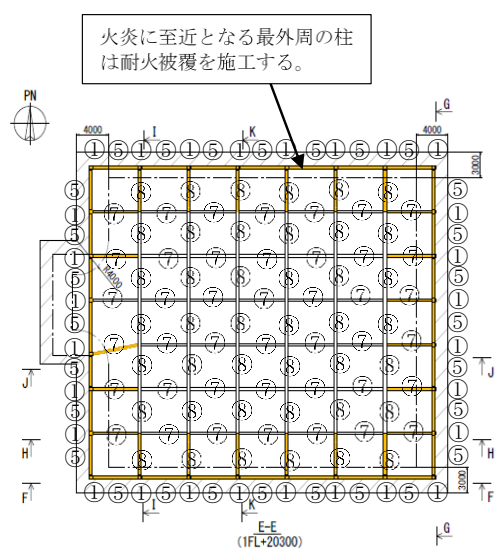
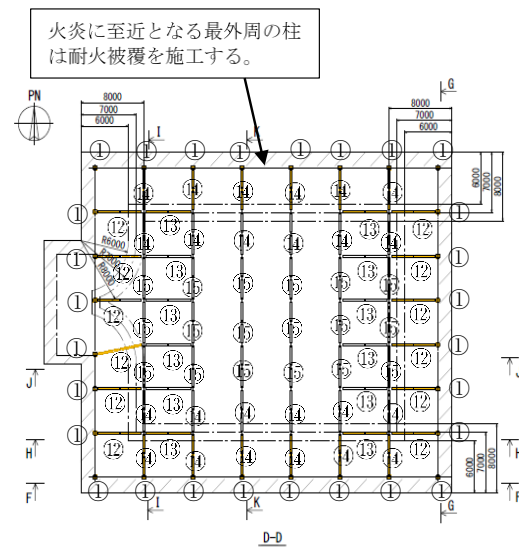


第 4-1 図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット (2/4) A-A 及び B-B 断面

火炎に至近となる最外周の柱, 梁は耐火被覆を施工する。



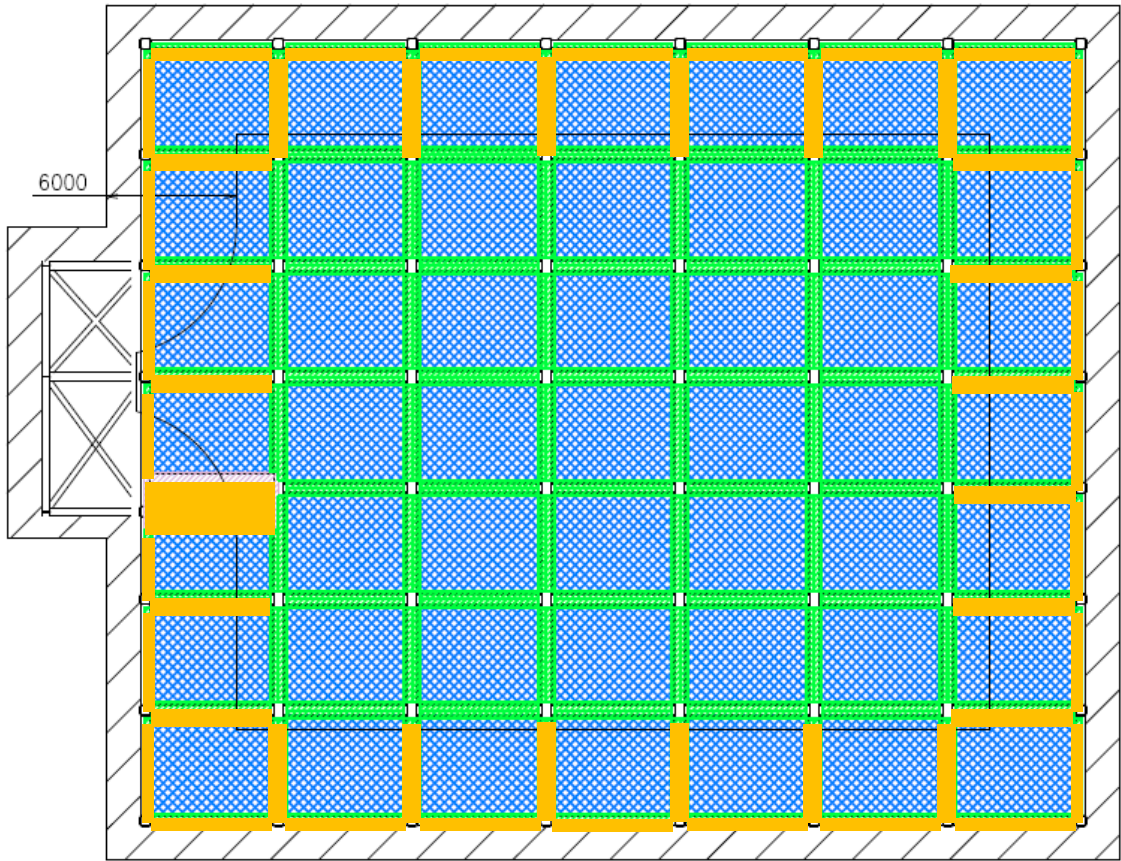
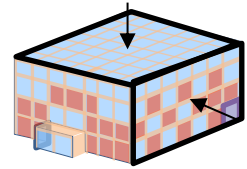
第 4-1 図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット(3/4) C-C, J-J 及び K-K 断面



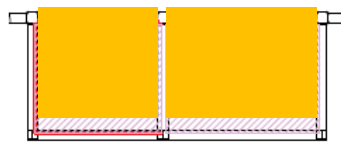
第 4-1 図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット(4/4) D-D, E-E, H-H 及び I-I 断面

【凡例】

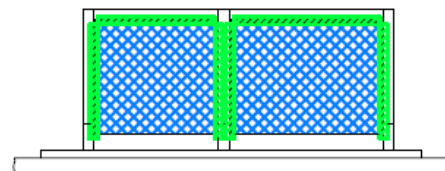
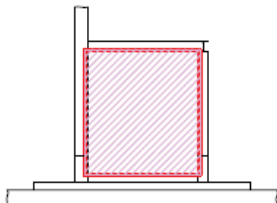
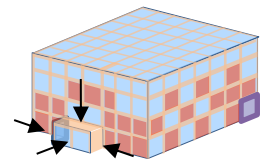
- : 外張りネット
- : 内張りネット
- : 防護板
- : 車両用扉
- : 補助防護板（外取付）
- : 補助防護板（内取付）
- : 耐火被覆施



(天面)  
(西面)



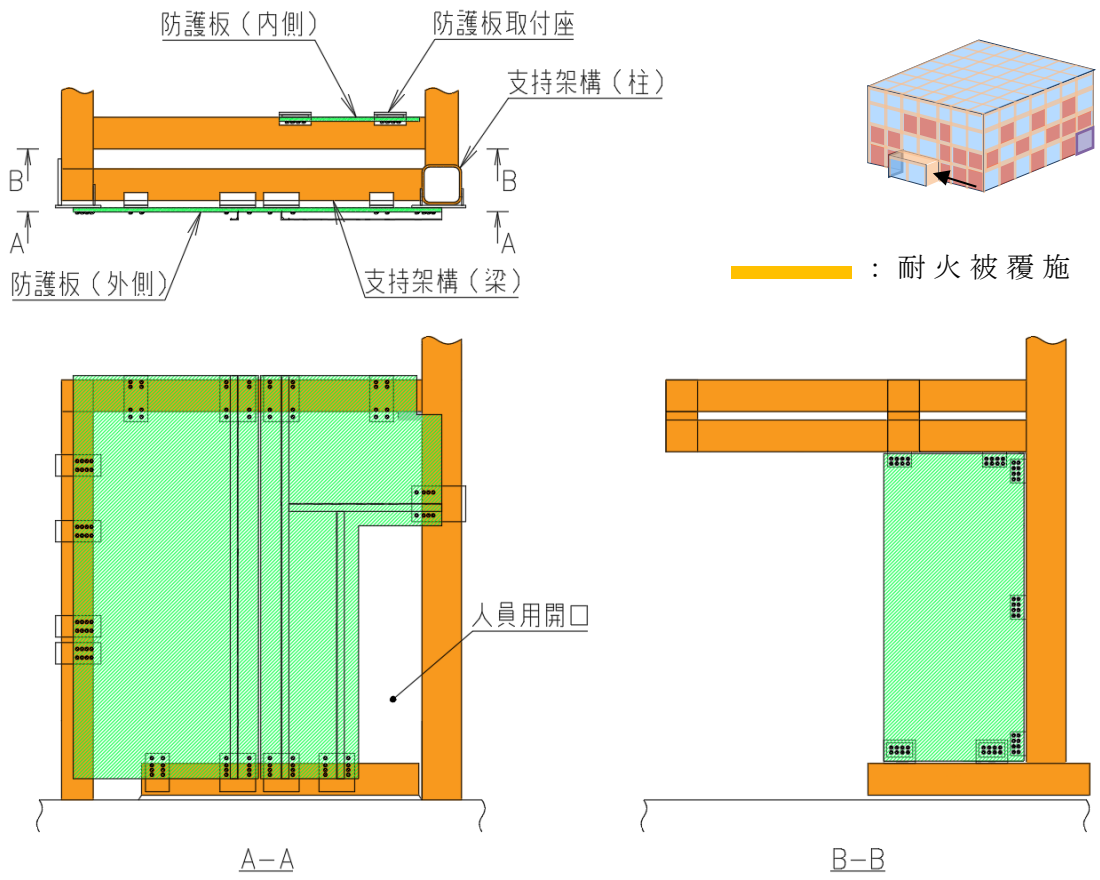
(張出し部天面)



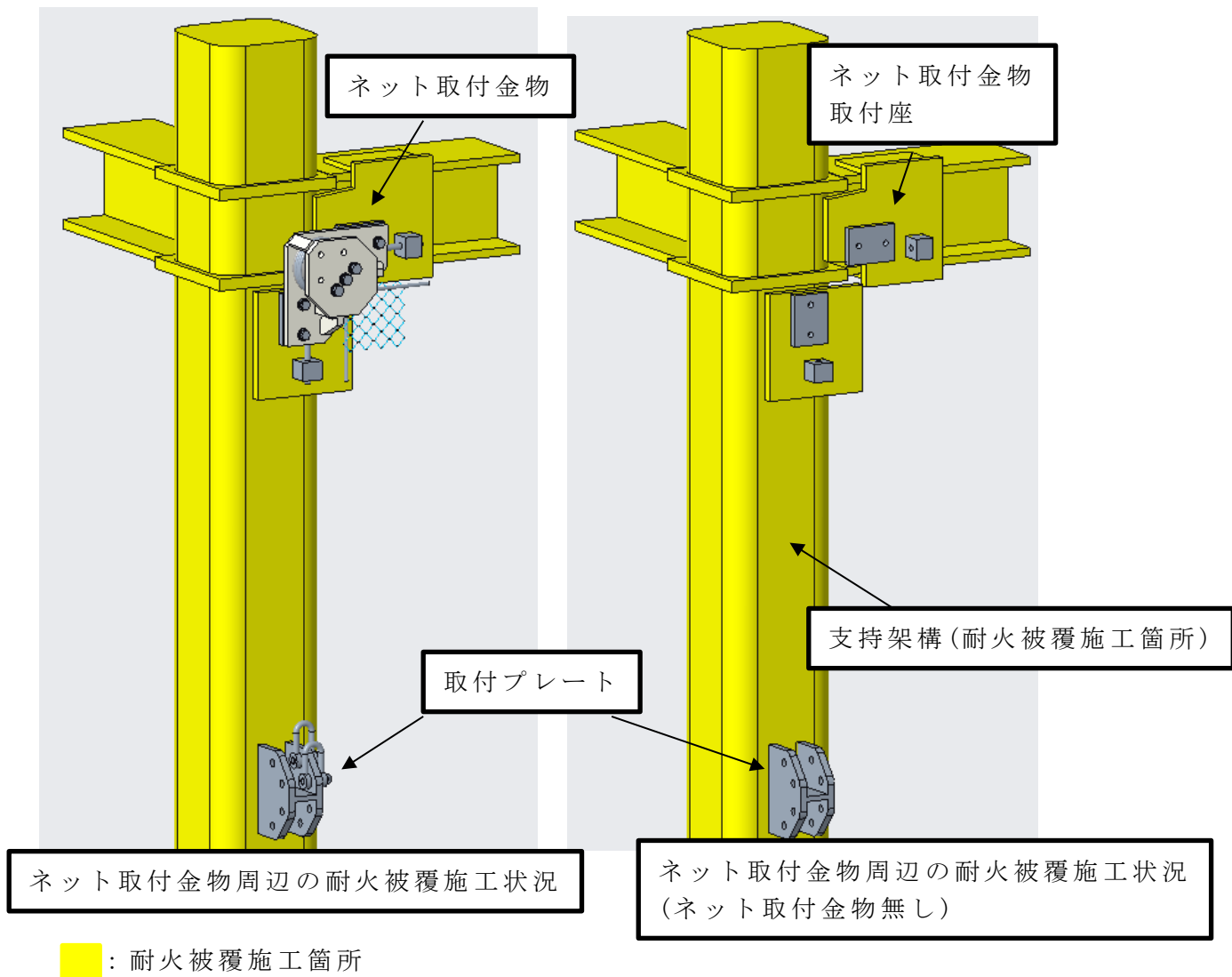
(張出し部南面，北面及び西面)

第 4-2 図 飛来物防護ネット 防護板の耐火被覆施工範囲図

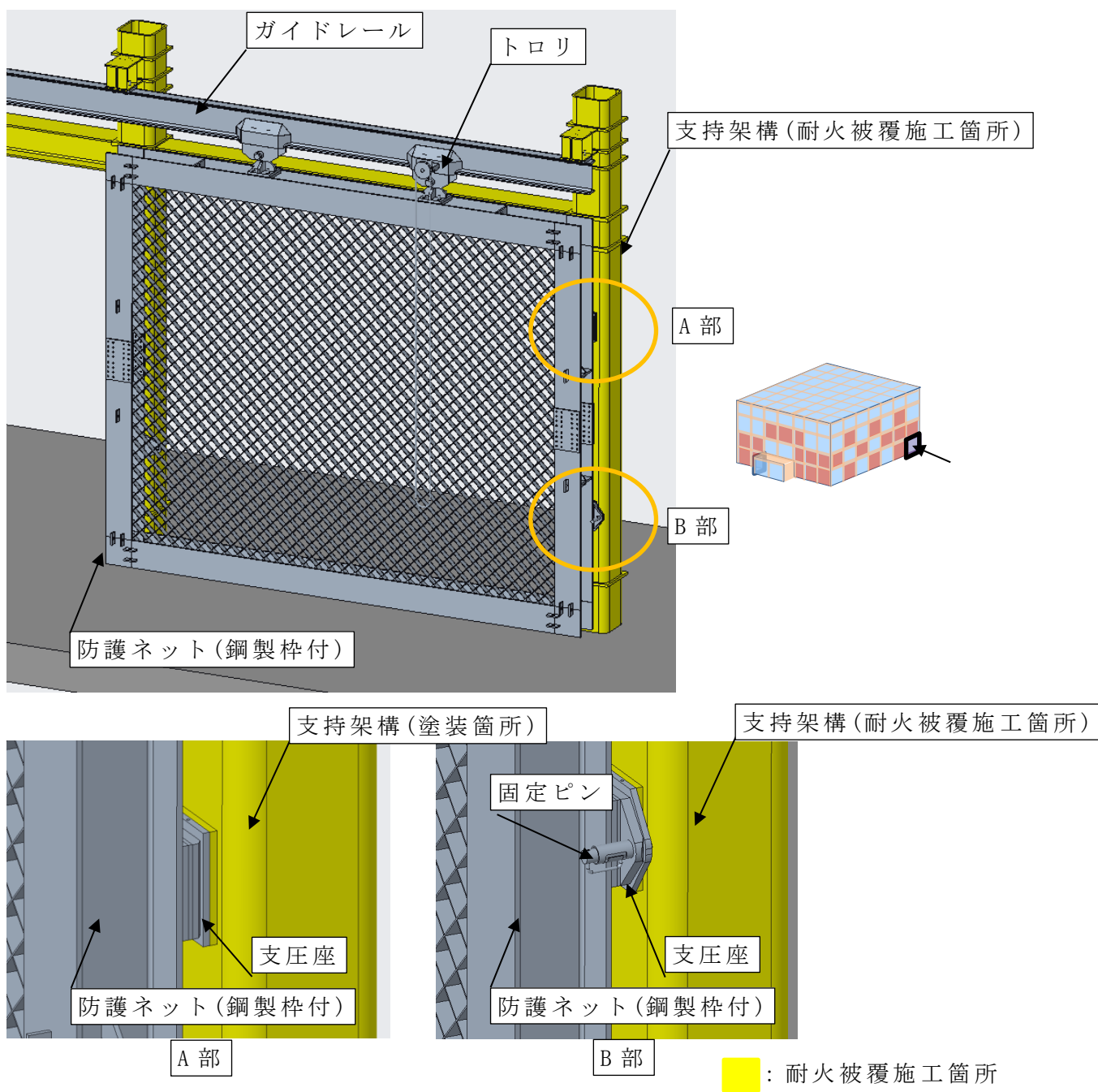




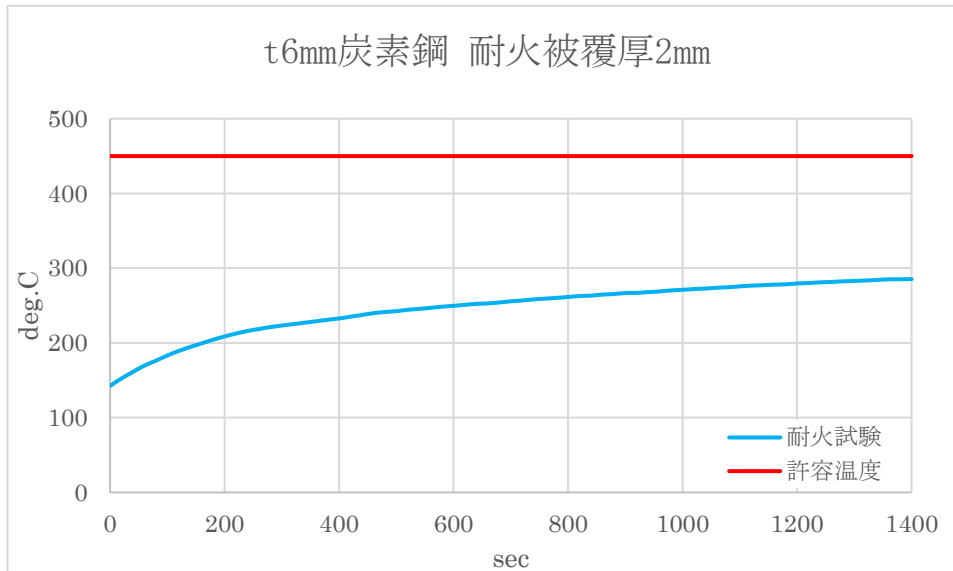
第 4-3 図 人員開口部周辺の塗装状況



第 4-4 図 防護ネット取付金物周辺の耐火被覆施工範囲図



第 4-5 図 防護ネット(車両用扉ネット)周辺の耐火被覆施工範囲図



※全ての飛来物防護対策施設を構成する部材を調査した結果から，最小板厚 6mm の耐火試験を実施している。

第 4-6 図 t6mm炭素鋼 耐火被覆厚 2mm の耐火試験結果

(2) 構造強度の評価

強度低下が発生した場合における部材に生じる単位面積あたりに生じる応力度とその許容応力の比率(応力度比)の評価結果を第 4-2 表に示す。常温時の最大応力度比に対し，航空機墜落火災による温度上昇によって，別添 5 で示した通り鋼材の有効降伏応力度が 2/3 に低下した場合であっても飛来物防護ネットの支持架構は，応力度比が 1 を下回っており，必要な構造強度が維持されていることを確認した。

第 4-2 表 飛来物防護ネットの評価結果

部位	最大応力度比 (常温)	最大応力度比*1 (450℃)
柱	0.35	0.53
大梁	0.24	0.36
小梁	0.37	0.55
トラス柱	0.29	0.43
鉛直ブレース	0.28	0.42
水平ブレース	0.14	0.21

注記 \*1: 引張, 圧縮, 曲げ, せん断の許容応力度



を 2/3 倍した際の応力度比を算出