

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外外火 04 R5
提出年月日	令和 3 年 6 月 25 日

設工認に係る補足説明資料

外部火災防護設計の基本方針に関する補足説明資料

航空機墜落による火災の防護設計について

修正作業中

目 次

1. 概要	1
2. 設計の基本的な考え方	1
3. 航空機墜落火災について	3
3.1 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定	3
3.2 航空機墜落火災と他の事象の組合せについて	3
4. 設計方針	3
4.1 航空機墜落火災の影響を考慮する部位	4
4.2 航空機墜落火災の影響を考慮する部位の分類	4
4.3 設計方針	5
4.4 その他の考慮	8
5. 評価方針	8
5.1 評価方針	8
6. 評価条件の設定	9
6.1 許容温度の設定	9
6.2 航空機墜落地点の設定	10
6.3 航空機墜落火災に対する防護設計の火炎条件	10
7. 離隔距離	11
8. 防護対策	12
8.1 耐火被覆	12
8.2 遮熱板	13
別添1 評価対象航空機の選定	
別添2 航空機墜落火災と他事象との重畳	
別添3 許容温度の考え方	
別添4 対流熱伝達	
別添5 離隔距離の算出	
別添6 耐火塗料の説明書	
別添7 耐火被覆厚さの設定の考え方	
別添8 耐火試験と大臣認定試験との比較	
別添9 施工管理	
別添10 維持管理	

1. 概要

本資料は、再処理施設及びMOX燃料加工施設の設計基準対処施設に対する、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による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「IV-1-1-1-4-5 外部火災防護における評価方針」
- ・再処理施設 添付書類「IV-1-1-1-4-6 外部火災防護における評価条件及び評価結果」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-5 外部火災防護における評価方針」
- ・MOX燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-6 外部火災防護における評価条件及び評価結果」

本資料では、考慮すべき外部火災の一つである航空機墜落火災について、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド（平成26年6月19日 原子力規制委員会）」（以下「外部火災影響評価ガイド」という。）及び「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率評価について（平成21年6月30日 原子力安全・保安院）」を参考として、航空機墜落火災に対する防護対象施設の設計の考え方のうち、航空機墜落火災における評価方針及び評価条件を補足する。

なお、本資料で示す航空機墜落による火災の防護設計については、再処理施設、MOX燃料加工施設及び廃棄物管理施設に係る今回申請対象以外の建屋や屋外構築物に対しても適用されるものである。

2. 設計の基本的な考え方

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

①航空機墜落火災の影響を考慮する施設は、事業許可変更許可書に基づき、以下のとおりとする。

- (a) 外部火災防護対象施設を収納する建屋
- (b) 屋外に設置する外部火災防護対象施設
- (c) 屋外に設置する外部火災防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設
- (d) 建屋に収納する外部火災防護対象施設のうち、航空機墜落火災による2次的影響を受ける施設

②航空機墜落火災の影響を考慮する施設は、建屋等の至近で火災が発生した場合を想定し、以下のとおりとする。また、航空機墜落火災の影響を考慮する施設は、航空機墜落火災により発生する高温空気及び熱ひずみの影響も考慮する。

- (a) 外部火災防護対象施設を収納する建屋（燃料加工建屋等）は、内包する外部火災防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。
- (b) 屋外の外部火災防護対象施設（冷却塔、主排気筒、屋外ダクト等）は、それらの有する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（飛来物防護ネット等）は、防護対象である外部火災防護対象施設（冷却塔等）に対して波及的影響を及ぼさない設計とする。

(d) 建屋に収納する外部火災防護対象施設のうち、航空機墜落火災による熱影響を間接的に受ける施設は、航空機墜落火災に対し、建屋開口部に設置されている飛来物防護板からの熱影響を考慮しても、その安全機能を損なわない設計とする。

③航空機墜落火災の影響を考慮する施設は、②の設計を達成するため、以下の観点で許容温度を設定する。

(a) 外部火災防護対象施設を収納する建屋は、建屋外壁が火炎からの輻射を受け温度上昇した場合においても、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こと及び建屋外壁が要求される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は、有する安全機能を損なわないために、機能維持に必要な部位を抽出し、部位毎に許容温度を設定する。このうち、支持架構は、安全機能に影響を与えないため、支持架構を構成する鋼材の強度低下が起こらない温度を許容温度とする。

(c) 波及的影響を及ぼし得る施設（飛来物防護ネット等）は、外部火災防護対象施設に波及的影響を及ぼさないため、支持架構の鋼材は一時的に強度低下が起こっても、倒壊及び脱落が生じない温度を許容温度とする。

(d) 建屋に収納する外部火災防護対象施設のうち、航空機墜落火災による熱影響を間接的に受ける施設は、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、部位毎に許容温度を設定する。

④航空機墜落火災の影響を考慮する施設の設計においては、③の許容温度を満足するため、火災源から遠ざかるほど熱影響が軽減される性質を踏まえた離隔距離の確保、もしくは熱容量が大きく温度が上昇しにくい厚さを有する部材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、耐火被覆や遮熱板等を組み合わせて防護する設計とする。防護対策は、以下の設計とする。

- ・ 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する。
- ・ 耐火被覆の施工範囲は、火災源からの影響を直接受ける部材は全て対象とし、輻射による影響を考慮する部材は、火災源から離隔距離を踏まえ、対象範囲を決定する。
- ・ 耐火被覆の塗装厚さは、支持架構の許容温度を踏まえ、施設毎に設定する。
- ・ 摺動部や耐火被覆が施工できない材質を有する部位は、耐火被覆の施工が困難であることから、輻射を遮るため、遮熱板を設置する。
- ・ 遮熱板及び耐火被覆による防護に当たっては、安全上重要な設備の安全機能に影響を与えないような設計とする。

3. 航空機墜落火災について

3. 1 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定

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

①航空機落下評価ガイドの落下事故の分類を踏まえ、自衛隊機又は米軍機の訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行する航空機から選定する。

②①のうち、外部火災ガイドに基づき、燃料積載量が最大の航空機と航空機墜落の発生する可能性が高い航空機を選定する

③②のうち、火災条件を同等に揃えた場合、施設への影響が大きい、燃焼時間が最も長い航空機を評価対象航空機とする。

上記のステップで選定した結果、F-16を評価対象航空機とした。抽出過程の詳細は別添-1参照。

3. 2 航空機墜落火災と他の事象の組合せについて

航空機墜落火災と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要否を決定する。

その結果、航空機墜落火災との組合せを考慮する必要がある自然現象として、風（台風）及び積雪といった長期荷重をもたらすもの、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。事象の選定に関する詳細検討は別添-2参照

※航空機墜落火災の影響として、防護ネットの損傷及び耐火被覆の損傷を想定する。

更に航空機墜落火災の影響が及ぶ期間として、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か月を想定する。

4. 設計方針

「2. 設計の基本的な考え」を踏まえ、航空機墜落火災の影響を考慮する施設の設計方針を示す。

火災から生じる輻射は火災源からの距離が増すと指数関数的に輻射強度が低下する性質を持つため、火災源から距離が確保されていれば、その温度上昇は限定的なものとなる。そのため、火災源からの距離を十分確保することは、設計上の重要な配慮事

項となる。しかし、再処理施設における航空機墜落火災は、施設の至近での発生を想定することから、十分な距離を確保することができない部位も生じる。

十分な距離を確保することができない場合における設計の配慮として、温度が上昇しにくい厚さを有する部材を選定することが考えられる。部材の厚さを十分確保できれば熱容量や損傷割合の関係から安全機能を維持することができる。

一方、航空機墜落火災の影響を考慮する施設は、耐震性も考慮し、構造体として成立させる必要がある。構成する部材の板厚等を厚くすると、耐震性確保のため基礎が大きくなり、施設の設置環境から成立が困難となることも考えられる。そのため、航空機墜落火災の影響を考慮する施設の設計においては、耐火被覆又は遮熱板等の防護対策も考慮し、これらを組み合わせ、外部火災防護対象施設の安全機能を維持する設計方針とする。

4. 1 航空機墜落火災の影響を考慮する部位

航空機墜落火災の影響を考慮する施設において、その機能を維持するために、航空機墜落火災の影響を考慮する部位を抽出する。

(a) 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により、建屋内に収納する外部火災防護対象施設の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ために必要となる部位として、建屋外壁を対象とする。

(b) 屋外に設置する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のに必要となる部位を対象とする。

冷却塔では、冷却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冷却水、冷却に必要な部位及びそれらを支持する支持構造物を対象とする。

(c) 屋外に設置する外部火災防護対象施設に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していることを評価するのに必要な部位として、竜巻防護対策設備では支持構造物を対象とする。

(d) 建屋に収納する外部火災防護対象施設のうち、航空機墜落火災による熱影響を受ける施設

後次回で申請予定

4. 2 航空機墜落火災の影響を考慮する部位の分類

「4. 1の航空機墜落火災の影響を考慮する部位」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を考慮する部位を以下の通り分類する。

(1) 建屋外壁

- (2) 冷却塔の冷却水温度
- (3) 冷却に必要な部位
- (4) 支持構造物

4. 3 設計方針

「4. 2 設計対象部位の分類」に基づき、設計方針を示す。

(1) 建屋外壁

設計対象施設のうち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外壁の温度上昇に対して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設計とする。また、外壁の許容温度を超える領域については、コンクリート強度低下等の損傷が想定されるが、建屋外壁で想定される損傷を考慮したとしても、建屋外壁に要求される機能を損なわない設計とする。

(2) 冷却塔の冷却水温度

安全冷却水系の機能である再処理施設の各施設の溶液等から発生する崩壊熱の除去に必要な冷却水温度となる設計とする。

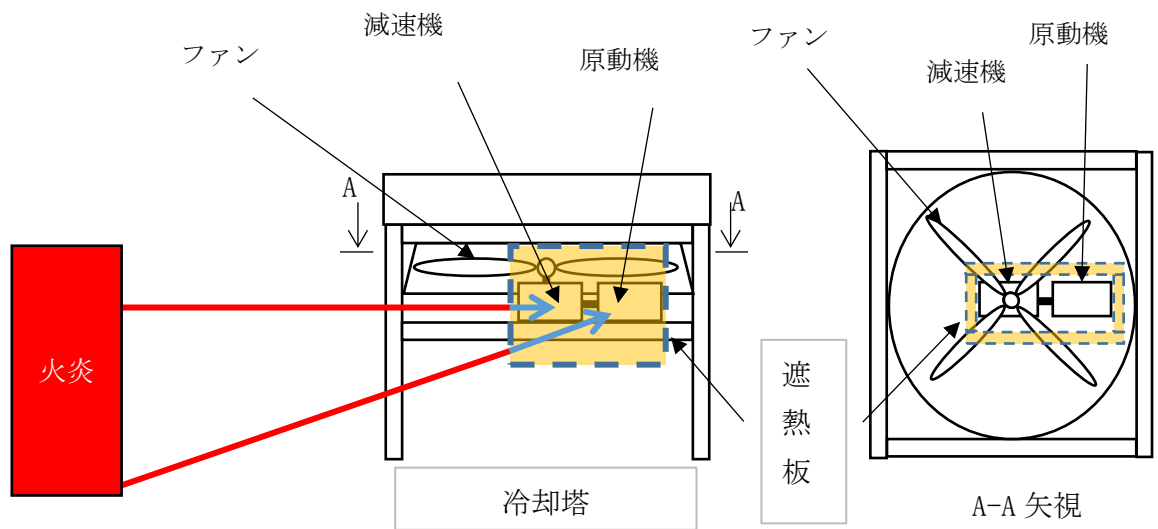
(3) 冷却に必要な部位

冷却に必要な部位の許容温度は、部位毎に運転継続するための設計温度が設定されているものが多く、その設計温度は低いものが多いことから防護対策を施すことで許容温度を満足することを基本とする。

冷却に必要な部位のうち、耐火被覆が施工できない材質や摺動部を有する部位は耐火被覆を施工できないことから、遮熱板により輻射を遮る設計とする。

遮熱板は、防護対象とする部位への輻射を遮断する機能を有しており、火炎からの輻射を遮る設計とする。

遮熱板の設計の概要を第4-1図に示す。



第 4 - 1 図 遮熱板の設計の概要図

(4) 支持構造物

支持構造物である支持架構は、構造健全性を維持する設計とすることから、構成する柱・梁等の鋼材の強度が構造健全性を維持することができる温度を許容温度とし、許容温度以下となる火炎からの距離を設定する。

具体的には、支持架構を構成する鋼材であるH型鋼や角型鋼管等の形状、厚さ等の仕様を調査した結果から、鋼材の厚さをパラメータとした平板モデルとして評価することで、保守的に評価することができることから、鋼材の厚さごとに許容温度以下とすることができる離隔距離を設定する。

離隔距離を確保できない場合においては、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設計とする。設定した離隔距離は火炎柱の高さ方向も対象とする。

耐火被覆は許容温度毎に必要な厚さを定める。必要な厚さは、代表部材として9 mmの鋼板が火炎から直近の輻射強度を受けた場合でも許容温度以下となる厚さを定め、火炎からの距離にかかわらず離隔距離を確保できない範囲に同様の厚さで施工する設計とする。

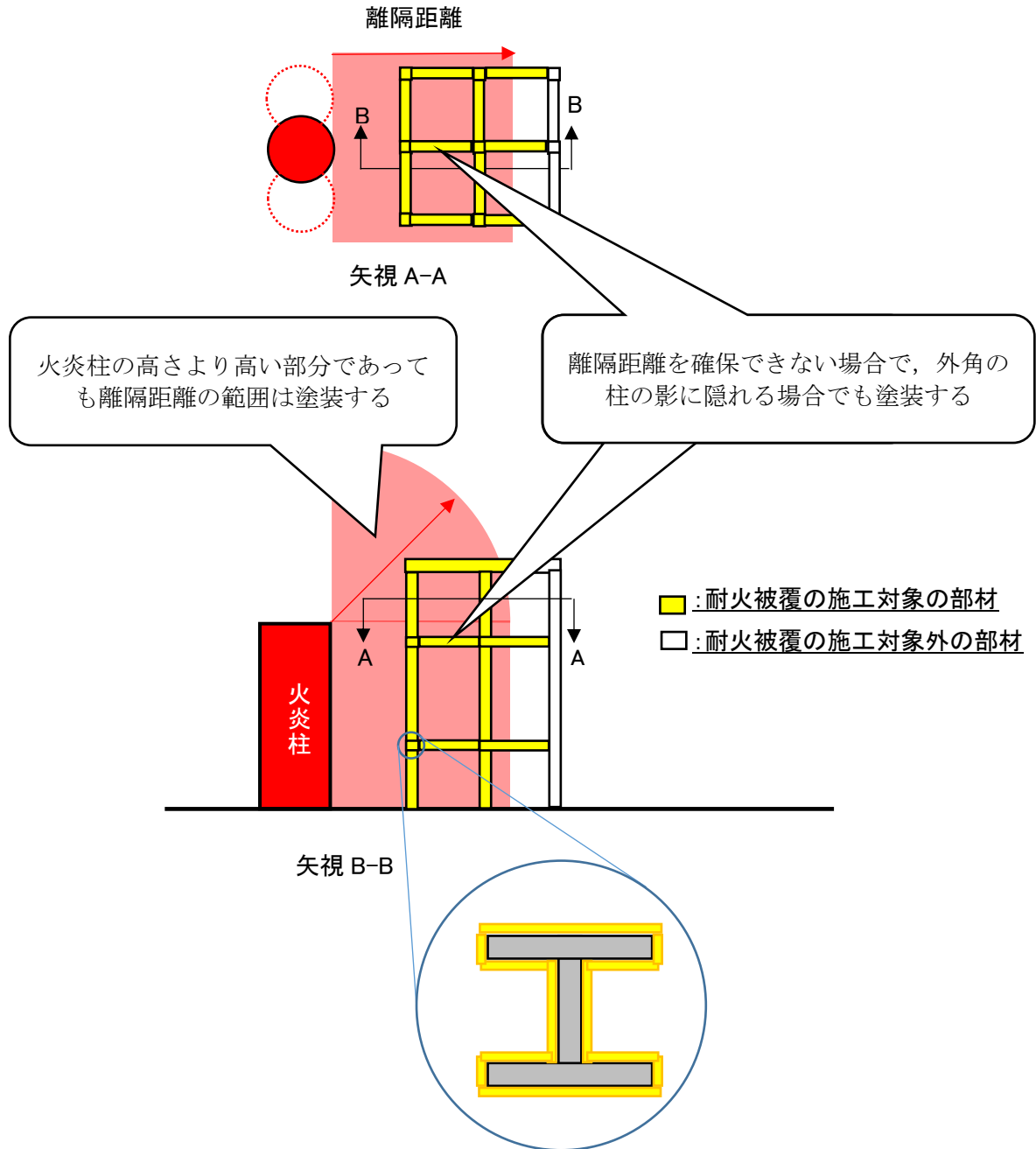
第 4 - 2 図に耐火被覆の施工範囲の考え方の概要を示す。

評価に用いる許容温度は、外部火災防護対象施設では 325℃と設定し、外部火災防護対象施設へ波及影響を与える施設では 450℃に設定する。許容温度の設定の考え方は別添 - 3 参照。

また、許容温度を満足させるために必要な耐火被覆厚さは、「8. 1 耐火被覆」から、325℃以下とするのに必要な厚さは3 mmに設定し、450℃以下とするのに必

要な厚さは2mmに設定する。

波及的影響を考慮する施設については、許容温度において、一時的な強度低下が起こることから、強度低下が起こっても、構造健全性が維持されている設計とする。



第4-2図 耐火被覆の施工範囲の概要

4. 4 その他の考慮

航空機墜落火災を施設の至近で想定することにより考慮すべき事項として、発生する高温空気による影響についても、冷却塔の冷却性能に影響を及ぼすことはないことを確認した。(別添-4 参照)

同様に、温度差による熱ひずみによる影響についても検討した。温度差による影響は、火災に近い部位と遠い部位が存在する支持架構で検討する。温度差により発生する熱応力は、変位制御型の2次応力に分類される。2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。ここでは、冷却塔の支持架構の支持機能が維持されていることを確認する。

確認に当たっては、部材レベルと構造体レベルで確認する。

部材レベルとしては、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、その影響を確認する。部材の面によって、輻射の受け方が異なるが、有意な変形が生じないことを確認した。

構造体レベルとしては、耐火被覆の施工の有無の強化で温度差が生じる可能性があるため、その影響を確認する。耐火被覆の有無により、支持架構の構造体健全性に影響を及ぼすような変形が生じないことを確認した。

5. 評価方針

5. 1 評価方針

「4. 3 設計方針」で設定した設計を達成するため、航空機墜落火災から受ける輻射に対する評価を実施する。評価の詳細は別紙-1, 2 及び3 参照。

(1) 建屋外壁

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

(2) 冷却塔の冷却水温度

冷却塔内に設置されている冷却水を通水する流路(管束を除く)は、航空機墜落火災から与えられた熱量による温度上昇を評価し、各施設の溶解液等から発生する崩壊熱の除去に必要な温度以下となるよう設計する。

(3) 冷却に必要な部位

冷却に必要な部位は、防護対策施工後の温度上昇を評価し、運転継続するために必要な許容温度以下となるよう設計する。

(4) 支持構造物

冷却塔、飛来物防護ネット等の支持架構は、その構造健全性が維持される設計であることを達成するため、支持架構を構成する柱、梁等の鋼材の温度上昇を評価し、許容温度以下となる設計とする。

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が許容温度以下とするために必要な離隔距離を算出し、火災源と評価対象部材の距離（以下「実距離」という）を比較する。算出された離隔距離を実距離が下回る部材は、許容温度を超過することになるため、耐火被覆を施工する。

波及的影響を考慮する施設については、強度低下後においても、構造健全性が確保されている設計とする。

6. 評価条件の設定

航空機墜落火災に対する評価条件を設定する。

6. 1 許容温度の設定

(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、「高温における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究」に基づき、常温時のコンクリートの強度が維持される温度（200℃）を許容温度として設定する。コンクリートの許容温度の設定に関する考え方の詳細は別添－3参照。

(2) 冷却水の許容温度

航空機墜落火災からの熱量による温度上昇を考慮した上で、各施設の溶解液等から発生する崩壊熱の除去に必要な温度とする。

(3) 冷却に必要な部位

冷却に必要な部位は、その部位の設計温度を許容温度とする。

(4) 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。

長期許容応力度相当を満足することで、航空機墜落火災において、防護対象施設が求められる機能は維持できるが、安全機能を有する冷却塔は、その施設の重要度を考慮し、より厳しい評価となるよう設計強度に影響を及ぼさない温度を許容温度として設定する。鋼材の許容温度の設定に関する考え方の詳細は別添－3参照。

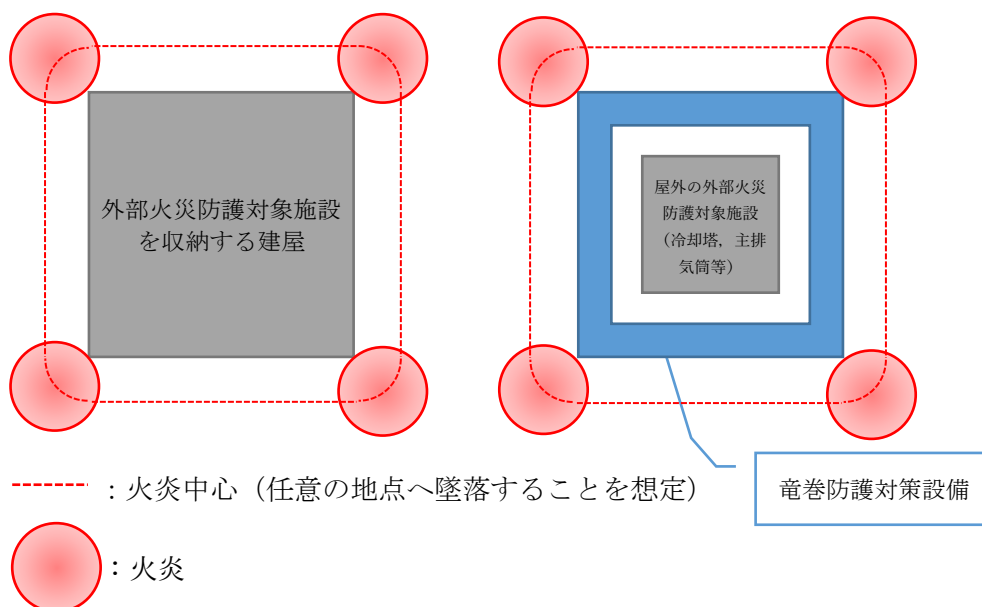
第6－1表に、設定した許容温度を示す。

第6-1表 設定した許容温度

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

6. 2 航空機墜落地点の設定

航空機の墜落地点については、建屋等の直近の熱影響が厳しいどのような地点へ墜落した場合でも、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ことから、第6-1図のように、屋外の外部火災防護対象施設又は外部火災防護対象施設を収納する建屋に接する任意の位置に円筒火炎を設定する。



第6-1図 設計上想定する航空機の墜落地点のイメージ (平面図)

6. 3 航空機墜落火災に対する防護設計の火炎条件

「3. 1 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定」にて選定した評価対象航空機から、外部火災ガイドに基づき第6-2表のとおり航空機墜落火災における火災源のモデルを設定した。

- ①航空機の墜落によって燃料に着火し、火災が起こることを想定する。
- ②気象条件は無風状態とする。
- ③輻射強度を計算により求めるため、火炎の高さを半径の3倍にした円筒火炎モデルを採用する。

第6-2表 航空機墜落による火災源の設定

	設定条件	備考
対象航空機	F-16	
評価モデル	円筒火炎	外部火災ガイドによる
円筒半径[m]	5.4	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

7. 離隔距離

支持構造物が許容温度を満足することを確認するための離隔距離表を第7-1表に示す。離隔距離を満足していない部材は耐火被覆を施工する。離隔距離の詳細な算出過程は別添-5参照。

第7-1表 離隔距離表

材料	板厚 (mm)	必要離隔距離(m)	
		安全上重要な 施設	波及的影響を 及ぼし得る施設
炭素鋼	36	1	0
	28	2	0
	22	3	1
	19	5	1
	15	7	3
	14	7	3
	13	8	4
	12	9	4
	11	9	5
	10	—	6
	9	11	7
	8	12	8
	6.5	14	9
	6.4	14	9
	6	15	10
	4.5	18	12
	3.91	19	13
	3.9	19	13
3.2	20	15	
2.3	23	16	
2.11	23	17	
1.2	25	19	
ステンレス鋼	20	4	1
	16	6	2
	12	8	4
	9	11	6

8. 防護対策

8. 1 耐火被覆

(1) 耐火被覆の設計

耐火被覆は、火災の熱により数mm厚の耐火被覆が、火災時には数十倍に発泡して断熱層を形成し、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。

耐火被覆の設計に対する基本的な考え方は以下の通り。耐火被覆の詳細は別添－6 参照。

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

安全上重要な施設である冷却塔等は3mm、波及的影響を及ぼし得る施設である飛来物防護ネット等は2mmとする。塗装厚さの設定に関する詳細は別添－7 参照。

航空機墜落火災対策の被覆厚さを設定するための熱伝導率の設定には、大臣認定試験の結果を用いている。大臣認定試験及び航空機墜落火災の耐火試験についての比較の詳細は、別添－8 参照。

(2) 塗装対象範囲

第7－1表に基づき、離隔距離を実距離が下回る鋼材、防護板及び遮熱板に対し、耐火被覆を施工する。

耐火被覆施工後の鋼材、防護板及び遮熱板は許容温度を満足していることを確認した。

飛来物防護ネットについては、防護ネットの機能を損なわないよう、ネットの作動に影響を与えない範囲に塗装する。

ネットの作動に影響を与えないこととするため、ネット自体への塗装はしない設計とする。

(3) 施工管理

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

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

詳細を別添－9に示す。

(4) 維持管理

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

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

詳細を別添-10に示す。

8. 2 遮熱板

(1) 遮熱板の設計の基本的な考え方

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

(2) その他

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

令和3年6月16日 R2

別添－1

評価対象航空機の選定

目 次

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

1. はじめに

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

2. 評価対象航空機の選定

2. 1 選定の考え方

熱影響評価の対象航空機の選定に当たっては、「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」（以下、「航空機落下評価ガイド」という）の落下事故の分類を踏まえ、自衛隊機又は米軍機の訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行する航空機から、複数の評価対象航空機を選定する。

評価対象航空機の選定に当たっては、以下を考慮する。

① 積載燃料が最大の航空機：

外部火災影響評価ガイド（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 航空機墜落：

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

(1) 積載燃料が最大の航空機

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

第2-1表より、燃料積載量が最大となるKC-767を選定した。

(2) 航空機墜落

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

第2-1表 主要航空機の保有数・性能諸元

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

出展：令和元年度 防衛白書等

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

第2-2表 自衛機又は米軍機の訓練飛行回数の調査結果

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

2.2 評価対象航空機の選定結果

選定結果を第2-3表に示す。また、上記(1)及び(2)に加え、今後訓練飛行を行う主要な航空機となる可能性のあるF-35についても、評価対象航空機として選定することとする。

第2-3表 選定した航空機と燃料積載量

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

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

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

[3] NASA. "Analysis of NASA JP-4 Fire Tests Data and Development of a Simple Fire Model". NASA Contractor Report. 1980, CR-159209.

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

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

3. 熱影響評価の対象航空機の選定

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

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

算出した燃焼継続時間及び輻射強度から、熱影響評価の対象航空機を選定する。

3. 1 燃焼継続時間の算出

(1) 燃焼面積の設定

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

第3-1表 選定航空機の燃焼面積^{[1][2][3][4]}

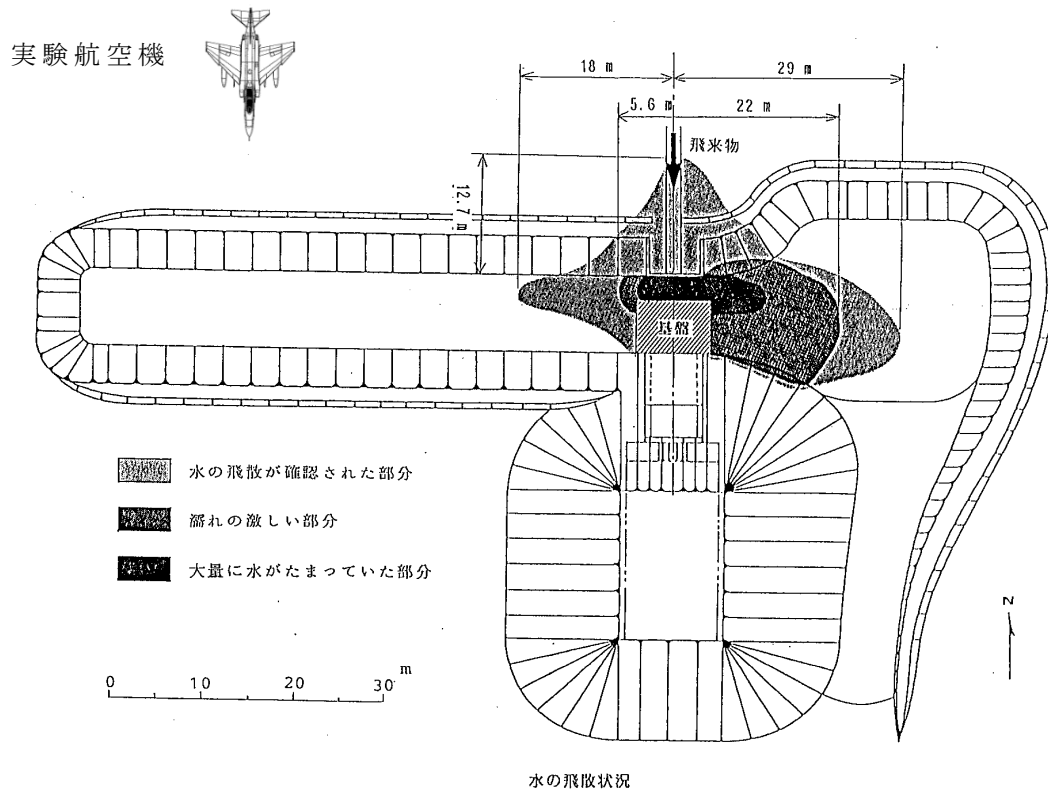
	投影面積 [m ²]
KC-767	約 1500
F-2	約 110
F-16	約 90
F-35	約 110

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

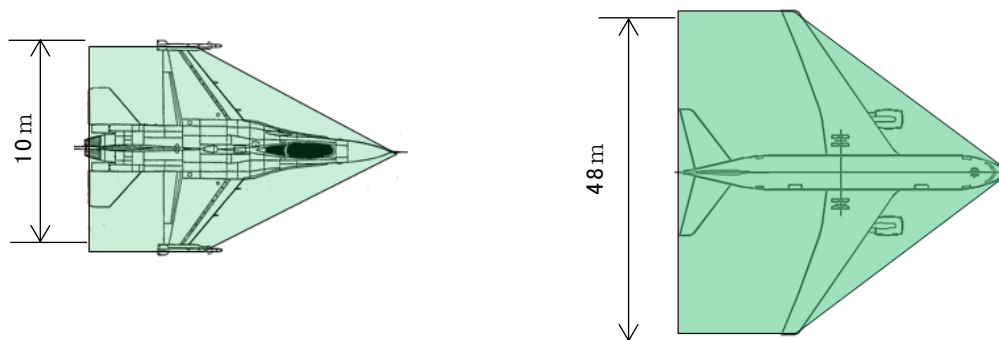
[2] Paul.Jackson. ed. Jane's All the World's Aircraft 1997-98. Jane's Information Group, 1997.

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

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



第3-1図 実物航空機の衝突実験時の模擬燃料（水）



第3-2図 航空機の機体投影面積（左図：F-16，右図：KC-767）

(2) 燃焼時間の算出

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

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

上記データ及び下式より，第3-2表に示すように，燃焼時間はKC-767及びF-2が約1,200秒，F-16が約1,400秒及びF-35が約1,300秒である。

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

ここで，

t ：燃料時間（s）

V ：燃料積載量（ m^3 ）

A ：燃焼面積（ m^2 ）

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

第3-2表 対象航空機の燃焼に関する条件

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

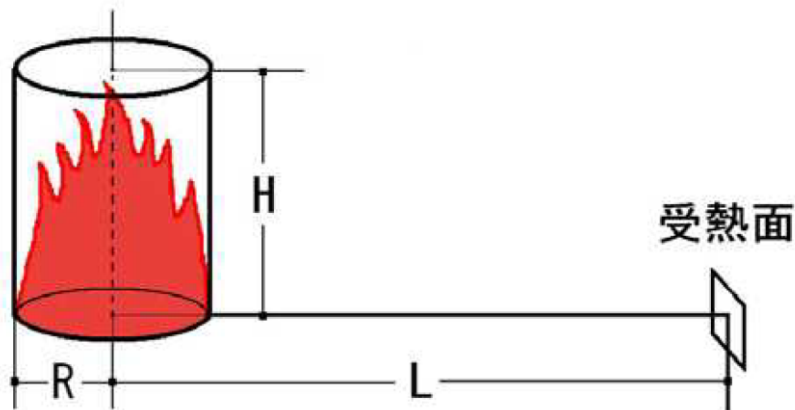
[1] 日本火災学会編．火災便覧 新版，共立出版，1984．

3.2 輻射強度の算出

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

- ・航空機墜落による火災は，円筒火炎を生ずるものとすることから，円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は，航空機の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，外部火災影響評価ガイドと同様に受熱面が輻射帯の底部と同一平面状にあると仮定し実施する。航空機墜落による火災の想定模式図を第3-3図に示す。



受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

第3-3図 航空機墜落による火災の想定模式図

a. 形態係数の算出

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

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

ただし，

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

ここで，

ϕ : 形態係数

L : 離隔距離 (m)

H : 火炎の高さ (m)

R : 燃焼半径 (m)

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

b. 受熱面における輻射強度の算出

輻射強度は外部火災影響評価ガイドを参考として、下式より算出する。

算出結果を第3-3表に示す。

$$E = Rf \cdot \phi$$

ここで、

E : 輻射強度 (W/m^2)

Rf : 輻射発散度 (W/m^2)

ϕ : 形態係数

第3-3表 対象航空機の輻射強度算出のためのパラメータ

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

3. 3 熱影響評価の対象航空機の選定結果

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

第3-4表 対象航空機の輻射強度及び燃焼時間の比較

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

令和3年6月25日 R4

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影響	7
5. まとめ	9
6. 参考文献	8

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ことが要求されている。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，事業変更許可等において再処理施設及びMOX燃料加工施設（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。

- ◆ 地震
- ◆ 風（台風）
- ◆ 竜巻
- ◆ 降水
- ◆ 落雷
- ◆ 森林火災
- ◆ 高温
- ◆ 凍結
- ◆ 火山の影響
- ◆ 積雪
- ◆ 生物学的事象
- ◆ 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因果関係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因果関係

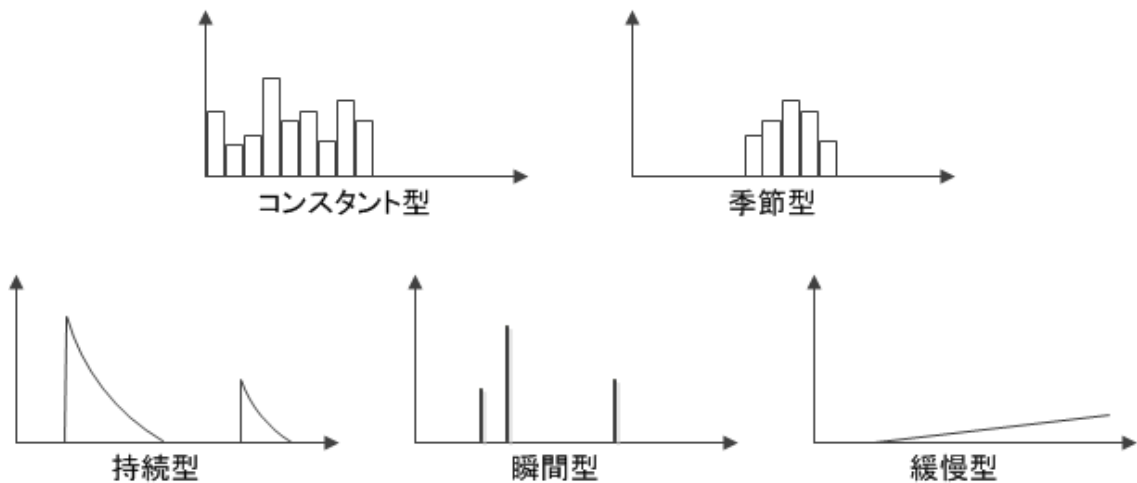
自然現象	検討結果
地震	<ul style="list-style-type: none"> 航空機墜落又は航空機墜落火災により地震が誘発されることは考えられない。 地震による影響は、飛行中の航空機に影響を及ぼすことはなく、地震が航空機墜落を誘発することは考えられない。
風 (台風)	<ul style="list-style-type: none"> 航空機墜落又は航空機墜落火災により風(台風)が誘発されることは考えられない。 風(台風)が飛行中の航空機に影響を及ぼすことは考えられるが、台風を事前に予測して航空機の運航計画を見直すことができることから、風(台風)が航空機墜落を誘発することは考えられない。
竜巻	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。
降水	<ul style="list-style-type: none"> 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。 降水が航空機墜落を誘発することは考えられない。
落雷	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。
森林火災	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。
高温	<ul style="list-style-type: none"> 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。 高温が航空機墜落を誘発することは考えられない。
凍結	<ul style="list-style-type: none"> 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。 凍結が航空機墜落を誘発することは考えられない。
火山の影響	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。
積雪	<ul style="list-style-type: none"> 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。 積雪が航空機墜落を誘発することは考えられない。
生物学的事象	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。
塩害	<ul style="list-style-type: none"> 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。 塩害が航空機墜落を誘発することは考えられない。

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影響の厳しい事象が重畳することは稀であることから、基本的には航空機墜落火災と2.の(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)のa.の検討の結果から、航空機墜落又は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。

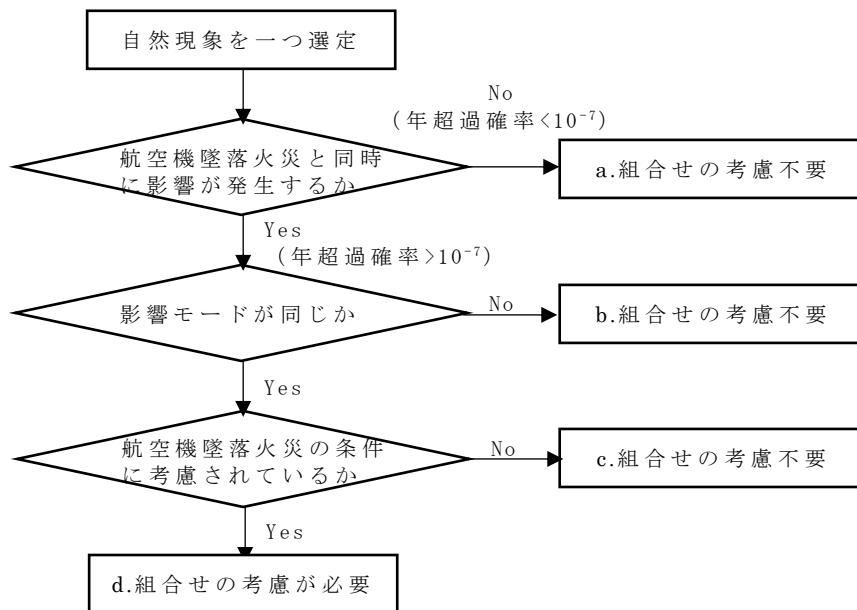
(3) 発生頻度、影響モード等の考慮

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。

- ◆ 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 ⇒ 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。

※ 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。

- ◆ 航空機墜落火災と同一の影響モードが考えられるか ⇒ 航空機墜落火災による熱影響，熱影響による強度低下のいずれにも影響しない場合は考慮不要とする。
- ◆ 航空機墜落火災の影響評価条件に考慮されているか ⇒ 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要否の検討フロー

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 4.6×10^{-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 4.6×10^{-14} ※とごく低頻度である。	否 (a.)
風 (台風)	航空機落下確率は 4.6×10^{-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 4.6×10^{-8} ※, 竜巻の年超過確率は 1.86×10^{-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 8.6×10^{-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 4.6×10^{-8} ※, 火山の年超過確率は 5.5×10^{-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 2.5×10^{-13} ※とごく低頻度である。	否 (a.)
積雪	航空機落下確率は 4.6×10^{-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	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。MON 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影響

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そ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⁽¹⁾⁽²⁾と考えられる。仮に航空機墜落火災が発生し、屋外の外部火災防護対象施設及びその外殻となる竜巻防護対策設備の支持架構が常温に戻るまでに1日程度の時間を要するとしても、航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に地震又は火山の影響がもたらされる年超過確率は以下のとおりであり、その可能性は十分に小さい。

- ◆（航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に地震の影響が発生する年超過確率）

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

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

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

- ◆（航空機墜落火災の影響が及ぶ期間に火山の影響が発生する年超過確率）

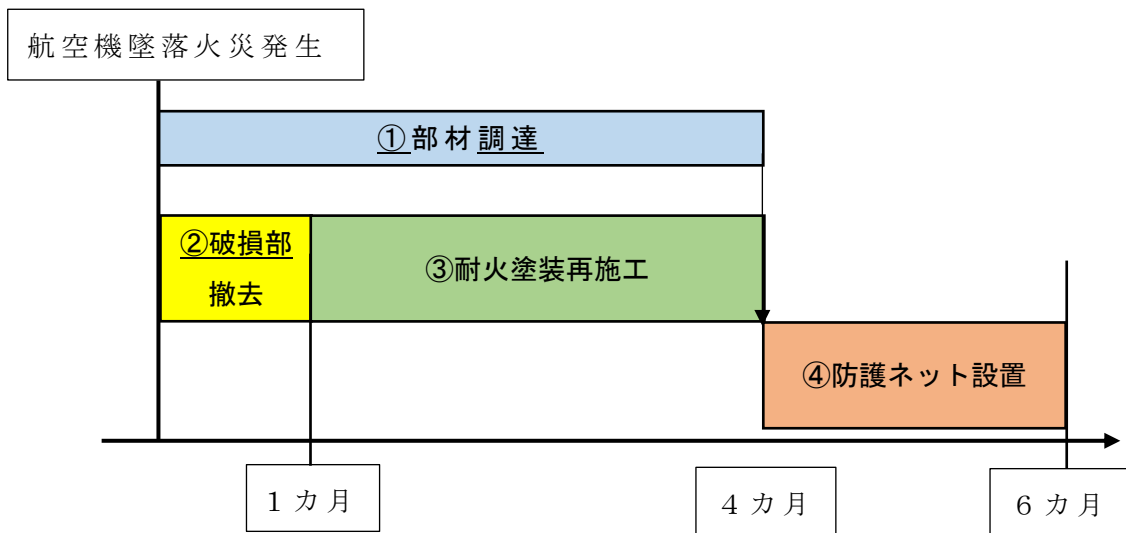
$$= (\text{航空機墜落確率}) \times (\text{1年のうち航空機墜落火災の影響が及ぶ期間の比率}) \times (\text{火山の年超過確率})$$

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

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

次に、航空機墜落火災が発生した場合で、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～十数枚程度が損傷するとともに、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、その期間に竜巻が発生する年超過確率は以下のとおりであり、その可能性は十分に小さい。

また、工事は初期設置と同様の手法を用いることから、特別な荷重は加わらず、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）

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

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

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

以上のことから、航空機墜落火災の発生後、その影響が及ぶ期間において地震、竜巻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。

万一、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影響検討、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3年6月16日 R1

別添-3

許容温度の考え方

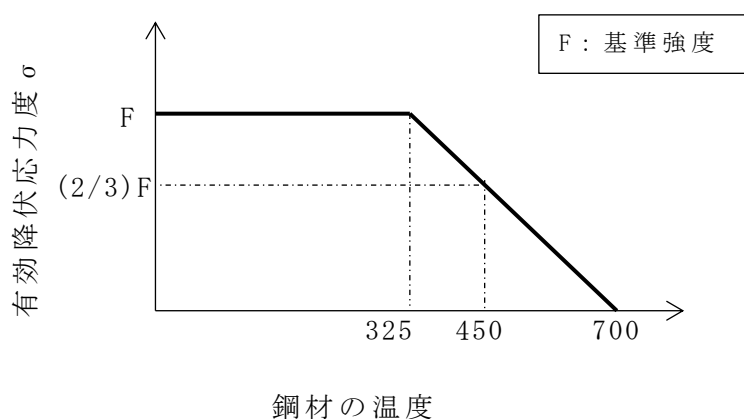
目 次

1. 鋼材の許容温度	1
2. コンクリートの許容温度	2

1. 鋼材の許容温度

一般的に、鋼材は温度上昇に伴い強度が低下する。しかし、その高温強度に対する公的規格は存在していない。一方、文献[1][2]によると、鋼材の高温時における有効降伏応力度は以下の式により近似され、第1-1図のように表される。

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



第1-1図 鋼材の高温時の有効降伏応力度

ここで、支持機能を期待する鋼材の評価にあたり、航空機墜落火災と組み合わせるべき荷重を、発生頻度が極めて小さい地震および竜巻による荷重を除き、自重、風荷重、積雪荷重とした。これら重畳する荷重に対して、第1-1図のように鋼材の有効降伏応力度が低下した場合においても、外部火災防護対象施設が耐え得る設計とする。

飛来物防護ネットの支持架構については、至近での航空機落下火災を想定すると鋼材への大きな熱負荷が想定されることから、鋼材の有効降伏応力度が2/3程度まで低下することを考慮し、第1-1図より、450℃を鋼材の許容温度とした。

一方、安全上重要な施設の支持機能を期待する鋼材については、その施設の重要度を考慮し、航空機墜落火災においても強度

が低下しない設計とし、第 1 - 1 図より、有効降伏応力度が常温時と変わらない 325℃を許容温度として設定した。

なお、発電用原子力設備規格 設計・建設規格（一般社団法人日本機械学会）において鋼材の制限温度を 350℃としており、安全上重要な施設の支持機能を期待する鋼材の許容温度を 325℃とすることは、この制限温度を踏まえも妥当であると判断する。

第 1 - 1 表に、設定した許容温度を示す。

第 1 - 1 表 設定した許容温度

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

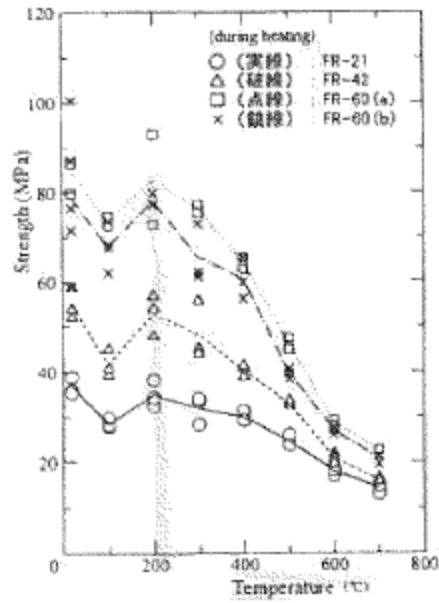
[1] 2001 年版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説，国土交通省住宅局建築指導課他

[2] 建築火災のメカニズムと火災安全設計，日本建築センター

2. コンクリートの許容温度

「高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究」に基づき、常温時のコンクリートの強度が維持される温度（200℃）を許容温度とする。

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



出典：高温における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究(日本建築学会構造系論文集 第515号 163-168 1999年1月)

第2-1図 温度変化によるコンクリート圧縮強度の低下

令和3年6月16日 R2

別添－4
対流熱伝達

修正作業中

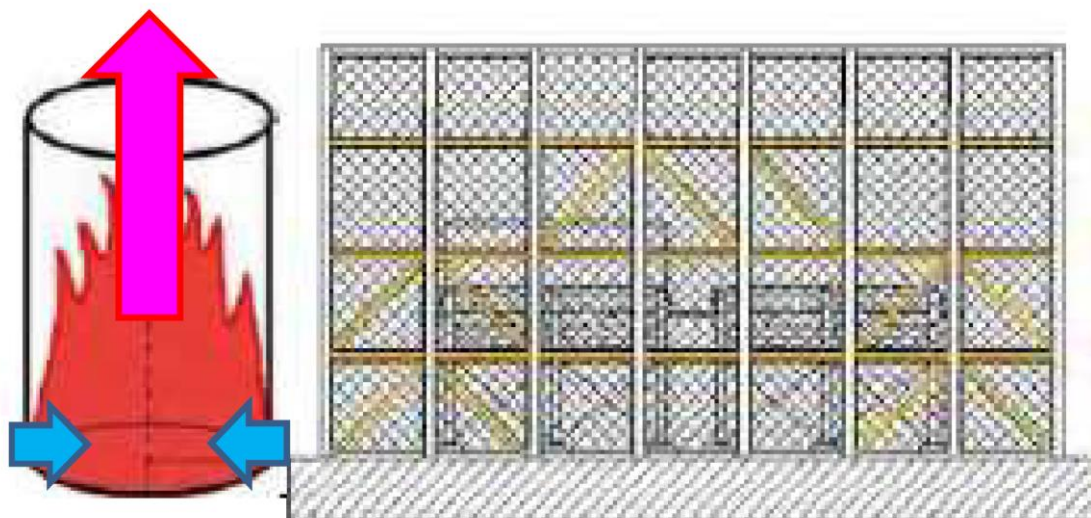
目次

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

1. はじめに

本資料は、航空機墜落火災により発生する高温空気が、対流熱伝達により吸込み空気に流入し、冷却塔本体へ影響を与えないことを説明するものである。

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



第1-1図 火災時の空気流れイメージ

2. 影響の検討

(1) 解析による影響検討

プール火災の周囲の風速と温度の分布について、Fire Dynamics Simulator（以下「FDS」という。）というアメリカ国立標準技術研究所の開発した、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、米国NRCに認証された火災シミュレーションソフトを用いる。

本解析の解析条件を第2-1表に、着火後の火炎柱付近の風速データを抽出した結果を第2図に、火炎柱付近の温度データを抽出した結果を第2-2図に示す。

第2-1図より、火炎柱中心では10m/s以上、最大約30m/sの上昇流が発生し、火炎柱に隣接する空間では、火炎柱に向かって周囲の空気を巻き込む流れが発生することが確認できる。また、火炎柱下部において、火炎柱から周辺に向かって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、影響を及ぼすことはないと考えられる。

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

影響を及ぼすことはないと考えられる。

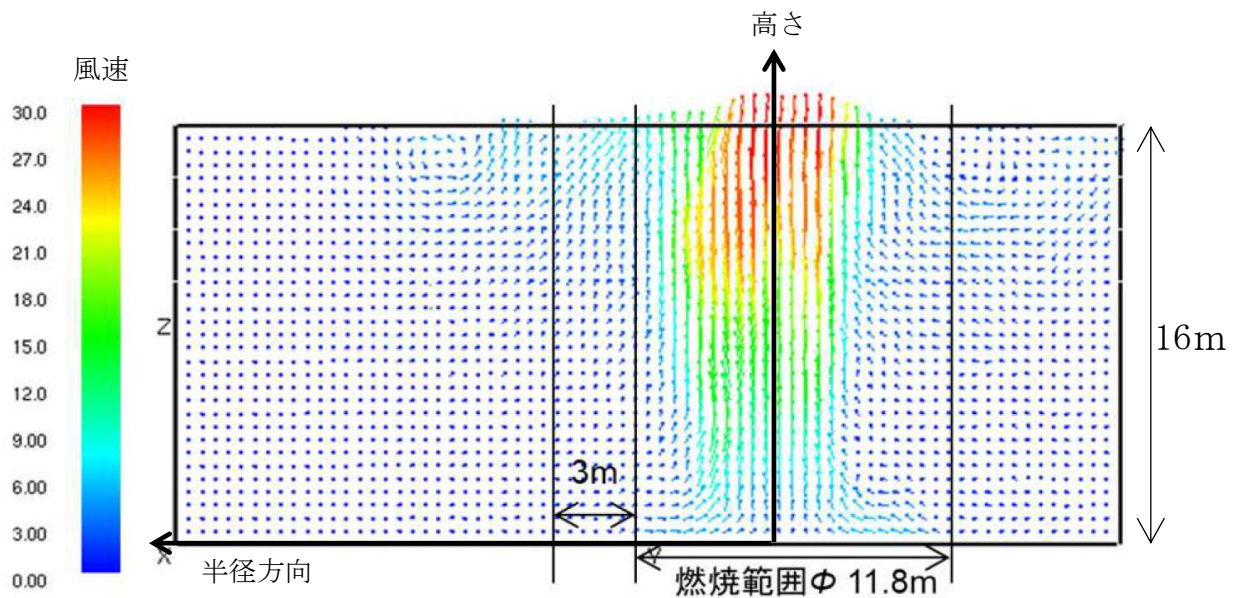
なお、データの取得は、火炎が安定した状態での開放空間での風況及び温度分布であり、燃焼時間により風況及び温度分布に大きな違いは生じない。

第2-1表 プール火災を対象とした火災シミュレーションの設定条件

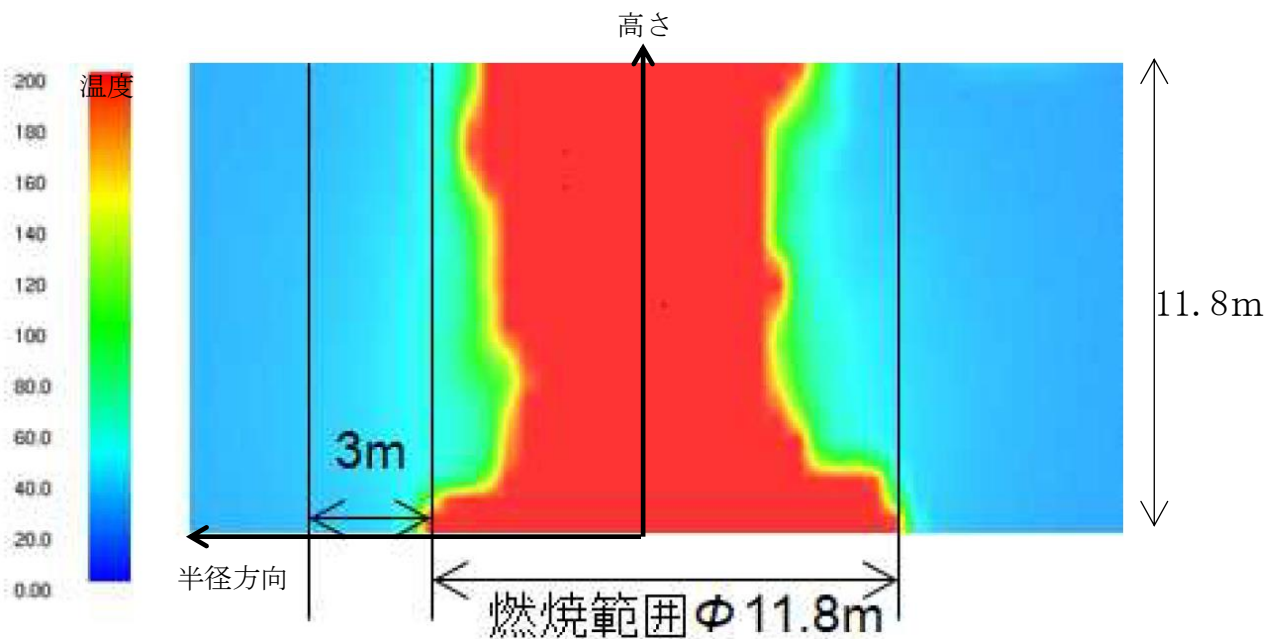
項目	値	単位	備考
燃焼面積	110	m ²	火炎の挙動を把握することを目的とするため、火炎の挙動が把握できるF-2の解析を用いる。
燃料積載量	10.4	m ³	F-2の燃料積載量から設定。
燃焼速度	8.0×10 ⁻⁵	m/s	日本火災学会編. 火災便覧 新版, 共立出版, 1984.
燃焼時間	1200	s	燃料積載量÷燃料面積÷燃焼速度
燃料組成	ペンタン	—	ガソリン, ナフサのうち入気温度が高くなるナフサの値がFDSのライブラリに存在しないため、燃焼挙動の近く、物性値の取得が可能なペンタンのデータ※を使用した。
燃料プール形状	円形	m	外部火災影響評価ガイド
燃料プール半径	約5.9	m	半径計算値
外部風速	0	m/s	外部火災影響評価ガイド
外部風向	—	—	外部火災影響評価ガイド
初期温度	29	℃	設計外気温

※ 以下の文献から、ペンタンがナフサと同じ特徴を持つとの知見を得ている。

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).



第2-1図 火炎柱近傍における風速データ (単位系: m/s)

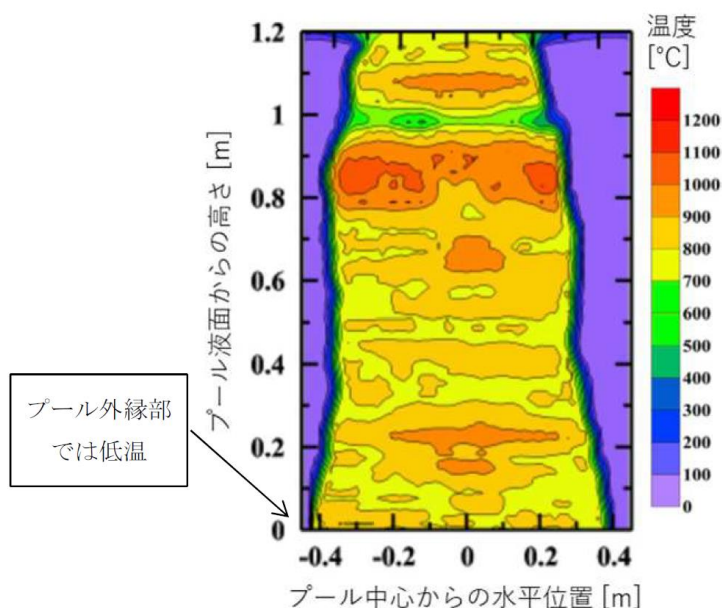


第2-2図 火炎柱近傍における温度データ (単位: °C)

(2) 既往の文献からの影響検討

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

合するものである。



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

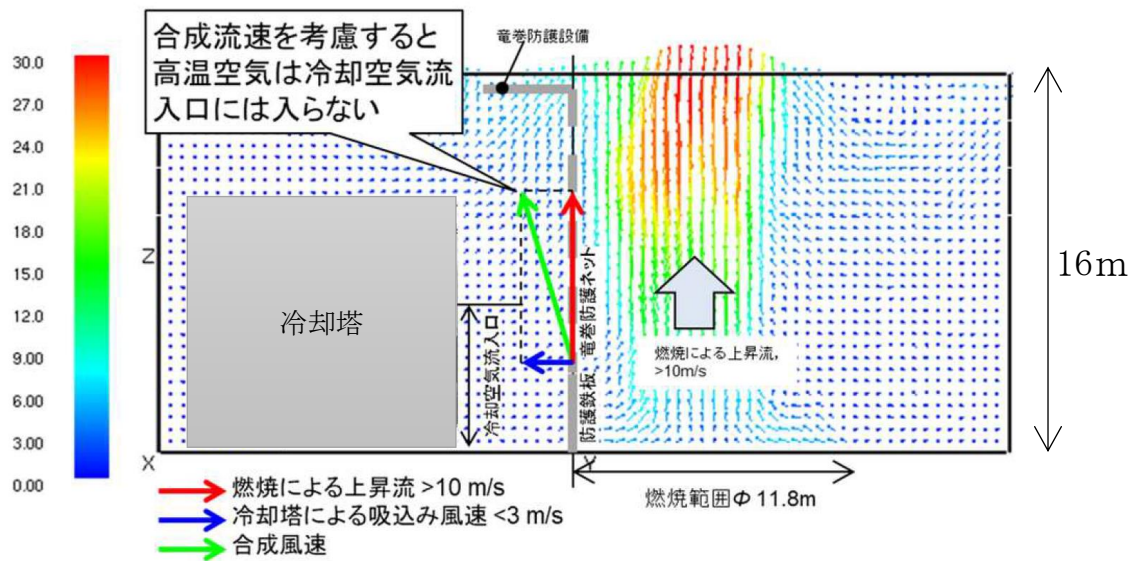
※ 風速0.5~1.0m/sの屋外にて、雰囲気温度・燃料初期温度33°Cの環境下において、金属容器に燃料としてヘプタンを入れて発火させ、プール火災を模擬し、50mm間隔で配置した熱電対にて温度を測定した試験。

(3) 冷却塔の運転状態を考慮した影響検討

使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設用 安全冷却水系冷却塔Bを例として、火災による高温空気が冷却塔に吸い込まれる可能性について検討した(第2-4図参照)。検討においては、前提条件を以下のように設定した。

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

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



第2-4図 火災による高温空気の冷却塔への流入可能性の検討

3. 結論

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

運用についての記載を検討中

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

別添－5

支持構造物の評価（離隔距離表の作成）

修正作業中

目 次

1. 支持構造物の評価の方針について	1
2. 必要離隔距離を算出する際の代表形状	1
3. 必要離隔距離の算出条件	2
4. 必要離隔距離の算出方法	3
4. 1 輻射強度の算出	3
4. 2 必要離隔距離の算出	5
5. 必要離隔距離の算出結果	7
6. 計算の妥当性について	8

1. 支持構造物の評価の方針について

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

必要離隔距離の算出は、屋外に設置する外部火災防護対象施設及び竜巻防護対策設備を構成する部材を調査し確認された主要な形状、材質及び板厚を踏まえ、保守的な代表形状の選定、評価条件を設定し実施する。

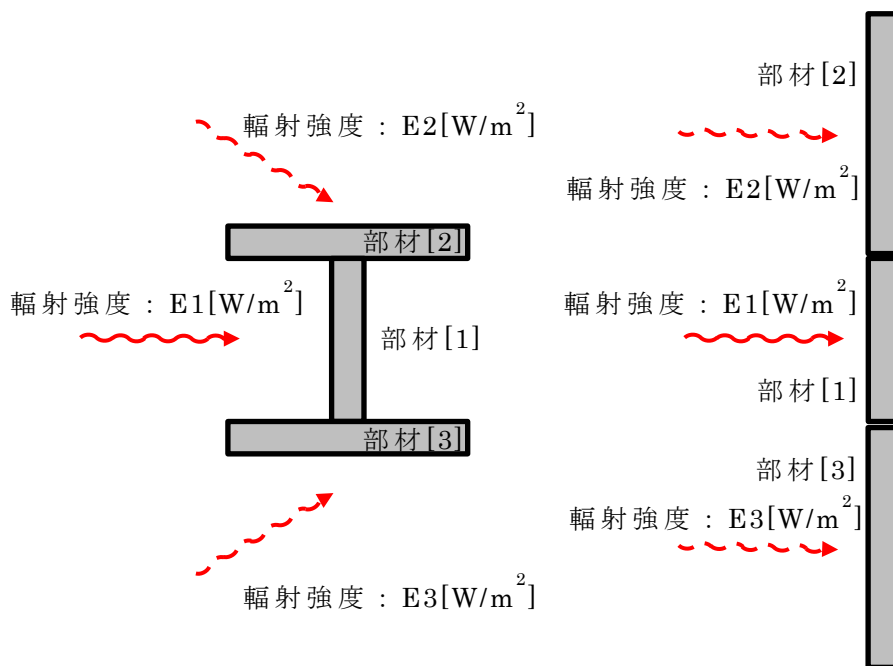
2. 必要離隔距離を算出する際の代表形状

必要離隔距離を算出する上で、形状は評価結果に大きな影響を与えるため、輻射を与えた場合に温度上昇が最大となる形状で離隔距離を評価する。屋外に設置する外部火災防護対象施設及び竜巻防護対策設備を構成する部材を調査し確認された平板、角管、円管及びH鋼形状から代表となる形状を選定する。

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

H鋼に入射する輻射は第2-1図の左図のように、火炎柱から発生する輻射のうち受熱面を見込むすべての輻射を合成した輻射強度E1、斜め方向からの輻射成分のみの輻射強度E2、E3となる。この場合、 $E1 > E2$ 及び $E3$ の関係となる。そのため、H鋼を右図のように展開し、平板として考えると、輻射強度の関係から部材[1]から部材[2]及び部材[3]への温度勾配が発生することとなり、平板をE1で評価した場合と比べて平板の温度は低下することとなる。この考え方は角管、円管においても同様となる。

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



第 2 - 1 図 代表形状の考え方

3. 必要離隔距離の算出条件

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

第 3 - 1 表 支持構造物の部材の条件

項目	条件	備考
形状	平板	
材質	炭素鋼, ステンレス鋼	
板厚 (炭素鋼) [mm]	36, 28, 22, 19, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 6.5, 6.4, 6, 4.5, 3.91, 3.9, 3.2, 2.3, 2.11, 1.2	屋外に設置する外部火災 防護対象施設及び竜巻防 護対策設備を構成する部 材を調査した結果から設 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 ²]	<i>Rf</i>	58,000	「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」より「ガソリン・ナフサ」の値を使用
輻射強度（太陽光） [W/m ²]	<i>Es</i>	400	IAEA 放射性物質安全輸送規則から設定*
低減率	ϵ	1	外部火災影響評価ガイドに従い、保守的に考慮しない。
燃焼面積 [m ²]	<i>Ab</i>	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]	<i>Tc0</i>	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]	<i>Ta</i>	29	設計外気温
燃焼時間 [s]	<i>t</i>	1,400	F-16 の燃焼継続時間

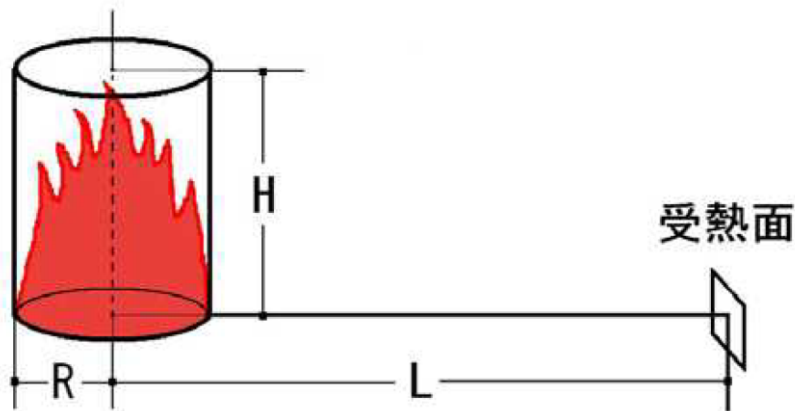
4. 必要離隔距離の算出方法

4. 1 輻射強度の算出

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

- ・航空機墜落による火災は、円筒火炎を生ずるものとすることから、円筒モデルとする。
- ・燃焼面積は、航空機の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、外部火災影響評価ガイドと同様に受熱面が輻射帯の底部と同一平面状にあると仮定し実施する。航空機墜落による火災の想定模式図を第 4 - 1 図に示す。



受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

第4-1図 航空機墜落による火災の想定模式図

a. 形態係数の算出

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

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

ただし、

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

ここで、

ϕ : 形態係数 (—)

L : 離隔距離 (m)

H : 火炎の高さ (m)

R : 燃焼半径 (m)

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

b. 受熱面における輻射強度の算出

輻射強度は外部火災ガイドを参考として、下式より算出する。

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

$$E = Rf \cdot \phi$$

ここで、

E : 輻射強度 (W/m^2)

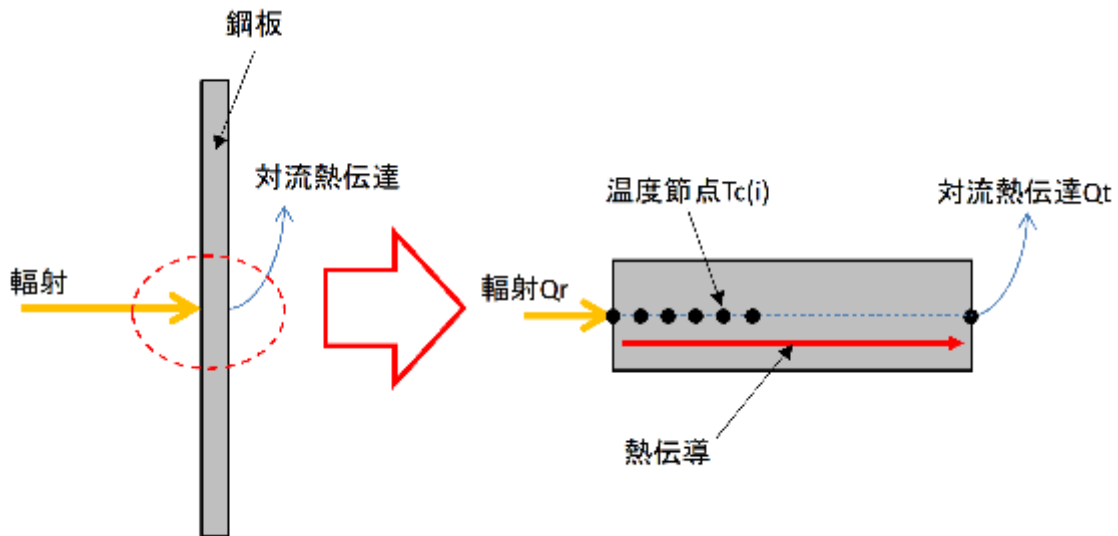
Rf : 輻射発散度 (W/m^2)

ϕ : 形態係数 (-)

4. 2 必要離隔距離の算出

任意の距離に応じた輻射強度を考慮し、部材の材質及び板厚毎に一次元非定常熱伝導計算を行い、許容温度を下回る離隔距離を算出する。

計算モデルを第4-2図に示す。輻射を受ける平板の温度は、1次元熱伝導として非定常計算する。区分区間毎に温度節点を設定する。区分区間は温度一様とし時間変化をステップ計算にて計算する。時間変化は差分式(陽解法)にて計算する。



第4-2図 計算モデル

(輻射)

$$Qr = E \cdot A$$

ここで、

Qr : 火炎からの輻射熱伝達 [W]

E : 輻射強度 [W/m^2]

A : 対象鋼板の面積 [m^2] (=1 単位面積)

(対流熱伝達)

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

ここで、

A : 対象鋼板の面積 [m²] (=1 単位面積)

Qt : 裏面での対流熱伝達 [W]

h : 熱伝達係数 [W / (m² · K)] (=12.5)

$Tc(i)$: 平板の温度 [°C] 節点 i , 節点数 N

Ta : 周囲雰囲気温度 [°C] (=29)

(平板の温度)

$i=1$ (表面温度)

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

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

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

$i=2 \sim N-1$ (内部温度)

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

$$V = L_c \cdot A$$

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

$i=N$ (裏面温度)

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

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

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

ここで,

Qr : 火炎からの輻射熱伝達 [W]

A : 対象鋼板の面積 [m²] (=1 単位面積)

Qt : 裏面での対流熱伝達 [W]

$Tc(i)$: 平板の温度 [°C] 節点 i , 節点数 N

Q : 区分区間への熱量 [W]

λ_c : 鋼板の熱伝導率 [W / (m · K)]

ρc : 鋼板の密度 [k g / m³]
 Cc : 鋼板の比熱 [J / (k g · K)]
 Lc : 区分区間 [m] (=板厚厚さ / (N-1))
 V : 区分区間の体積 [m³]
 $Tc(i)_{new}$: 時間経過後の平板の温度 [°C] (i=1~N)
 dt : ステップ間隔 [s] (=0.01)

5. 必要離隔距離の算出結果

屋外に設置する外部火災防護対象施設及び竜巻防護対策設備を構成する部材を調査し確認された主要な材質及び板厚並びに保守的な代表形状を設定し算出した、必要離隔距離の結果を第5-1表に示す。

第5-1表 必要離隔距離の算出結果

材料	板厚 (mm)	必要離隔距離(m)	
		安全上重要な 施設	波及的影響を 及ぼし得る施設
炭素鋼	36	1	0
	28	2	0
	22	3	1
	19	5	1
	15	7	3
	14	7	3
	13	8	4
	12	9	4
	11	9	5
	10	—	6
	9	11	7
	8	12	8
	6.5	14	9
	6.4	14	9
	6	15	10
	4.5	18	12
	3.91	19	13
	3.9	19	13
	3.2	20	15
2.3	23	16	
2.11	23	17	
1.2	25	19	
ステンレス鋼	20	4	1
	16	6	2
	12	8	4
	9	11	6

6. 計算の妥当性について

追而

令和3年6月16日 R2

別添－6
耐火塗料の説明書

目 次

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

1. 耐火塗料とは

耐火塗料は、鉄骨部材等を対象とした耐火被覆材の一つである。耐火被覆は、数mm厚の塗膜が、火災時には数十倍に発泡して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。

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

耐火塗料は下塗り、耐火被覆となる主材、中塗り、上塗りの4種の塗料をそれぞれ順に塗装するものであり、それぞれの塗料の役割は次の通りである。

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

2. 耐火塗料の組成

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

2種類の耐火塗料は、ほとんど同じ組成で構成されているが、フォームを形成する主成分の樹脂に違いがある。しかし、樹脂の違いにより、断熱性能及び発泡挙動に大きな差異がないことは、耐火性能試験にて確認している。(別添-7耐火被覆厚さの設定の考え方耐火被覆の考え方「2. 耐火被覆の耐火性能試験」)

なお、2種類の耐火塗料の選定方針としては、塗料メーカーの供給能力及び塗料メーカーの施工機材の違いから生じる施工性の違いを踏まえて選定している。

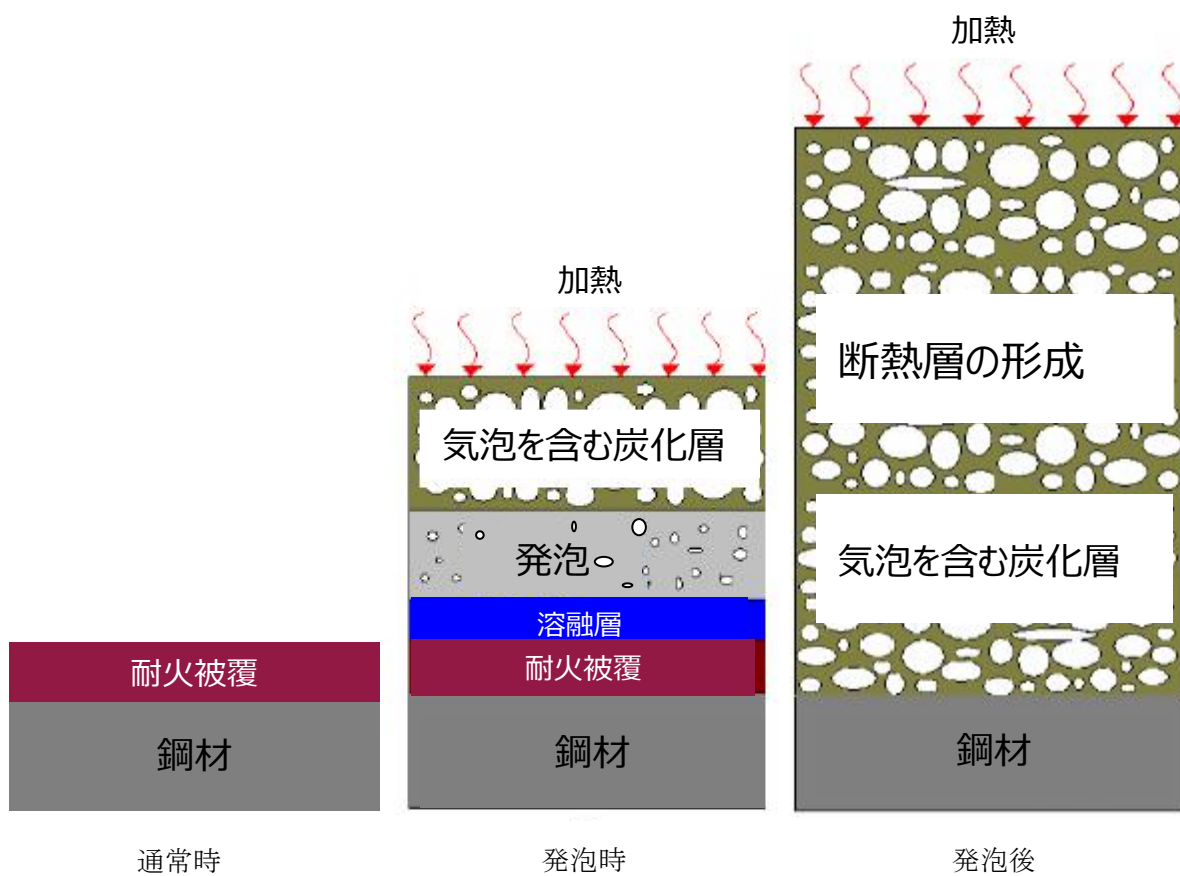
第2-1表 耐火塗料の組成

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

3. 耐火被覆の発泡挙動

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

輻射を受けた耐火被覆の発泡による変化を、第3-1図に示す。



第3-1図 加熱による耐火被覆の発泡による変化

令和3年6月25日 R4

別添-7

耐火被覆厚さの設定の考え方

一部修正作業中

目 次

1. 耐火被覆厚さの設計方針	1
2. <u>大臣認定試験</u>	2
3. 断熱材相当の厚さの算出	5
4. 耐火被覆厚さの設定	9
5. 耐火試験	11

参考1 鋼材の温度評価の方法

参考2 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

1. 耐火被覆厚さの設計方針

a. 耐火被覆厚さの基本設計方針

外部火災防護対策として施工する耐火被覆は、航空機墜落火災に対して、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必要がある。

採用する耐火被覆は大臣認定を取得した材料であるため、その要求時間ごとに必要厚さが定められている。

建築基準法では、建物内の人間の退避ができるよう、階段には30分の耐火要求を、また、航空機墜落火災で耐火被覆の対象としている支持架構を構成する柱、梁に対しても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、または2時間の耐火性能を要求している。

航空機墜落火災及び大臣認定試験は、合格の判定基準や火災の想定が異なるため、耐火被覆の厚さの違いを直接比較することはできないものの、両者は、合格の判定基準や火災の想定が異なるが火災により構築物が倒壊しないという主目的は同じである。

航空機墜落火災では、燃焼継続時間は約24分（1,400秒）であり、30分の耐火性能に近いものと推測されるものの、30分耐火試験は柱や梁に対してではなく、階段等に対する機能要求であり本試験では参考にできない。

航空機墜落火災対策として採用する耐火塗料は、航空機墜落火災対策に必要な断熱性能を有している、柱や梁に対する1時間耐火以上の大臣認定を取得している耐火塗料とし、航空機墜落火災の耐火被覆の設計を実施することで、信頼性のある対策とすることができる。

b. 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を定めて認定を取得しているが、航空機墜落火災対策としての耐火被覆は以下の理由から、施設の重要度に応じた施設毎に同一の厚さを設定する。

- ・ビル内外での発生を想定する必要がある建築基準法に対し、航空機墜落火災では構築物の至近での発生に限定していることから、至近の鋼材に対する輻射影響に耐える塗装厚さを距離が離れた箇所にも同様に設定することは保守的な設定であるため。
- ・耐火被覆は現場塗装する部材もあることから、管理方法を統一することが品質向上につながるため。
- ・耐火被覆厚さを、部材の素材や厚さ毎に異なる複雑な設定とせず統一することで、耐火被覆厚さの施工間違いといったヒューマンエラーを防止するため。

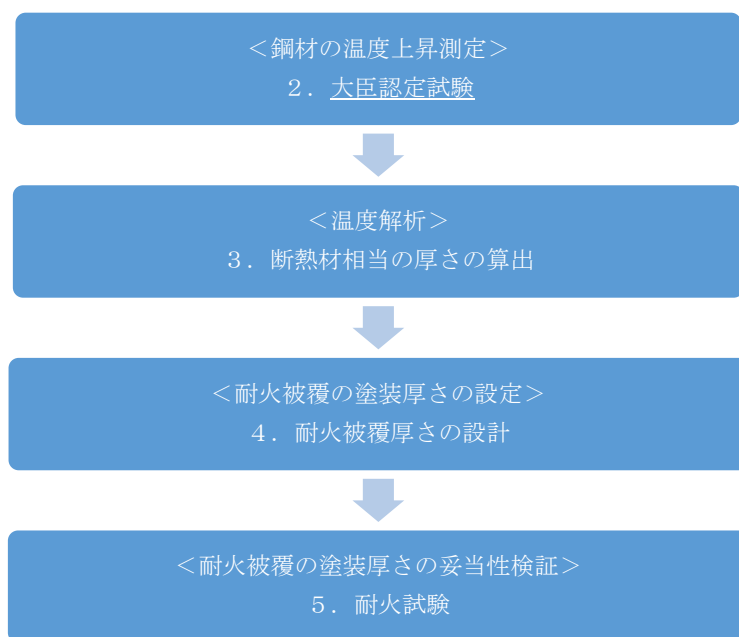
そのため、耐火被覆厚さの設計においては、耐火被覆厚さの設定が厳しくなるよう代表形状と評価条件を設定して設計する。

耐火被覆厚さの設定フローを第1-1図に示す。

鋼材の温度評価式において、耐火被覆は温度に依存し化学反応によって形状変化する観点から、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熱物性値が明らかになっている断熱材に置き換える。

断熱材への置き換えに当たっては、大臣認定試験から得られた鋼材の温度測定結果を再現する断熱材物性値を採用した。

本断熱材物性値を使用して、必要な耐火被覆厚さを設定する。設定した耐火被覆厚さの妥当性については、耐火試験により検証する。



第 1 - 1 図 耐火被覆厚さの設定フロー

2. 大臣認定試験

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。熱物性値の取得に当たっては、大臣認定試験結果を用いる。また、試験に当たっては、2種類（別添-6参照）の耐火被覆を用いた大臣認定試験の結果から、その性能が同等であることを確認している。

a. 大臣認定試験の概要

耐火被覆の熱物性値を取得するためには、与えられた熱量および鋼材の温度上昇が測定可能であること、また、試験体である鋼材は、温度上昇が評価式にて算出可能であることが必要となる。耐火被覆材の製造メーカーが国土交通大臣認定のために実施した大臣認定試験は、これらの条件を満たしていることから、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。

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。

b. 大臣認定試験の方法及び条件

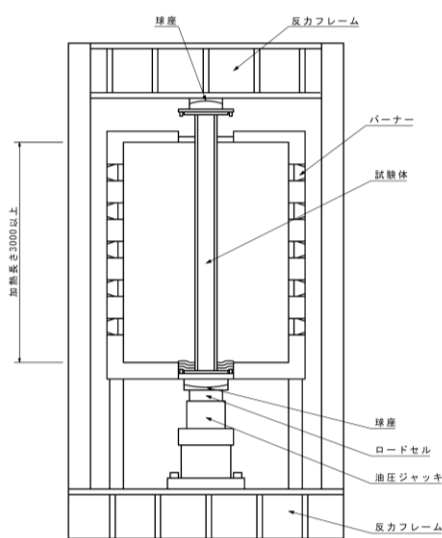
大臣認定試験は耐火性能試験書に準拠して実施される。第2-1図に試験装置の概要を示す。試験体には、構造耐力上主要な部分の断面に長期許容応力度に相当する応力度が生じるように载荷しながら試験するものとする。これは大臣認定試験の合格の判断基準が载荷状態での加熱による直接的な強度変化の測定であるためである。

一方、今回の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用いる。なお、許容されている最大変形量は柱高さの1/100であり、参照した試験の場合では3.5mの柱を用いているため35mm以下と伝熱特性に影響を与えるようなものではないことを確認している。

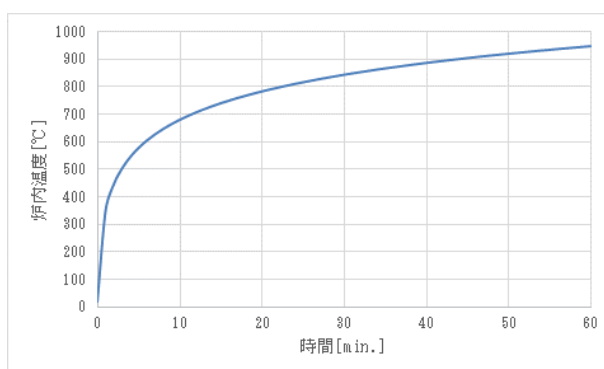
第2-2図に試験体に加える加熱曲線を示す。加熱曲線は、ISO 834にて示される標準加熱曲線とする。

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

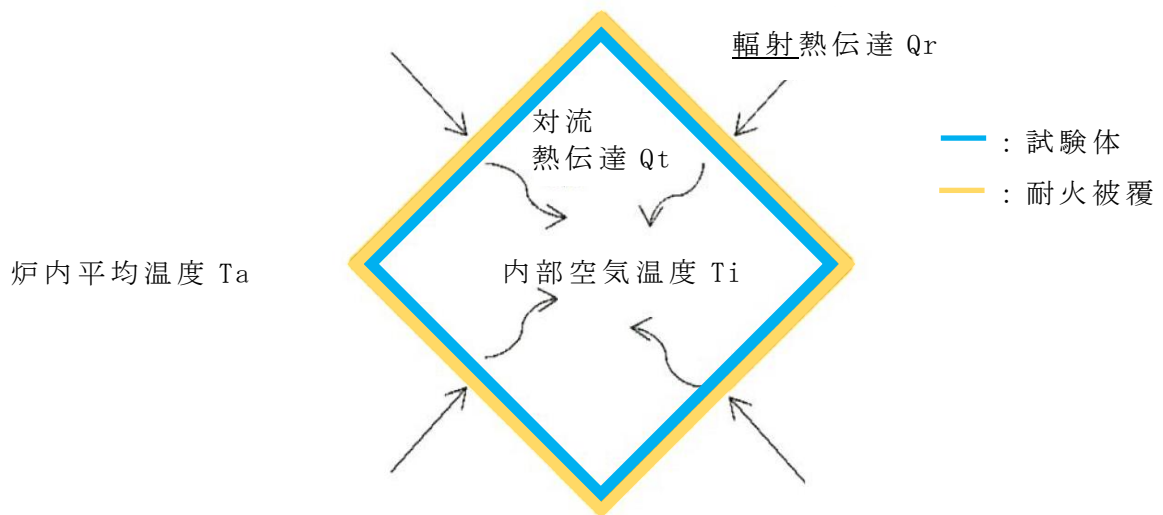
第2-1表に試験条件を示す。



第2-1図 試験装置
(断面図，単位：mm)



第2-2図 ISO 834にて示される
標準加熱曲線による炉内の温度変化



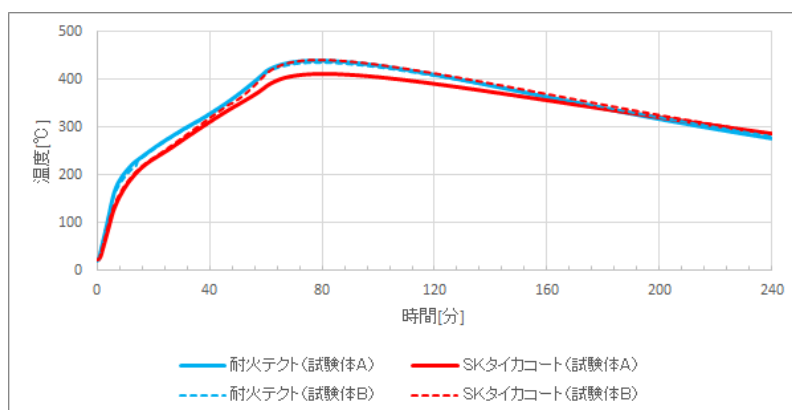
第 2 - 3 図 試験体への加熱の概要

第 2 - 1 表 試験条件

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

c. 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2-4図に示す。
2種類の耐火被覆は同じような温度上昇カーブを描いており、同等の耐火性能を有していることを確認した。



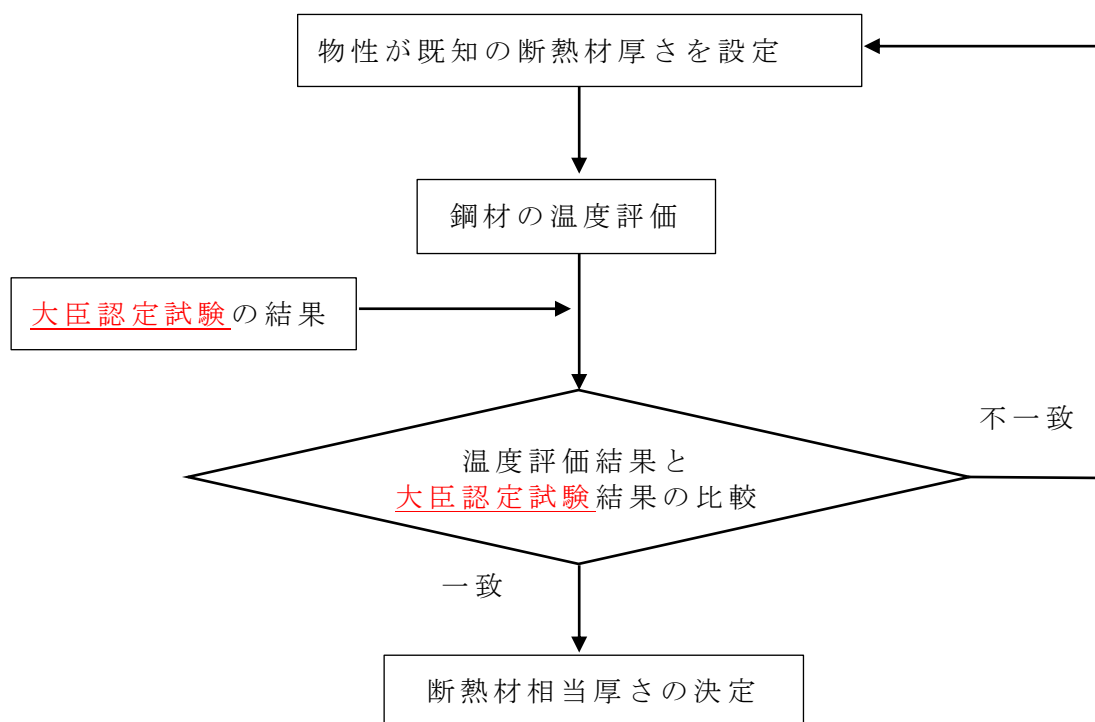
第2-4図 試験体の鋼材温度の時刻歴

3. 断熱材相当の厚さの算出

a. 評価方針

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

評価の流れを第3-1図に示す。



第 3 - 1 図 評価の流れ

b. 評価条件

鋼材の温度評価においては、大臣認定試験の試験条件に合わせ、炉内から角鋼管へは輻射による加熱があるものとし、断熱材及び鋼材にて熱伝導し、角鋼管内部の空気へは熱伝達があるものとする。内部空気の流出入はないものとする。

第 3 - 1 表に評価対象の仕様及び加熱条件、第 3 - 2 表に今回の比較に用いた断熱材の熱物性値、第 3 - 3 表に炭素鋼の熱物性値を示す。

評価に用いる断熱材としては、高温域の密度、比熱及び熱伝導率が既知である厚さ 25mm の断熱ボードを使用する。

鋼材の温度評価の条件は大臣認定試験に合わせて設定する。

第 3 - 1 表 評価対象の仕様および加熱条件

鋼材の材質	炭素鋼
鋼材の形状	角管
鋼材の外径厚さ	300 m m × 300 m m
鋼材の厚さ	9 m m
耐火被覆の塗装厚さ	2 m m
炉内温度	I S O 834 にて示される 標準加熱曲線による温度

第 3 - 2 表 断熱材※の熱物性値

温度 T	密度 ρ	定圧比熱 C _p	熱伝導率 λ
℃	g / c m ³	k J (k g · K)	W / (m · K)
100	0.25	0.858	0.10
200	0.25	0.959	0.10
400	0.25	1.083	0.10
600	0.25	1.153	0.14
800	0.25	1.198	0.20
1000	0.25	1.227	0.26

※ ニチアス ファインフレックス B I O ボード 5625-A

第 3 - 3 表 炭素鋼の物性値（伝熱工学資料の中炭素鋼より）

温度	密度 [k g / m ³]	比熱 [k J / k g K]	熱伝導率 [W / m K]
293.15	7852	0.463	43.1
300	7850	0.465	43.0
500	7790	0.528	38.6
800	7700	0.622	27.7

c. 評価方法

鋼材の温度評価の詳細は本資料の参考 2 に示す。

d. 設定する断熱材厚さのモデル

第 3 - 2 図に示す、耐火被覆厚さ 2 m m を施工して実施した 大臣認定試験 の結果で得られた鋼材温度の経時変化を基に、相当する断熱材の厚さを検討した。

大臣認定試験の結果から耐火被覆は210℃を基点として断熱効果に変化がみられているため、加熱開始から210℃までの領域（以下「発泡前」という。）と、210℃以降の領域（以下「発泡後」という。）で断熱材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。）とする。

発泡後の耐火被覆は25mmの断熱材に相当するものとし、発泡前の耐火被覆（2mm）は厚さ1mmの断熱材に相当するものとして、断熱材厚さのモデルを考慮する。

よって、耐火被覆厚さ1mmの断熱性能が、発泡前においては断熱材0.5mmに相当し、発泡後では断熱材12.5mmに相当する設定とする。

ただし、発泡前後においてモデルの形状は25mmの断熱材から変化させず、210℃以下の場合、断熱材の比熱は25分の一に、熱伝導率は25倍に設定することにより、断熱材厚さ1mmをモデル化する。

e. 比較結果

上記2. に示した2mmの耐火被覆における大臣認定試験の結果を基に、上記の断熱材厚さのモデルで評価した結果を重ねたものを第3-2図に示す。

第3-2図の評価の結果から、210℃において断熱材の厚さを変化させている（比熱は上がり、熱伝導率は下がる）ため、断熱材表面において急激に温度上昇するとともに、断熱材の断熱効果により、鋼材表面においては温度上昇が緩和されている。

なお、断熱材の表面温度は、鋼材温度評価結果と同様に、断熱材物性値が変更となった温度付近において明確な変曲点が現れる。

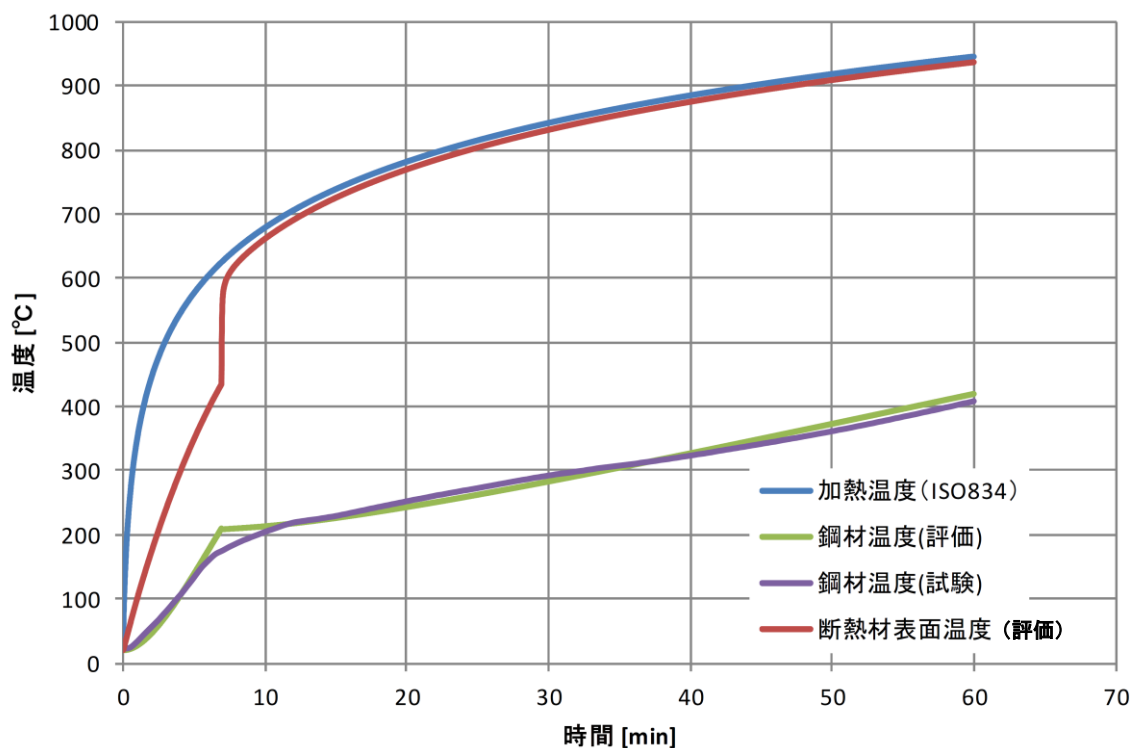
このような評価による鋼材の温度上昇の結果は、試験による鋼材温度の結果とほぼ同様の傾向を示している。

ただし、鋼材温度が210℃前後の領域において、試験による鋼材の温度上昇の結果と評価による鋼材の温度上昇の結果に、最大で25℃程度の乖離が見られる。

このような乖離は、実際の試験においては、鋼材の温度が210℃に達する前（約170℃）から耐火被覆の発泡が徐々に生じるが、評価においては210℃に達した途端に断熱材厚さが変化するモデルを採用しているためだと思われる。

上記のような乖離がみられるものの、以下の3点から設定した断熱材厚さのモデルを用いることに問題はない。

- ・評価においては、試験における発泡開始（約 170℃）後の 210℃において、断熱材の断熱効果を見込むことにより、保守的に試験よりも遅く温度上昇の緩和の効果を考慮していること
- ・その後の温度上昇の傾向は、試験による鋼材温度の結果と評価による鋼材温度の結果ともに、同様の傾向（最大でも乖離は 10℃以下）を示すこと
- ・後述する耐火被覆厚さの解析においては、保守的な条件を設定することで鋼材温度が 200℃を大きく超える温度上昇が見込まれことから、上記の試験と評価の温度結果の乖離の影響は十分小さいと考えられること



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

4. 耐火被覆厚さの設定

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

a. 設定の考え方

耐火被覆の厚さ設定における考え方を以下に示す。

- ・解析の初期においては、航空機墜落火災で想定される輻射強度である約 $30 \text{ k W} / \text{m}^2$ を設定し、火炎と耐火被覆表面の温度差に応じた入熱を考慮する。
- ・航空機墜落火災において、外部火災防護対象施設および波及的影響を及ぼし得る施設に求められる機能に応じて設定した許容温度を満足するために必要な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厚さを設定する。
- ・耐火被覆厚さは、施設毎に統一することから、代表部材にて設定する。代表部材は、以下のとおり検討し、最終的に飛来物防護ネットの防護板で S U S 3 0 4 の平板（9 mm）とした。
 - ① 輻射強度最も強く、厳しい評価となることから、火炎に近い飛来物防護ネットから選定することとする。
 - ② 別添一 5 で設定したとおり、平板を代表とする。
 - ③ 飛来物防護ネットのうち、最も薄い平板である防護板を代表に耐火塗装厚さを設計する。
- ・代表部材より薄い板厚を有する部材（角柱等）が存在することから、それらは個別に試験にて、設定した耐火被覆厚さを施工することで許容温度を満足していることを、耐火試験にて確認する。耐火試験においては、火炎と部材の距離を考慮した輻射強度を照射する。

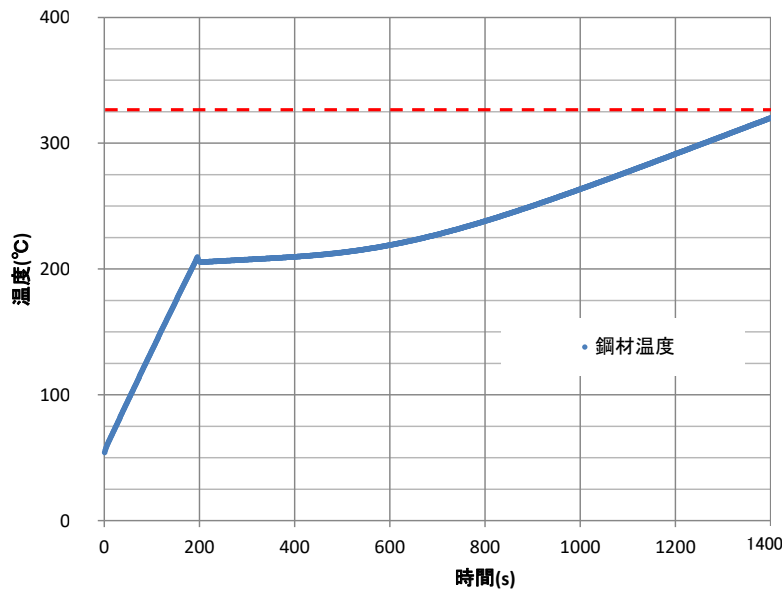
b. 解析結果

S U S 3 0 4 の 9 mm 平板を代表に、耐火被覆厚さを設定した結果を第 4 - 1 図及び第 4 - 2 図に示す。

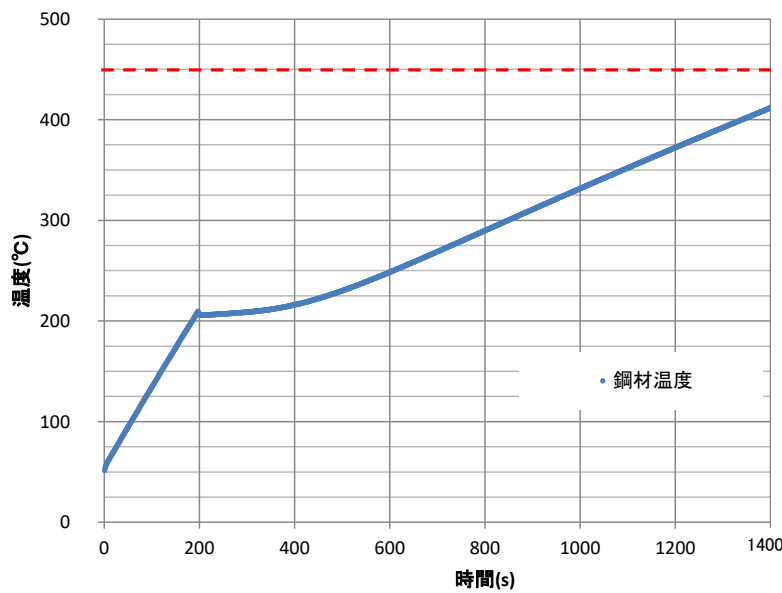
鋼材の温度評価は、添付資料「IV-1-1-1-4-5 外部火災防護における評価方針」の「4.4.3 航空機墜落火災に対する屋外施設（竜巻防護対策設備等）の熱影響評価」における式 4.4.3-6 に基づき評価する。

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

時間刻みの影響については、参考 2 に示す。



第 4 - 1 図 耐火被覆 3 m m の解析による温度結果



第 4 - 2 図 耐火被覆 2 m m の解析による温度結果

5. 耐火試験

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

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

(1) 耐火試験の概要

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

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

(2) 耐火試験の方法および条件

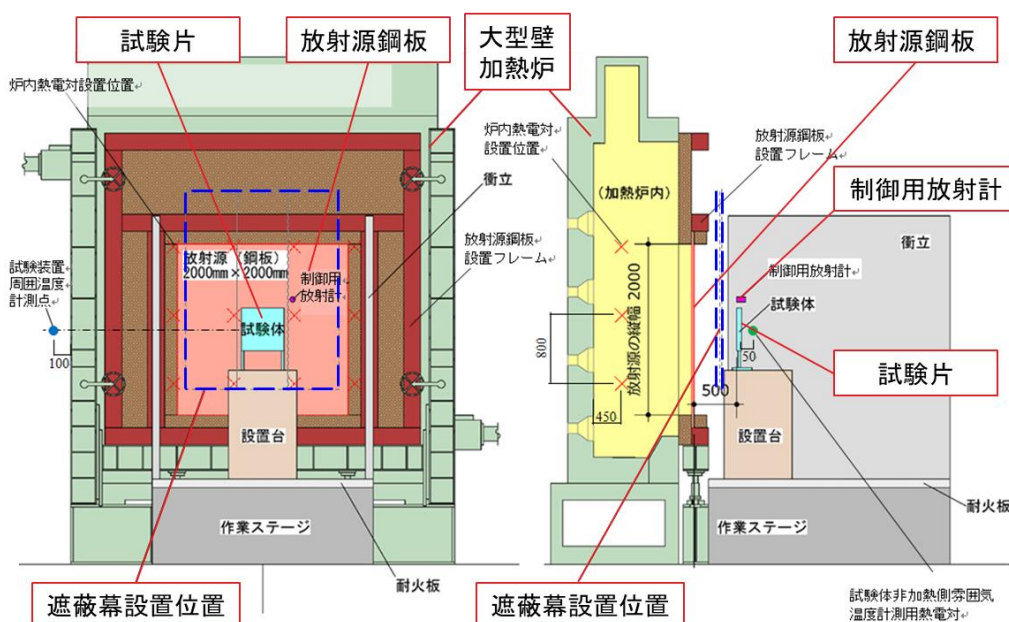
a. 試験方法

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

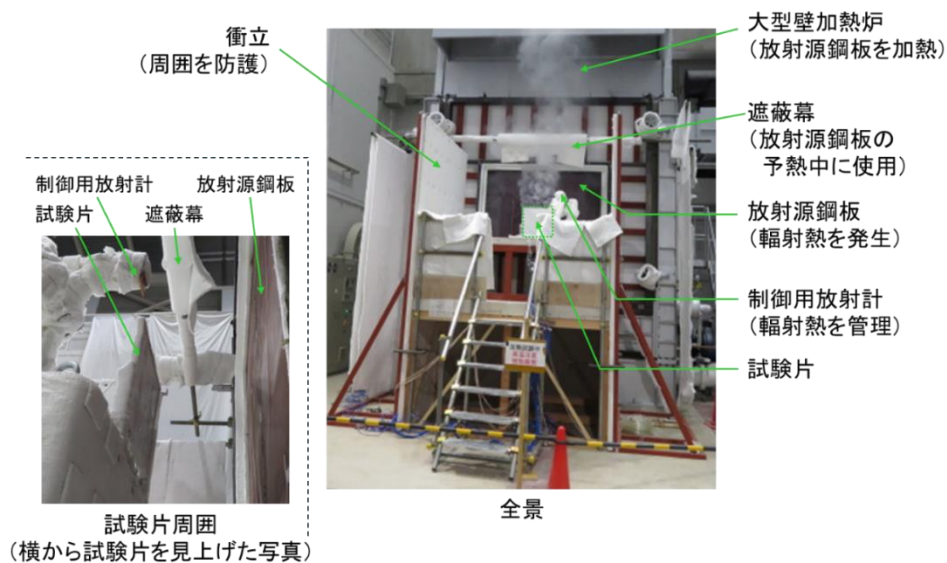
試験開始前に放射源鋼板を予熱し、輻射強度が所定の強度に達した時点で試験を開始した。予熱中は、試験片への入熱を軽減するため、試験片と放射源鋼板の前に遮蔽幕を設置した。試験片の近傍に設置した制御用放射計を用いて輻射熱を管理する。

b. 試験条件

試験条件は第5-1表に示す。



第5-1図 試験設備（図面）



第 5 - 2 図 試験設備写真

第 5 - 1 表 試験条件

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

※ 想定する燃焼継続時間は 1,400 秒だが、試験時間は 1 時間としている。

(3) 耐火試験の結果

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

また、耐火試験前及び耐火試験後 (1 時間後) における試験体の様子を、第 5 - 6 図及び第 5 - 7 図に示す。

S U S 304 (t 9 m m) の耐火塗装厚 3 m m 及び 2 m m の耐火試験の結果から、許容温度以下となることを確認した。

(4) 耐火試験後の耐火被覆に対する考察

第5-6図及び第5-7図から、耐火試験後の耐火被覆表面は黒色となっており炭化が確認できる。一方で、第5-12図の大臣認定試験の結果からは、発泡後は大部分が灰色となっており、十分に炭化した後、灰化にまで至っていることが確認できる。

以上から、耐火試験においては耐火被覆の炭化は確認できるものの、大臣認定試験と異なり入熱が十分でないため、灰化にまでは至っていないことを確認した。

(5) 温度結果に対する考察

第4-1図及び第4-2図に示す解析による温度結果と、第5-3図及び第5-4図に示す耐火試験による温度結果を比較すると、どちらの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1,400秒後までの温度上昇は、解析と比較し乖離がみられる。

この乖離について、以下のa.にて物理現象を整理し、b.にて考察する。

a. 耐火被覆を施工した鋼材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鋼材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 放射源鋼板と鋼材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鋼材へ、航空機墜落火災を想定し設定した輻射 $29,400\text{W}/\text{m}^2$ 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内部、耐火被覆から鋼材表面、耐火被覆内部は熱伝導により熱が伝播すると同時に、耐火被覆表面及び鋼材裏側から輻射及び対流熱伝達により放熱が生じる。
- ③ 耐火被覆の温度が 200°C 前後となった時点で、 200°C 前後に達した耐火被覆表面及び内部において、耐火被覆の主成分である発泡剤（ポリリン酸アンモニウム）が熱分解し、発生したリン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、耐火被覆から鋼材表面、耐火被覆内部においては、形成した耐火被覆の断熱層により緩和された輻射による入熱が熱

伝導により伝播するとともに、鋼材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 1,400 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 1,400 秒まで継続する。

(a) 試験開始時の鋼材温度について

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おり、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、解析と比較し約 50℃高くなっている。

このような試験開始時の鋼材温度の乖離は、解析結果をもとに設定した耐火被覆の厚さが十分に保守的であることを確認する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おり問題はない。

(b) 試験開始から 1,400 秒後までの温度上昇について

上記 4. にて示した温度解析においては、温度評価の結果を厳しく評価するために、上記で整理した現象の②及び⑥の放熱の考慮がなされておらず、断熱条件にて解析を実施している。

このような試験開始から 1,400 秒後までの温度上昇の乖離は、保守的に解析条件を設定し耐火被覆の厚さを設定しているため、問題はない。

b. 試験結果と解析結果の乖離についての考察

(a) 断熱材厚さのモデルの精緻化について

上記 3. の評価条件は変更せずに、鋼材温度が 210℃に達した時点で断熱材厚さが変化するモデルから、断熱材の温度が 260℃に達した時点で断熱材厚さが変化するモデルへ変更する。モデルを変更し評価した結果を、第 5 - 9 図に示す。

試験結果と評価結果は同様の傾向を示すことを確認した。

(b) トレース解析について

耐火試験における加熱板及び試験体の温度データから温度依存の輻射を考慮し、さらに断熱材厚さのモデルを上記 a. と同じとしたトレース解析を実施した。

この際、試験体周辺の設備の温度上昇による二次輻射及び周辺への対流放熱または受熱並びに室内への輻射放熱は見込まないこととした。

第5-10図及び第5-11図から、上記の断熱材厚さのモデル及び鋼材初期温度を合わせたトレース解析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。

また、試験結果から、試験体周辺への輻射及び対流放熱と同等の二次輻射が試験体に与えられたと考えられ、耐火試験条件は保守的な設定であったと想定される。

よって、本試験において鋼材温度が制限温度を超えていないことから、輻射熱 29 k W / m^2 による耐火被覆 2 mm または 3 mm の設定に問題はない。

(c) 入熱量の比較について

断熱材厚さの評価及びトレース解析の計算がほぼ一致していることから、解析値から輻射入熱量を算出し、比較検討する。

29 k W / m^2 の一定入熱 (①)、大臣認定試験 (②)、耐火被覆の厚さ (2 mm) に対する温度解析 (③) 及び耐火試験 (④) における入熱量は、第5-13図のとおりとなる。

ここで、実現象としては被輻射物への入熱量は、被輻射物の温度上昇とともに被輻射物からの放射放熱との差し引きで減少する。

一方、評価ガイドにおいては輻射強度の算出方法は示されているが、被輻射物への入熱は明示されていないことから、放熱面と受熱面との温度差により輻射が入熱するという現象を考慮せず、 29 k W / m^2 の一定入熱が与えられることを想定する (①)。

耐火被覆の厚さ (2 mm) 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 k W / m^2 の入熱があり、断熱材表面温度の上昇を考慮した輻射入熱量を計算した (③)。

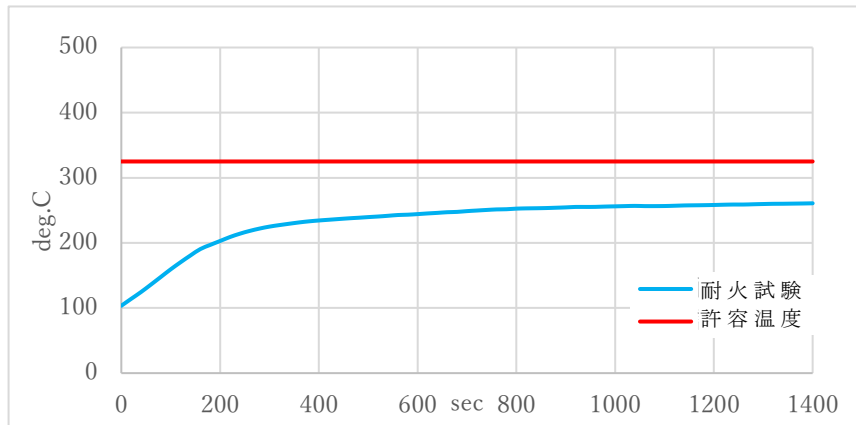
耐火試験においては、試験体位置において約 29 k W / m^2 の輻射強度となるように放射源鋼板の温度を管理しており、放熱面と受熱面の温度データから輻射入熱量を算出している。(④) このデータから実際に温度依存を考慮した場合の輻射入熱量は、約 29 k W / m^2 よりも低下する。

耐火試験 (④) と比較して、耐火被覆の厚さ (2 mm) に対する温度解析 (③) の入熱条件が保守側の設定となっていることから、解析結果から設定した耐火被覆 2 mm または 3 mm に問題はない。

なお、耐火試験 (④) の入熱量と大臣認定試験 (②) の入熱量を比較した場合、 $1,400$ 秒及び $3,600$ 秒の時点において、大臣認定試験の方が保守的な入熱量となっていることを確認している。

(6) 代表部材厚に包絡できない部材の耐火試験

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



第 5 - 5 図 t [redacted] mm 炭素鋼 耐火塗装厚 3 mm の耐火試験による温度結果



(試験開始前)



(1 時間後)

第 5 - 6 図 t 9 mm S U S 304 耐火塗装厚 3 mm の耐火試験結果

[redacted] については商業機密の観点から公開できません。



(試験開始前)



(1時間後, 横から見た図)

第5-7図 t 9 mm SUS 304 耐火塗装厚 2 mm の耐火試験結果



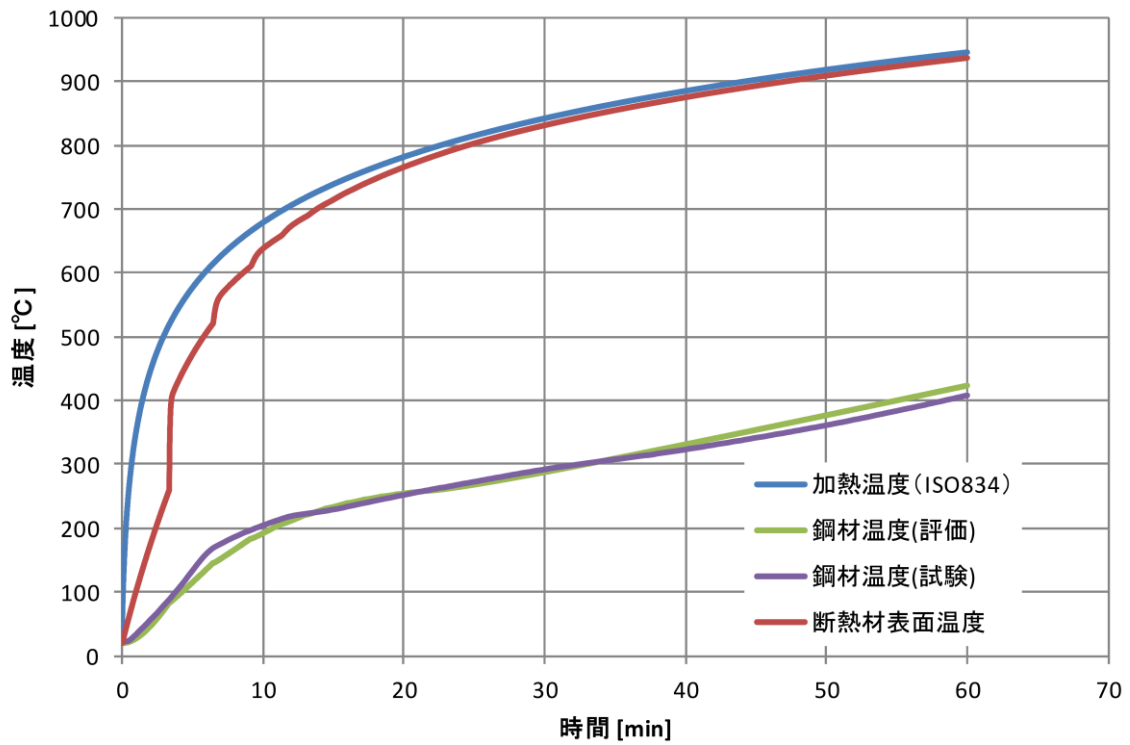
(試験開始前)



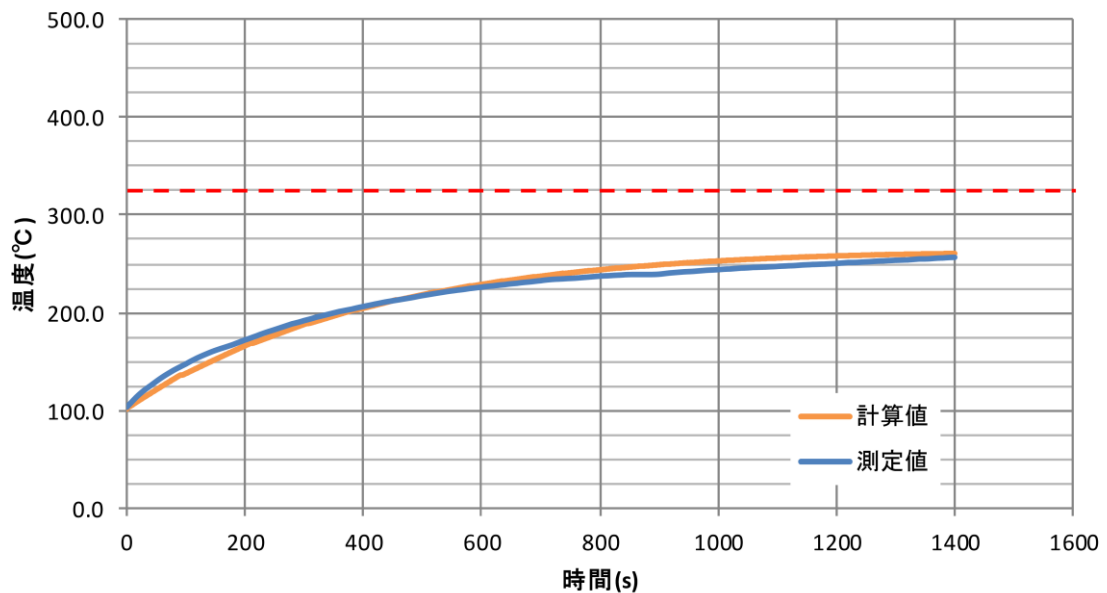
(1時間後)

第5-8図 t ■■■ mm 炭素鋼 耐火塗装厚 3 mm の耐火試験結果

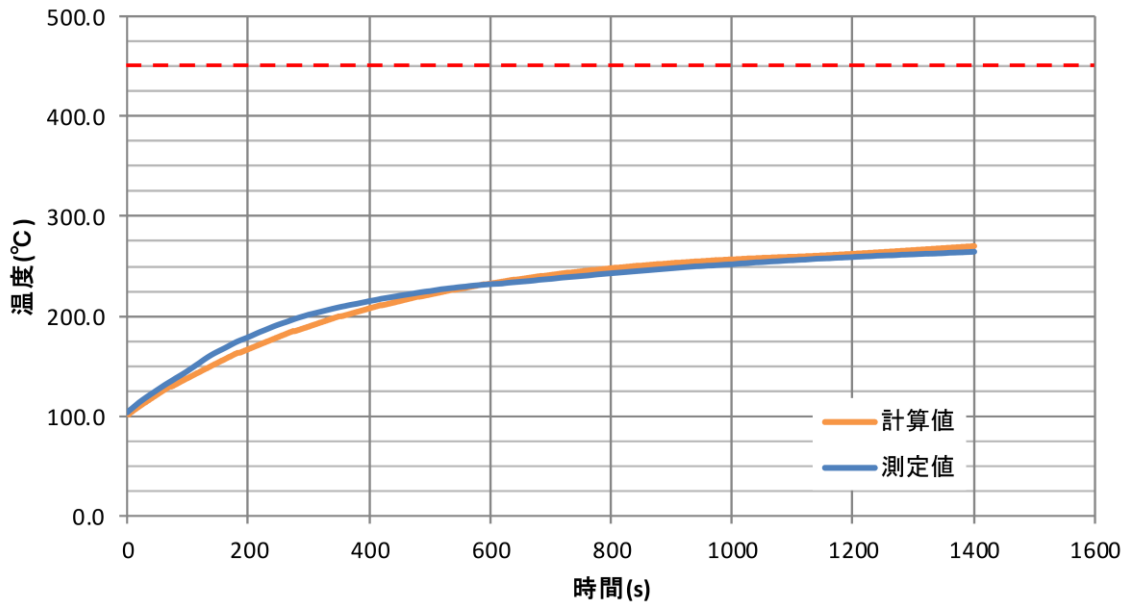
■■■ については商業機密の観点から公開できません。



第 5 - 9 図 耐火被覆 2 m m の試験結果に相当する断熱材厚さを適用して評価した鋼材温度の比較（発泡モデルの精緻化）



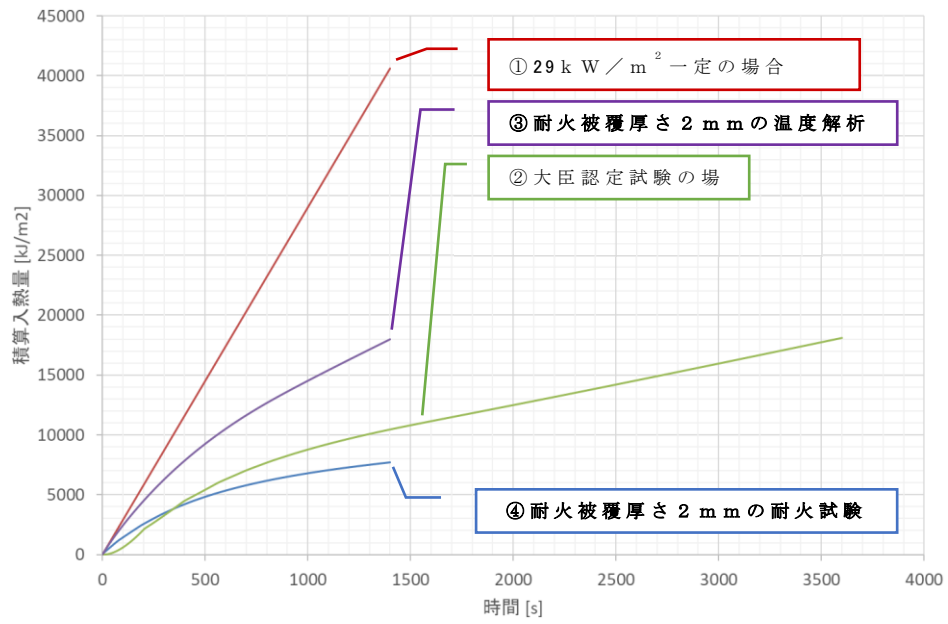
第 5 - 10 図 t 9 m m S U S 304 耐火塗装厚 3 m m の耐火試験による温度結果と評価による温度結果



第 5 - 11 図 t 9 m m S U S 304 耐火塗装厚 2 m m の耐火試験による温度結果と評価による温度結果



第 5 - 12 図 大臣認定試験の試験体の発泡前後の様子



第 5 - 13 図 入熱量の比較

参考 1 鋼材の温度評価の方法

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。

(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。

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

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、炉内温度は一様とし、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)

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

A : 受熱面積 (m²)

T_a : 炉内平均温度 (°C)

$T_d(1)$: 断熱材表面温度 (°C)

(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。

$$\rho_d \cdot c_d \cdot V_d \cdot \frac{d}{dt} T_d = Q$$

上式を陽解法により Δt 毎の時間進行の式にすると

$$T_{d_{n+1}} = T_{d_n} + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho_d \cdot c_d \cdot V_d}$$

ここで、

Δt : 時間刻み (s)

n : 現在の時間ステップ

$n + 1$: Δt 後の時間ステップ

T_{d_n} : 現在の断熱材温度 (°C)

$T_{d_{n+1}}$: Δt 後の断熱材温度 (°C)

Q : 熱伝導量 (W)

ρ_d : 断熱材の密度 (kg / m³)

c_d : 断熱材の比熱 (J / kg · K)

V_d : 断熱材の体積 (m³)

(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 Δt ごとの時間進行の式にすると、

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

ここで、

Δt : 時間刻み (s)

n : 現在の時間ステップ

$n + 1$: Δt 後の時間ステップ

T_{f_n} : 現在の温度 (°C)

$T_{f_{n+1}}$: Δt 後の鋼材温度 (°C)

Q : 熱伝導量 (W)

ρ_f : 鋼材の密度 (kg / m³)

c_f : 鋼材の比熱 (J / kg · K)

V_f : 鋼材の体積 (m³)

(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 : 熱伝達係数 (W / (m² · K))

A : 受熱面積 (m²)

N_f : 鋼材の節点数 (鋼材と空気が接するところの節点)

$T_f(N_f)$: 鋼材裏面温度 (°C)

T_i : 内部空気温度 (°C)

熱伝達係数は、ヌセルト数の定義から、次式にて設定する。

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

ここで、

h : 熱伝達係数 (W / (m² · K))

Nu_l : 平均ヌセルト数

HL : 角鋼管の高さ

λ : 空気の熱伝導率 (W / (m · K))

空気の熱伝達係数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。

熱伝達係数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 Nu_l

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。

$$Nu_l = (4/3)Nu_x$$

ここで、

Nu_l : 平均ヌセルト数

Nu_x : 局所ヌセルト数

(b) 局所ヌセルト数 Nu_x

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。

$$Nu_x = C_T(Pr) \left(\nu_\infty / \nu_w \right)^{0.21} (Gr \cdot Pr)^{1/4}$$

ここで、

Nu_x : 局所ヌセルト数

Pr : プラントル数

$C_T(Pr)$: プラントル数の関数

ν : 動粘性係数 (m^2 / s)

(添字 : ∞ : 周囲流体の値, w : 壁面の値)

$$\left(\nu_\infty / \nu_w \right)^{0.21} = 1$$

Gr : グラスホフ数

(c) プラントル数の関数 $C_T(Pr)$

次式で表される。

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

ここで、

$C_T(Pr)$: プラントル数の関数

Pr : プラントル数

(d) レイリー数 Ra

定義から次式で表される。

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

ここで、

Ra : レイリー数
 Gr : グラスホフ数
 Pr : プラントル数

(e) グラスホフ数 Gr
 定義から次式で表される。

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot HL^3 \cdot (Tf(Nf) - Ti)}{\nu^2}$$

ここで、

Gr : グラスホフ数
 g : 重力加速度 (= 9.80665 m / s²)
 β : 体膨張率 (1 / K)
 HL : 角鋼管の高さ
 Nf : 鋼材の節点数 (鋼材と空気が接するところの節点)
 Tf(Nf) : 鋼材裏面温度 (°C)
 Ti : 内部空気温度 (°C)
 ν : 動粘性係数 (m² / s)

(f) プラントル数 Pr
 空気の物性値として、下表のとおり設定する。

温度	プラントル数 Pr*
280	0.720
300	0.717
320	0.719
340	0.718
360	0.717
380	0.715
400	0.715
420	0.713
440	0.712
460	0.711
480	0.710
500	0.710
550	0.709
600	0.710
650	0.714
700	0.715
800	0.719

※ 伝熱工学資料改訂第4版より

(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。

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

上式を陽解法により Δt 毎の時間進行の式にすると、

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

ここで、

Ti_{n+1} : Δt 後の内部空気温度 (°C)

Ti_n : 現在の内部空気温度 (°C)

Δt : 時間刻み (s)

Qt : 対流熱伝達 (W)

Na : 内部空気量 (mol)

Cv : 定積比熱 (J/mol · K) (= $Cp - R$)

Cp : 低圧比熱 (J/mol · K)

R : 気体定数 (J/mol · K)



第 1 図 鋼材温度評価の概略図

(7) 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。

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

1次元の熱伝導方程式 (拡散方程式) の拡散数は、

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

で求まる。

本解析では、物性値 c および ρ は温度依存性を考慮する。また、基本的に時間刻み Δt を 0.01[s]、区分厚さ Δx を 0.001[m] に設定している。計算モデル中の節点数は $N = L + 1$ (L は板厚 [mm])。 N は小数点以下切り捨て) とするが、 N が 3 未満になる場合は $N = 3$ とし、区分厚さを $\Delta x = L / (N - 1)$ とする。

(b) 妥当性の確認の結果

追而

参考2 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

耐火塗装有りの鋼材解析において，時間刻みを 0.001s を 0.0001s へ変更した結果の一部を以下に示す。

全時間刻みにおいて有意な差は見られないことから，時間刻みの桁の設定に問題はない。

時間(s)	鋼材表面温度	鋼材表面温度	差分
	時間刻み0.001	時間刻み0.0001	
	Tco(°C)	Tco(°C)	
0			
1	51.5	51.5	0.00
2	53.6	53.6	0.00
3	55.3	55.3	0.00
4	56.7	56.7	0.00
5	57.9	57.9	0.00
6	58.9	58.9	0.00
7	59.9	59.9	0.00
8	60.7	60.7	0.00
9	61.6	61.6	0.00
10	62.4	62.4	0.00

途中省略

1390	409.8	409.8	0.00
1391	409.9	409.9	0.00
1392	410.1	410.1	0.00
1393	410.3	410.3	0.00
1394	410.5	410.5	0.00
1395	410.7	410.7	0.00
1396	410.9	410.9	0.00
1397	411.1	411.1	0.00
1398	411.3	411.3	0.00
1399	411.5	411.5	0.00
1400	411.7	411.7	0.00

別添－8

航空機墜落火災対策の
耐火試験と大臣認定試験との比較

目 次

1. はじめに	1
2. 大臣認定試験の条件	1
3. 試験結果との比較	2

1. はじめに

航空機墜落火災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）を取得している耐火被覆と同じ製品を用いている。航空機墜落火災対策の被膜厚さを設定するための熱伝導率の設定には、大臣認定試験の結果を用いている。

ここでは、大臣認定試験と航空機墜落火災の耐火試験について比較する。

2. 大臣認定試験の条件

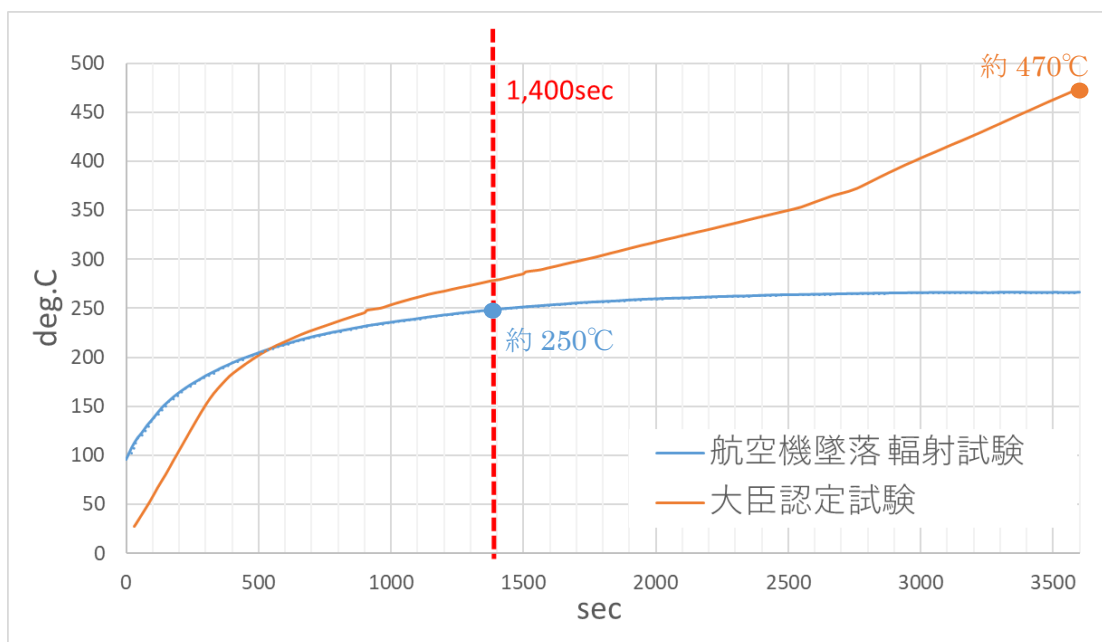
大臣認定試験は、「防耐火性能試験・評価業務方法書（一般財団法人建材試験センター）」に規定された方法で実施するものである。耐火被覆の厚さを設定するために用いた大臣認定試験と航空機墜落火災の耐火試験の条件を第1表のとおり比較した。

第1表 大臣認定試験と航空機墜落火災の耐火試験の条件

	大臣認定試験	耐火試験
加熱条件	試験体を加熱炉内に設置し、炉内温度が ISO 標準加熱曲線の温度となるように加熱	試験体を加熱炉外に設置し、試験体表面が航空機墜落火災の至近の部材が受ける輻射強度相当となるように照射（29kW/m ² ）
加熱時間	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 ² /400d 最大たわみ速度 (mm/分) : L ² /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は 325℃、安全上重要な施設以外は 450℃を超えないこと。
試験体	t=9mm, 300mm*300mm の角鋼 (3.5m) 表面に 2mm の耐火被覆を施工 鋼材表面に熱電対を設置	t=9mm, 500mm*500mm の平板表面に 2mm の耐火被覆を施工 鋼材表面に熱電対を設置

3. 試験結果との比較

両実験を実施した場合の鋼材温度を比較することにより、加熱条件の比較をした。耐火試験で1,400秒加熱した後の鋼材温度が約250℃であったのに対し、大臣認定試験の1時間加熱後は約470℃であった。鋼材温度の違いから、試験条件は大臣認定試験のほうが厳しいものであるといえる。



次に両試験の合格のクライテリアを比較する。大臣認定試験の合格のクライテリア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、耐火試験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℃以下であることが合格のクライテリア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、合格のクライテリアは両者が同等であるといえる。

したがって、両試験は直接比較するものではないものの、合格のクライテリアは両者同等であり、鋼材温度で比較した場合に、時間や加熱条件を含めた試験条件としては大臣認定試験のほうが厳しい試験条件であるといえる。

以上

令和3年6月23日 R3

別添－9
施工管理

目 次

1. 施工管理 1

1. 施工管理

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

(1) 耐火塗料施工時の管理項目

耐火塗料の施工時における管理項目と管理方法を第1-1表に示す。

第1-1表 耐火塗料の施工時における管理項目と管理方法

作業		管理項目	管理要求	管理方法
施工前	素地確認	表面の状態	錆・付着物が除去されていること。	目視にて確認
	下地調整	既設塗装の下地の状態	既存塗布面が下地処理されていること。	目視にて確認
施工中	作業環境		温度：5～35℃内 湿度：30～85%内	温湿度計で測定する。
			強風や塵埃，降雨，降雪の影響を受けないこと。	防風，防塵対策及び塗装面養生を施す。
	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	亀裂，汚れ，傷，液だれが無く，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，液だれが無く，硬化乾燥していること。	目視にて確認

(2) 耐火被覆厚さに関する測定方法

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

耐火被覆が必要厚さを確保されていることを確認するため、電磁膜厚計を用い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。

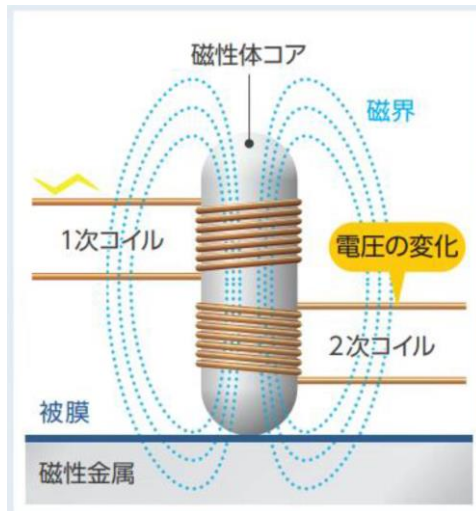
主材被覆厚は下塗りを差し引いた値であり、その値が管理値に達していない場合は主材を再度塗布する。

a. 耐火被覆厚さの測定原理

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



第 1 - 1 図 耐火被覆厚さの測定原理

(3) 耐火被覆厚さの測定管理について

a. 管理単位

鉄骨・防護板部材の被覆厚さの管理は部材毎とし，耐火被覆面積が 8 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，下塗り箇所と主剤塗り箇所が同じ箇所で行うことができるように，部材毎に起点を定めそこからの距離を定めて測定を実施する。

b. 管理基準

下限値設定被覆厚 - 0 mm (全検査値)

上限値設定被覆厚 : + 1 mm (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 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を逸脱している箇所を確認した場合は，該当する部材の耐火塗装を剥離後，再度耐火塗装を施工し，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 m^2) の測定値の平均が + 1 mm を上回った場合，管理範囲を拡大し測定点数を増やして上限値以下であ

ることを確認する。拡大後も測定値が上限値を上回る場合は、耐震性機能に影響がないことを確認する。

(4) 耐火被覆の不適合発生時の対応について

耐火塗装の施工完了後に管理基準を逸脱している箇所を確認した場合や施工不良箇所を確認した場合の対応として、該当箇所の耐火塗装を剥離後、再度耐火塗装を施工し、上記「a.管理基準」に従った耐火被覆の測定を実施する。

令和3年6月23日 R3

別添－10
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

耐火被覆が設計通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、管理方法等について説明する。

2. 損傷事例と原因

耐火被覆の性能は耐火被覆である主材の上に塗布される中塗り塗料・上塗り塗料で保護されるため、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	
膨れ	塗膜がガスまたは液体を含んでいる状態	
剥がれ	塗膜が付着力を失って塗装面から離れる現象	
傷	外的な荷重によって、塗膜が損傷した状態	

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

- ①紫外線：紫外線が樹脂を分解し、着色顔料が粉となる白亜化が生じ、塗膜が薄くなることで劣化する。
- ②水分：雨水等は①で薄くなった塗装面から浸透し、塗膜中にとどまることで塗膜の膨れや剥離につながり、耐火塗装を劣化させる。
- 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ワレが発生することで、塗膜中に水分や塩分が侵入し塗膜の膨れや剥離につながり耐火塗装を劣化させる。
- 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、耐火塗料を劣化させる。また、傷の程度によっては、耐火塗装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事になる。耐火被覆である主材に影響を与える要因は次の通りである。

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塗布量が減り、耐火性能が低下する等の影響を与える。

4. 定期点検の考え方

「3. 耐火被覆の劣化」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、中塗り塗料および上塗り塗料の複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えるため長期間安定した塗膜を維持可能である。

しかしながら、上塗り塗料の塗膜劣化や傷等により、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、点検による上塗り塗料の塗膜劣化を早期に発見、補修又は塗増しを行い、塗膜の維持管理をする。

5. 点検概要

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

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

6. 補修時期

耐火塗装は、上塗り塗料にふっ素樹脂系を適用している。上塗り塗料にふっ素樹脂を使用することで高耐候性能が期待できるが、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補修塗装（塗増し）する。

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

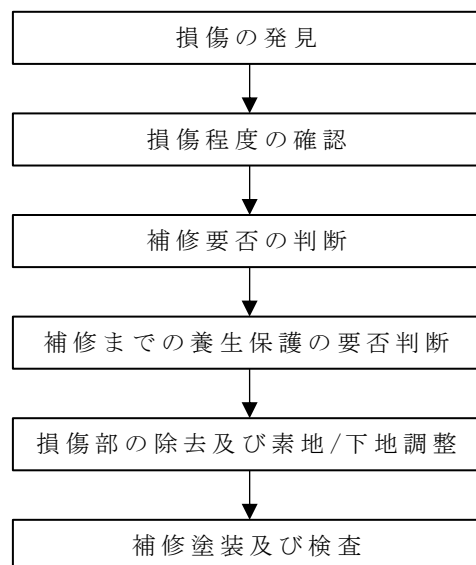
再処理施設は、寒冷地・塩害地域に設置しているため、地域特有の劣化が生じるのか耐火塗装の寒冷地・塩害地域での施工実績を確認した。確認の結果、施工後における塗膜劣化の事例は確認できないことから寒冷地と塩害地域特有の影響は生じないと考えられるため、寒冷地と塩害地域を限定とした特別な点検は不要と考えられる。

ただし、塗装面に傷や劣化があれば一般地域に比べて劣化速度が早まることが予想されるため、上記「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"> ・カッターや動力工具等で削り取る。 ・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。 ・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。 	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、主材の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>← 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>
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"> ・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。 ・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。 ・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。 	同左	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、主材の白色のため上塗りと主材は区別することができる。

別紙

外外火 04 【航空機墜落による火災の防護設計について】

別紙				備考
資料 No.	名称	提出日	Rev	
別紙-1	燃料加工建屋の評価書	6 / 16	1	
別紙-2	冷却塔の評価書	6 / 16	0	
別紙-3	竜巻ネットの評価書	<u>6 / 25</u>	<u>2</u>	
別紙-4				
別紙-5				
別紙-6				
別紙-7				
別紙-8				
別紙-9				
別紙-10				
別紙-11				
別紙-12				
別紙-13				
別紙-14				
別紙-15				

令和3年6月16日 R1

別紙-1

燃料加工建屋の評価書

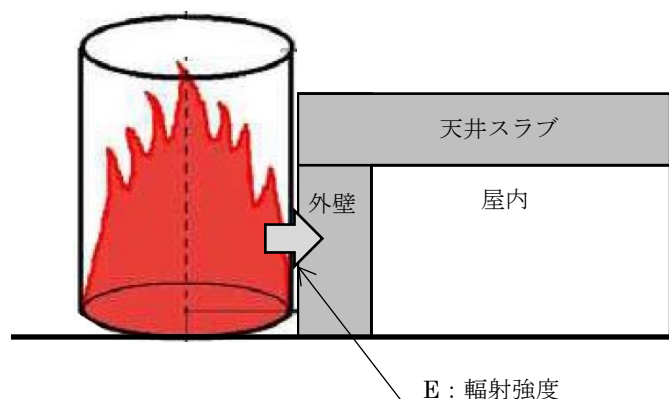
目 次

1. 燃料加工建屋の評価の概要	1
2. 評価対象部位について	1
3. 建屋外壁の熱影響評価	2
3. 1 建屋外壁の温度上昇	2
3. 2 外壁に許容温度を超える領域がある場合の評価	2
4. 評価結果	3
4. 1 外壁温度評価結果	3
4. 2 建屋外壁への要求機能の確認結果	3
4. 3 建屋全体の支持機能について	5
5. 参考文献	5

1. 燃料加工建屋の評価の概要

燃料加工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、天井スラブ及び外壁のうち、離隔距離が小さく輻射熱による影響が厳しい外壁を代表とし、より厳しい評価となるように外壁表面からの対流及び輻射放熱は考慮せず、火災からの輻射のエネルギー（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1-1図に示す。

第1-1図の計算モデルを用いた熱影響評価により、外壁の温度上昇に伴い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、燃料加工建屋外壁が要求される機能を損なわないことを確認する。



第1-1図 燃料加工建屋の計算モデル

2. 評価対象部位について

評価にあたっては、天井スラブ及び外壁のうち、離隔距離が小さく輻射熱による影響が厳しい外壁を代表とする。天井スラブの評価は以下の理由から、外壁の評価に包絡される。

- (1) 火炎長が天井スラブより低い場合、天井スラブに輻射熱を与えないことから熱影響はない。
- (2) 火炎長が天井スラブより高い場合、天井スラブに輻射熱を与えるが、離隔距離が大きくなることから、その輻射熱は外壁に与える輻射熱より小さい。^{注1}
- (3) 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。^{注1}

注1：燃料加工建屋天井スラブの最小厚さは15cm以上あり、航空機墜落火災の入熱を考慮しても内壁は初期温度(50℃)程度に収まると評価している。

3. 建屋外壁の熱影響評価

3. 1 建屋外壁の温度上昇

燃料加工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⁽¹⁾に基づき算出する。

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

ここで、

T : 外壁の内部温度(°C)

x : 外壁表面からの深さ(m)

t : 燃焼時間(s)

T_0 : 初期温度(°C)

E : 輻射強度(W/m²)

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

λ : コンクリート熱伝導率(W/mK)

ρ : コンクリート密度(kg/m³)

c : コンクリート比熱(J/kg·K)

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

燃料加工建屋外壁に対する熱影響評価の計算条件を第3-1表に示す。

第3-1表 燃料加工建屋の外壁を対象とした熱影響評価の計算条件

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

1) : 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/m²を加算。

3) : 遮蔽設計の最小値

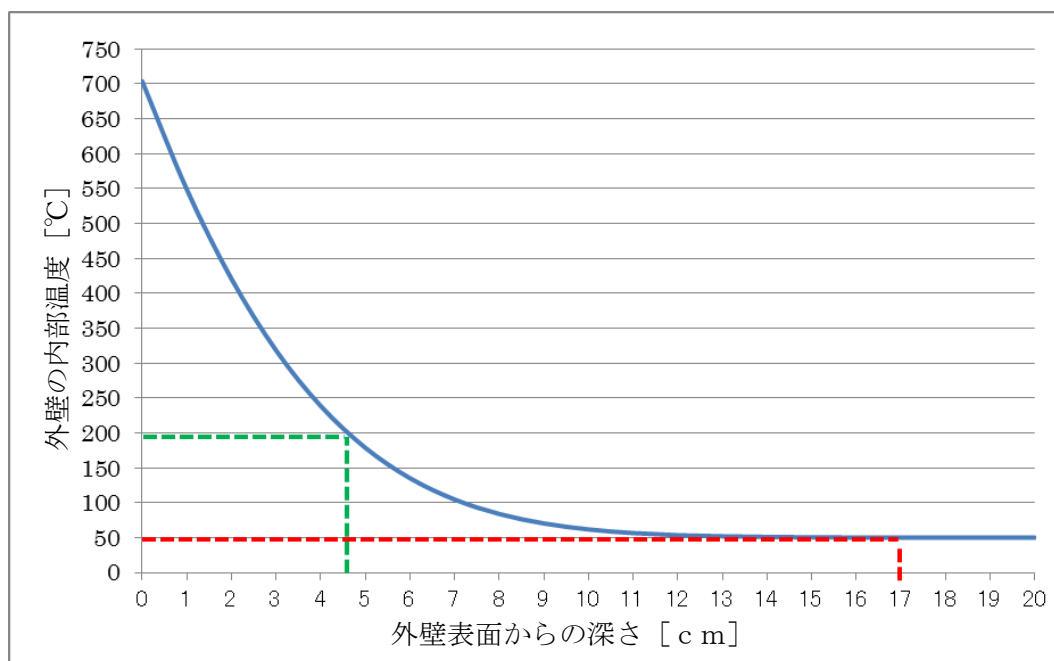
3. 2 外壁に許容温度を超える領域がある場合の評価

外壁の許容温度を超える領域については、コンクリート強度低下等の損傷が想定される。外壁の内部温度の評価についてはコンクリートの深さ方向の温度上昇を確認する。また、許容温度を超える領域のコンクリート強度低下を考慮したとしても建屋外壁が要求される機能を損なわないことを確認する。

4. 評価結果

4. 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4-1図に示す。



第4-1図 燃料加工建屋外壁を対象とした熱影響評価結果

評価の結果、外壁表面より約17cmで初期温度(50°C)となり、入熱による影響がなくなることが分かる。これに対し、燃料加工建屋の外壁厚は1.3mであることから、建屋内に収納する外部火災防護対象施設の安全機能は損なわれない。

また、内部温度は外壁表面から深さ約5cmの領域においてはコンクリートの許容温度200°C⁽³⁾以上となる。日本建築学会「建物の火災診断および補修・補強方法指針・同解説」及び「構造材料の耐火性ガイドブック」を参考に鉄筋コンクリートの影響を想定すると、外壁の表層部分のコンクリートひび割れ、外壁表面から深さ約5cm未満までのコンクリート強度低下が想定される。また、鉄筋では受熱温度が500~600°C以下であれば加熱冷却後の残存強度は受熱前強度と同等⁽⁴⁾であるとされていることに対し、鉄筋位置は表面から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想定される。

4. 2 建屋外壁への要求機能の確認結果

上記4.1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4-1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4-1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	損傷部分(外壁表面から5cm)が無いとしても必要遮蔽厚150cmが確保できること(建屋内の壁も含めた最小壁厚約170cm)、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。

4. 3 建屋全体の支持機能について

想定される損傷を考慮した場合においても、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。

また、評価結果を第4-2表に示す。

- ・ 損傷範囲は長辺方向の外壁一面の深さ5cmとする。
- ・ 損傷範囲を減じた軸断面積A'にて支持重量Wを支えられることを軸応力度 σ (W/A')とコンクリートの許容圧縮応力度 f_c の比較により確認する。

第4-2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	支持重量	軸断面積		軸 応力度	許容 応力度	断面 裕度
	T.P.		W	A	A'	σ	f_c
	m	kN	m ²	m ²	N/mm ²	N/mm ²	$1 < \alpha$
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。

5. 参考文献

- (1) 日本機械学会. 伝熱工学資料 改訂第4版. 1986.
- (2) 日本建築学会. 原子炉建屋構造設計指針 同解説. 1988.
- (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.

令和3年6月16日 R0

別紙－2

冷却塔の評価書

修正作業中

目 次

1. 概要	1
2. 評価対象部位の選定について	1
2. 1 冷却能力の維持に必要な部位の選定	1
2. 2 評価対象部材の選定	4
3. 遮熱板	9
3. 1 遮熱板構造図	9
4. 評価方針について	10
4. 1 冷却水の評価条件	10
4. 2 冷却に必要な部位の評価方針	12
4. 3 支持構造物の評価方針	21
5. 許容温度	22
5. 1 冷却水の許容温度	22
5. 2 冷却機能に必要な部位の許容温度	22
6. 評価条件	22
6. 1 冷却水の評価条件	22
6. 2 冷却機能に必要な部位の評価条件	23
7. 評価結果	26
7. 1 冷却水の評価結果	26
7. 2 冷却機能に必要な部位の評価結果	26
7. 3 支持構造物の評価結果	29

1. 概要

本資料は、航空機墜落火災に対する、再処理施設の安全冷却水B冷却塔（以下、「冷却塔」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（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

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

2. 評価対象部位の選定について

冷却塔は、再処理施設本体へ供給する冷却水を冷却する設備であり、冷却水は崩壊熱により溶液が沸騰することを防止するために必要な機器の発熱を冷却する機能を有している。航空機墜落火災に対し、冷却塔の有する冷却機能を維持するために必要な部位と評価対象部位を抽出する。

冷却塔の概要図を第2-1図及び第2-2図に示す。

2. 1 冷却能力の維持に必要な部位の選定

冷却塔の機能を維持するために、必要となる部位として、大気へ熱を放熱する部位かつ冷却水の流路である管束、冷却水の配管、冷却用の空気を送風するファン駆動部、それらの部位を支持する支持架構を選定した。

冷却塔の冷却能力の維持に必要な部位の選定結果を第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
冷却水	[Redacted]	安全冷却水系の冷却水
管束・配管		冷却に必要な部位
ファン駆動部		冷却に必要な部位
支持架構		支持構造物

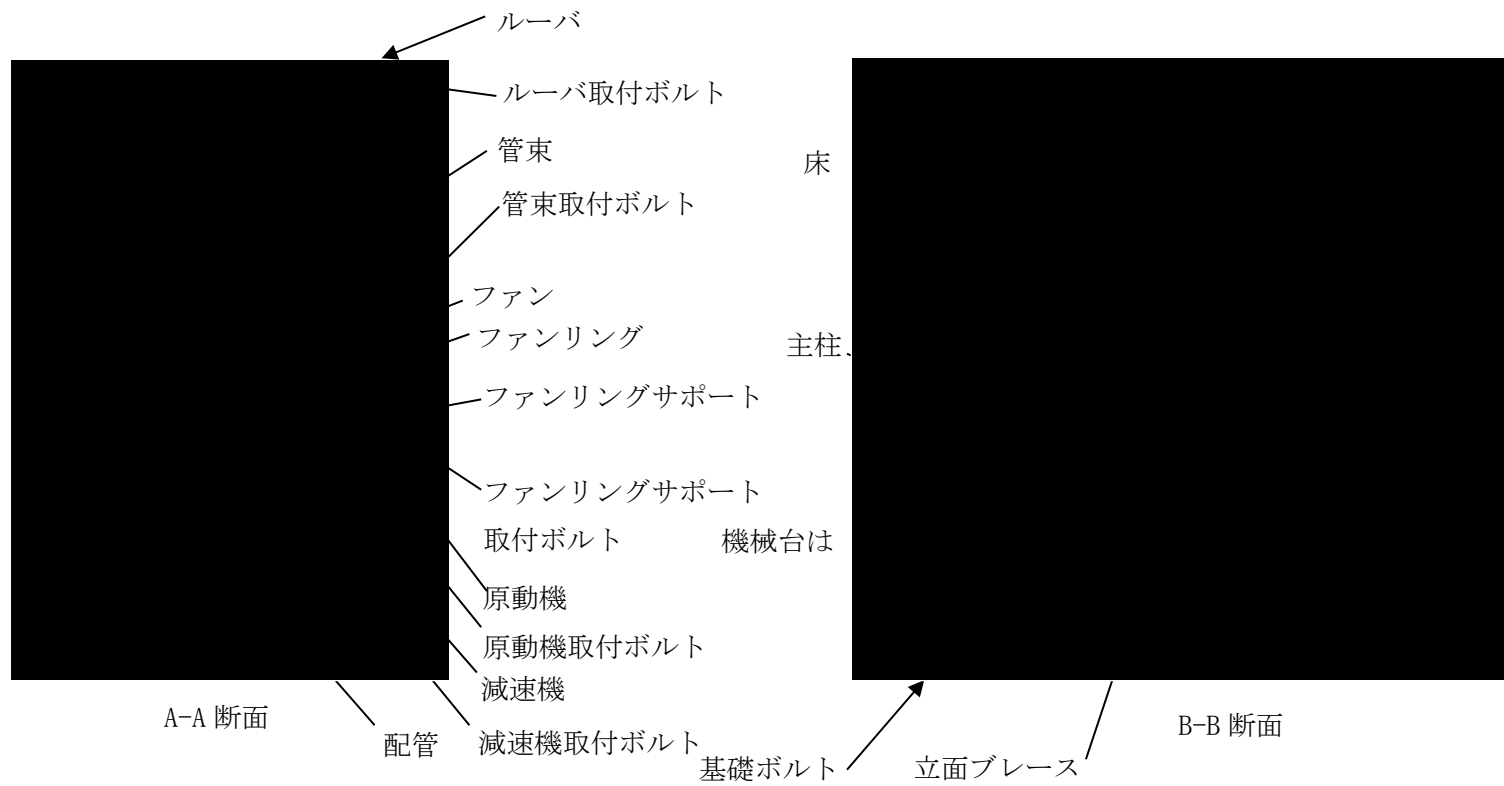
■ については商業機密の観点から公開できません。



第2-1図 安全冷却水B冷却塔 概要図

■ については商業機密の観点から公開できません。

外外火 04-別紙 2-2



第 2 - 2 図 安全冷却水 B 冷却塔 断面概要図

■ については商業機密の観点から公開できません。

第 2 - 2 表 管束および配管の評価対象の選定

部位	機能	選定結果	選定理由
伝熱管	[Redacted]	—	[Redacted]
チューブサポート		○	
管束フレーム		○	
ヘッダー		—	
配管		—	
取付けボルト※		○	

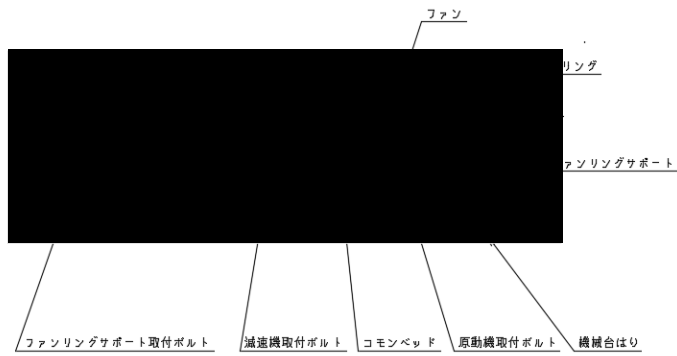
※ [Redacted]
[Redacted]
[Redacted]

(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。

[Redacted]
[Redacted]

[Redacted] については商業機密の観点から公開できません。



第 2 - 4 図 ファン駆動部構造図

■ については商業機密の観点から公開できません。

第 2 - 3 表 ファン駆動部の評価対象の選定

部位	機能	選定結果	選定理由
ファンリング	[Redacted]	○	[Redacted]
ファン		○	
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		○	

※ [Redacted]
[Redacted]

(4) 支持架構

[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]

[Redacted] については商業機密の観点から公開できません。

(5) まとめ

安全冷却水 B 冷却塔の評価対象部位の選定結果一覧を第 2-4 表に示す。

第 2-4 表 安全冷却水 B 冷却塔 評価対象の選定

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

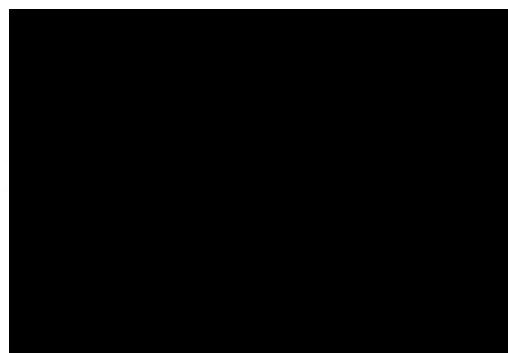
< 凡例 > ○ : 評価対象部位, — : 評価対象外

■ については商業機密の観点から公開できません。

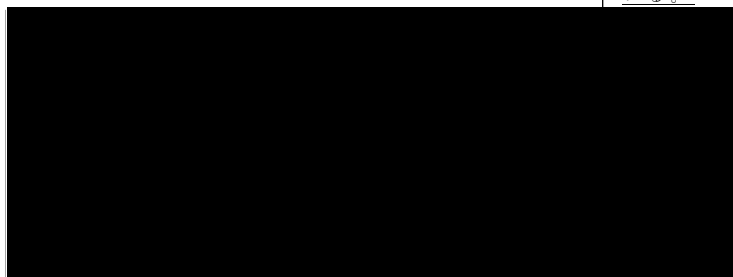
3. 遮熱板

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。



※遮熱板の配置については，配置箇所毎に個別に異なるため本図では例として示している。



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	6 m m
塗装仕様	耐火被覆厚さ 3 m m

■ については商業機密の観点から公開できません。

4. 評価方針について

4. 1 冷却水の評価方針

冷却水の評価方針を以下に示す。

(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て(1)式から算出する。

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

ここで、R：燃焼半径(m)

S：燃焼面積(m²)

(2) 形態係数の算出

以下の条件において(2)式から形態係数を算出する。計算モデルの概略を第4-1図に示す。

- ・ 受熱面の姿勢は、鉛直受熱面とする。
- ・ 受熱面の高さは、形態係数が最大となる火柱の中央高さで代表する。
- ・ 冷却塔本体による遮熱は考慮しない。
- ・ 冷却塔の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。

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

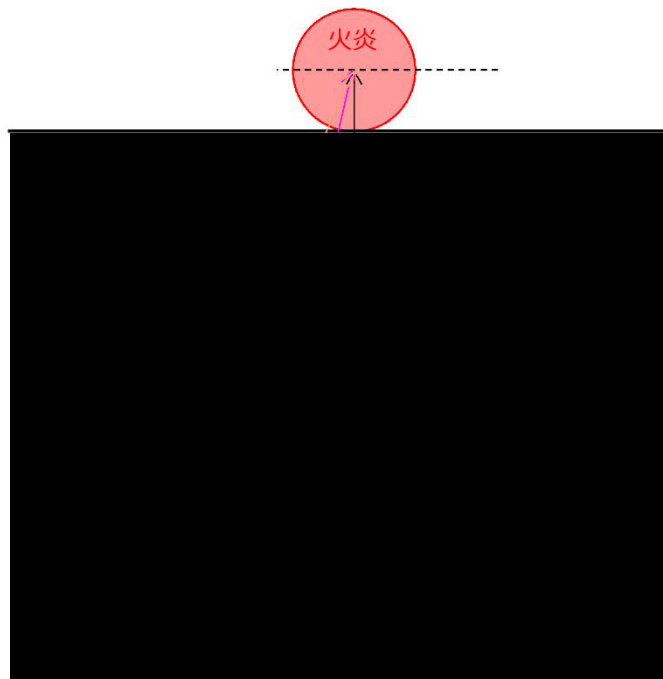
ただし、 $m = \frac{H}{R} = 3$, $n = \frac{L}{R}$, $A = (1 + n)^2 + m^2$, $B = (1 - n)^2 + m^2$

ここで、 ϕ ：形態係数

L：離隔距離(m)

H：火炎の高さ(m)

R：燃焼半径(m)



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 (3) 式より輻射強度 E を算出する。なお、輻射強度 E の算出に当たっては保守的な評価となるように太陽輻射を加えた。

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

ここで、 E : 輻射強度 (W/m^2)

Rf : 輻射発散度 (W/m^2)

ϕ : 形態係数

E_0 : 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温度の上昇を以下の (4) 式により算出する。

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

ここで、 ΔT : 火炎からの輻射による出口温度上昇 (K)

E : 火炎からの輻射強度 (W/m^2)

A : 配管の受熱面積 (m^2)

G : 冷却水流量 (m^3/s)

■ については商業機密の観点から公開できません。

ρ : 冷却水密度 (k g / m³)
 C_p : 冷却水比熱 (J / k g · K)

4. 2 冷却に必要な部位の評価方針

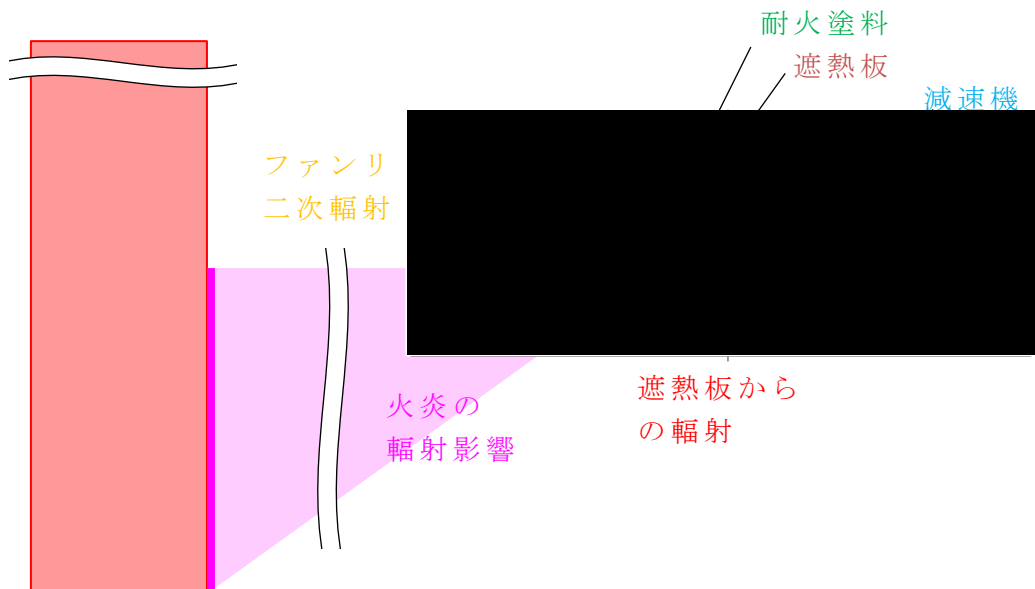
4. 2. 1 減速機の評価方針

(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

減速機の形態係数算出においては、遮熱板からの二次的影響を考慮することとし、計算モデルの概略を第4-2図に示す。



第4-2図 減速機が受ける放射熱

それぞれの放射熱について、以下の通り形態係数を算出する。

①火炎放射熱

「4. 1 冷却水の評価方針 (2) 形態係数の算出」と同様に算出する。

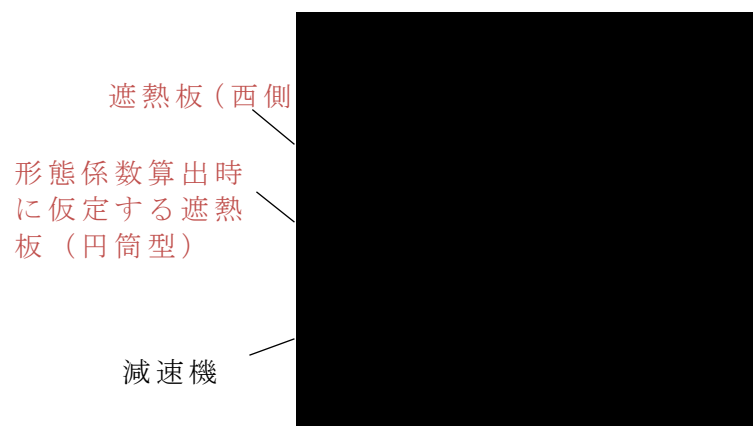
②ファンリング二次放射

ファンリングの昇温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放射を考慮するものとする。さらに、第4-3図に示すように、減速機周囲の遮熱板について、ファンリングとの距離が近くなるよう円筒型として保守的に仮定し、第4-4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。

■ については商業機密の観点から公開できません。

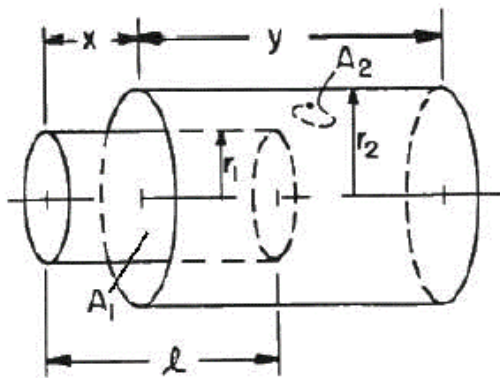
③ 遮熱板－減速機

入熱が大きくなるよう形態係数は $F_p = 1$ とする。



第 4 - 3 図 減速機・遮熱板 平面図

■ については商業機密の観点から公開できません。



A_1 : 内筒の外表面積 [m²]
 A_2 : 外筒の内表面積 [m²]
 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]

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

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

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

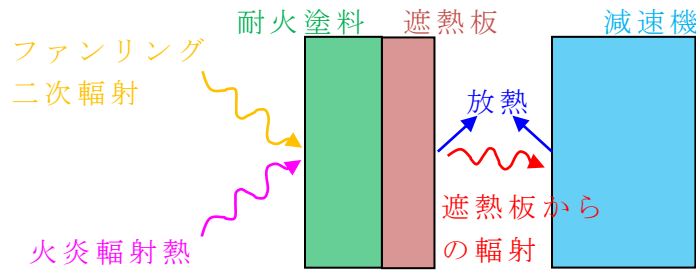
$$F_{1-2} = \frac{X}{L} F_X + \frac{L-X}{L} (1 - F_{L-X}) + \frac{Y+X-L}{L} F_{Y+X-L} - \frac{X+Y}{L} F_{X+Y}$$

第4-4図 二重円筒の形態係数^[2]

(3) 温度評価

評価モデルの概略図を第4-5図に示す。本評価では、耐火塗料、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、南北およ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、保守的に減速機的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的全周囲に設定する。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 - 5 図 温度評価モデル

それぞれの評価点の温度は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 Δt 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 [sec]

Δt : 時間刻み [sec]

Q : 熱の授受量 (輻射入熱, 放熱, 熱伝導) [W]

ρ : 評価点の部材の密度 [k g / m³]

C_p : 評価点の部材の比熱 [J / (k g K)]

V : 評価点の部材の体積 [m³]

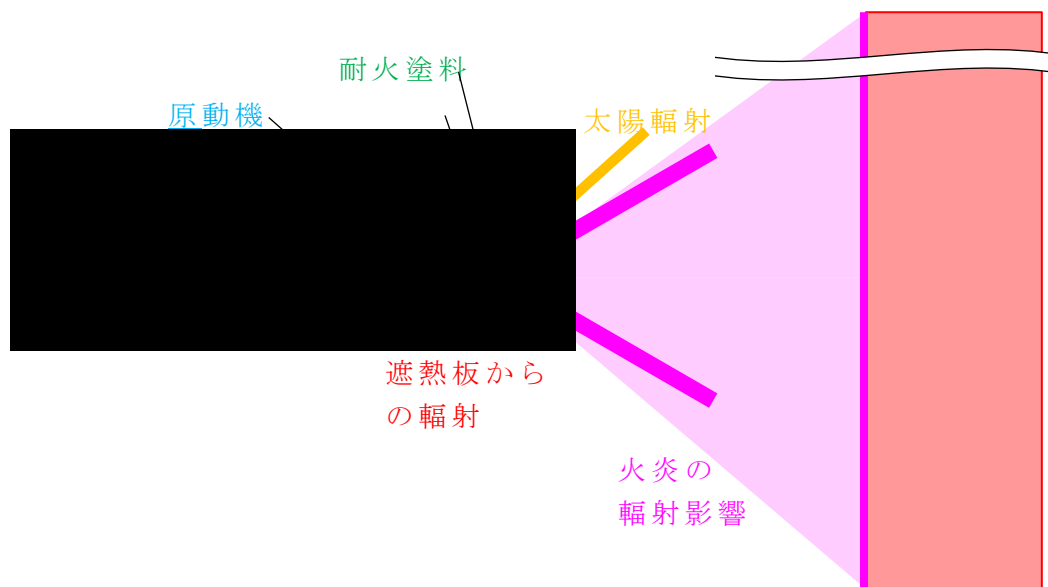
4. 2. 2 原動機の評価方針

(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

原動機の形態係数算出においては, 遮熱板からの二次的影響を考慮することとし, 計算モデルの概略を第 4 - 6 図に示す。



第4-6図 原動機が受ける輻射熱

①火炎輻射熱

「4.1 冷却水の評価方針 (2) 形態係数の算出」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。

②遮熱板-原動機

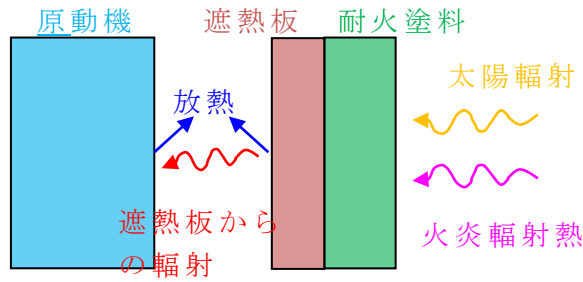
入熱が大きくなるよう形態係数は $F_p = 1$ とする。

(3) 温度評価

評価モデルの概略図を第4-7図に示す。本検討では、耐火塗料、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、南北およ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）を設定する。

■ については商業機密の観点から公開できません。



第 4 - 7 図 温度評価モデル

それぞれの評価点の温度は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 Δt 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 [sec]

Δt : 時間刻み [sec]

Q : 熱の授受量 (輻射入熱, 放熱, 熱伝導) [W]

ρ : 評価点の部材の密度 [k g / m³]

C_p : 評価点の部材の比熱 [J / (k g K)]

V : 評価点の部材の体積 [m³]

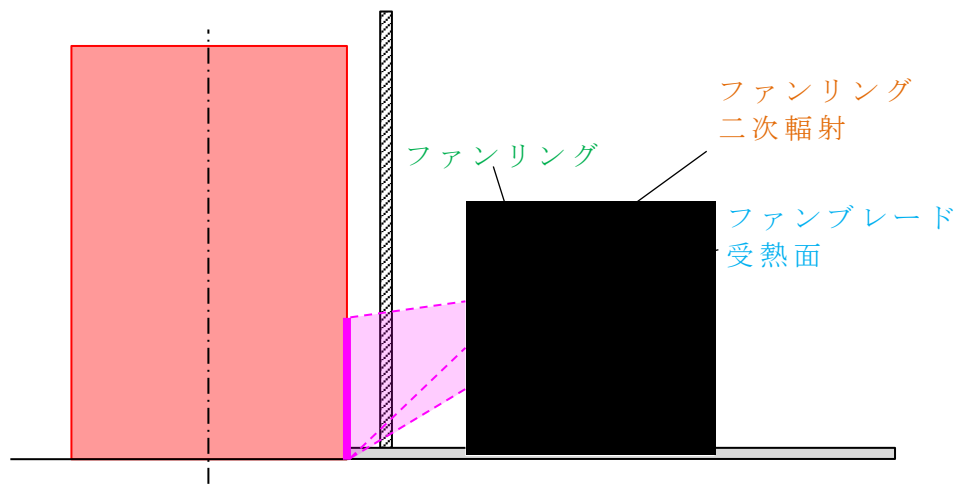
4. 2. 3 ファンの評価方針

(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

ファンが受ける輻射熱の概要図を第 4 - 8 図に示す。ファンブレードの周囲には耐火塗装を施工したファンリングがあり, その遮蔽効果によりファンブレードは下方から火炎の輻射熱を受ける。また, 火災中に昇温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4-8図 ファンブレードが受ける輻射熱

①火炎輻射熱

「4.1 冷却水の評価方針 (2) 形態係数の算出」と同様に、受熱面の姿勢を水平面として算出する。

②ファンリング二次輻射

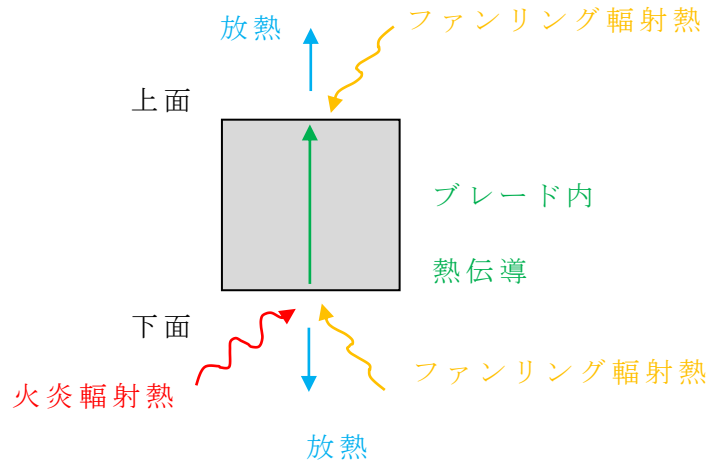
ファンリングの昇温は火炎側だけで生じるが、本評価では保守的に全周からの二次輻射を考慮するものとする。この場合、第4-11図に示す円筒内面と円盤面の計算モデルにおいて、円筒をファンリング、円盤をファンブレードと考え、形態係数を算出する。

(3) 温度評価

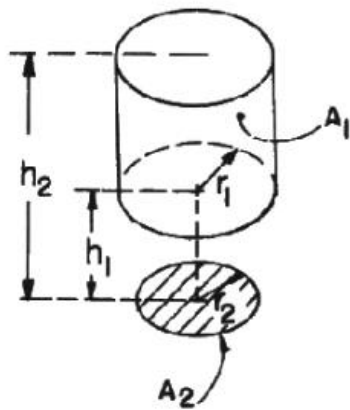
評価モデルを第4-9図に示す。評価モデルの考え方を以下に示す。

- ・ファンブレードの材質であるFRPは熱伝導率が小さいことから、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1400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。
- ・火炎およ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。

■ については商業機密の観点から公開できません。



第 4 - 9 図 温度評価モデル



$$R = r_1/r_2; H_1 = h_1/r_2$$

$$H_2 = h_2/r_2$$

$$X = H^2 + R^2 + 1$$

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 [m²]

A_2 : 円盤面積 [m²]

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

円盤（ブレード）を基準とする形態係数は次式である。

$$F_{21} = F_{12} \frac{A_1}{A_2}$$

第 4 - 10 図 円筒内面と円盤面の形態係数^[2]

ファンブレードの評価点の温度は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 Δt 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 [sec]

Δt : 時間刻み [sec]

Q : 熱の授受量 (輻射入熱, 放熱, 熱伝導) [W]

ρ : 評価点の部材の密度 [kg / m³]

C_p : 評価点の部材の比熱 [J / (kg K)]

V : 評価点の部材の体積 [m³]

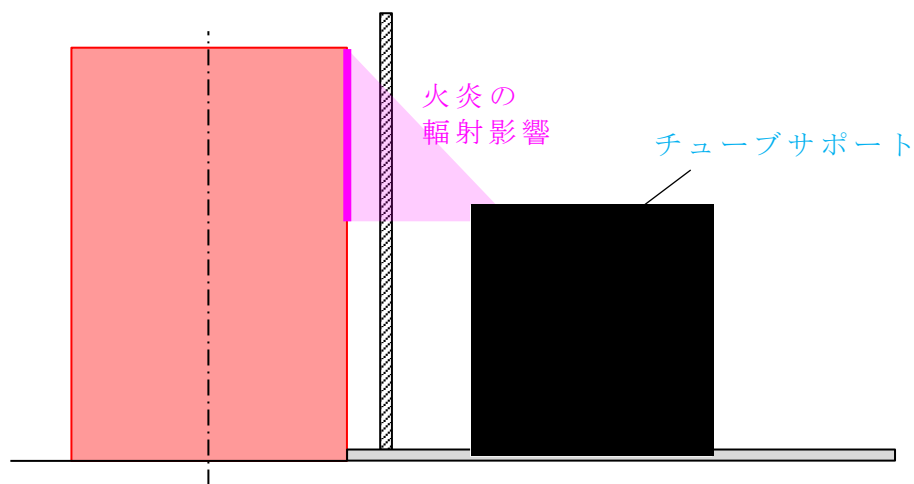
4. 2. 4 チューブサポートの評価方針

(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

チューブサポートの形態係数においては, 上方からの火炎の輻射熱を考慮することとし, 計算モデルの概略を第4-11図に示す。



第4-11図 チューブサポートが受ける輻射熱

■ については商業機密の観点から公開できません。

①火炎輻射熱

「2. 1 冷却水の評価方針 (2) 形態係数の算出」と同様に、受熱面の姿勢を水平面として算出する。太陽輻射を考慮する。

(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により算出する。

$$T = T_a + \frac{R_f \cdot \phi + E_o}{2 \cdot h}$$

T : チューブサポートの温度 [°C]

T_a : 雰囲気温度 [°C]

R_f : 輻射発散度 (W / m²)

φ : 形態係数

E_o : 太陽の影響による輻射強度 (W / m²)

h : 熱伝達率 (W / m² · K)

4. 2. 5 その他の部材

減速機、原動機およびファン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耐火試験にて確認する。

耐火試験においては、それぞれの部材の最小板厚およ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)
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
フレーム	■	約 5.5

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、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ファンリングの3.2mm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3.5mの輻射強度にて試験を実施する。

4. 3 支持構造物の評価方針

離隔距離表を用いて、火炎と評価対象部材の距離が離隔距離を上回っていることを確認する。

■ については商業機密の観点から公開できません。

第 6 - 3 表 熱影響評価に用いた諸元

項目	数値
配管の受熱面積 (m ²)	■
冷却水流量 (m ³ / s)	■
冷却水密度 (k g / m ³)	1,040
冷却水比熱 (J / (k g ・ K))	3,700

6 . 2 冷却機能に必要な部位の評価条件

減速機の計算条件を第 6 - 4 表, 原動機の計算条件を第 6 - 5 表, ファンの評価計算条件を第 6 - 6 表, チューブサポートの評価条件を第 6 - 7 表に示す。

■ については商業機密の観点から公開できません。

第 6 - 4 表 減速機の計算条件

パラメータ		単位	値
火炎の輻射発散度		W/m ²	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		W/(m ² -K)	12
初期・雰囲気温度		°C	29
耐火塗料	密度	kg/m ³	250
	比熱	J/(kg-K)	時間変化で与える
	熱伝導率	W/(m-K)	
遮熱板	密度	kg/m ³	7850
	比熱	J/(kg-K)	465
	熱伝導率	W/(m-K)	43
	厚み	m	0.006
減速機	重量	kg	■
	比熱	J/(kg-K)	
	入・放熱面積	m ²	

表 6 - 5 原動機の計算条件

パラメータ		単位	値
火炎の輻射発散度		W/m ²	58000
太陽の輻射熱		W/m ²	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)		W/(m ² -K)	12
放熱の熱伝達率 (運転中)		W/(m ² -K)	14(遮蔽板) 21(原動機)
初期・雰囲気温度		°C	29
耐火塗料	密度	kg/m ³	250
	比熱	J/(kg-K)	時間変化で与える
	熱伝導率	W/(m-K)	
遮熱板	密度	kg/m ³	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 ²	

■ については商業機密の観点から公開できません。

表 6 - 6 ファンの計算条件

パラメータ		単位	値
火炎の輻射発散度		W/m ²	58000
形態係数	火炎 - ブレード (下面)	-	0.030
	ファンリング - ブレード (上面)	-	0.175
	ファンリング - ブレード (下面)	-	0.245
放熱の熱伝達率		W/(m ² -K)	17
初期・雰囲気温度		°C	29
ファンブレード ■	密度	kg/m ³	■
	比熱	J/(kg-K)	
	熱伝導率	W/(m-K)	
	厚み	m	

表 6 - 7 チューブサポートの計算条件

パラメータ	単位	値
火炎の輻射発散度	W/m ²	58000
太陽の輻射熱	W/m ²	400
形態係数	-	0.086
放熱の熱伝達率	W/(m ² -K)	17
雰囲気温度	°C	29

■ については商業機密の観点から公開できません。

7. 評価結果

7. 1 冷却水の評価結果

[Redacted text]

7. 2 冷却機能に必要な部位の評価結果

7. 2. 1 減速機の評価結果

減速機の評価結果を第7-1図に示す。



第7-1図 減速機の評価結果

7. 2. 2 原動機の評価結果

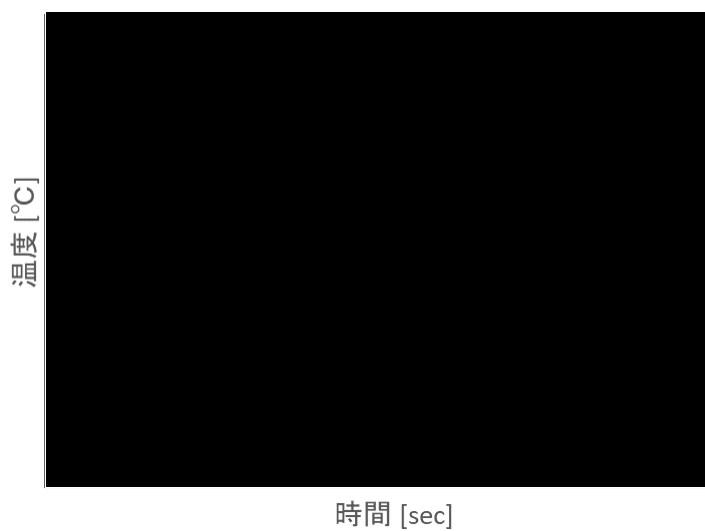
原動機の評価結果を第7-2図，第7-3図に示す。

[Redacted text]

[Redacted] については商業機密の観点から公開できません。



第 7 - 2 図 原動機の評価結果 (停止中)

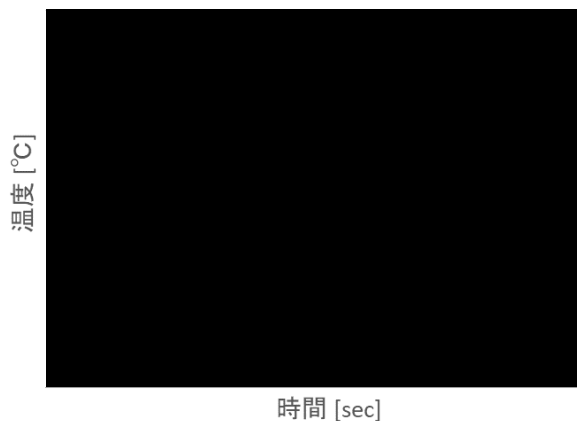


第 7 - 3 図 原動機の評価結果 (運転中)

7. 2. 3 ファンの評価結果

■ については商業機密の観点から公開できません。

ファンの評価結果を第7-4図に示す。



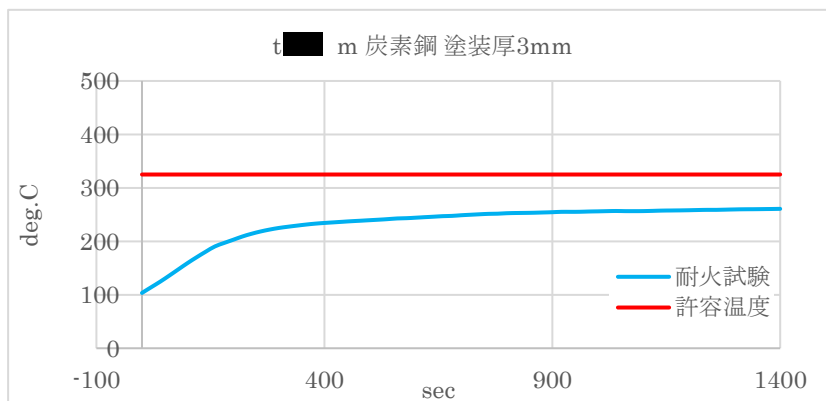
第7-4図 ファンの評価結果

7. 2. 4 チューブサポートの評価結果

$$T = 29 + \frac{58000 \times 0.086 + 400}{2 \times 17} = 188[^\circ\text{C}]$$

7. 2. 5 その他の部位の評価結果

ファンリングの板厚にて耐火試験を実施した結果を第7-5図に示す。温度上昇は約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 mm炭素鋼 耐火塗装厚3mmの耐火試験結果

■については商業機密の観点から公開できません。

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，梁およびブレースに対し，火炎との距離を評価した。

評価結果，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 / 2)

■ については商業機密の観点から公開できません。

外外火 04-別紙 2-30



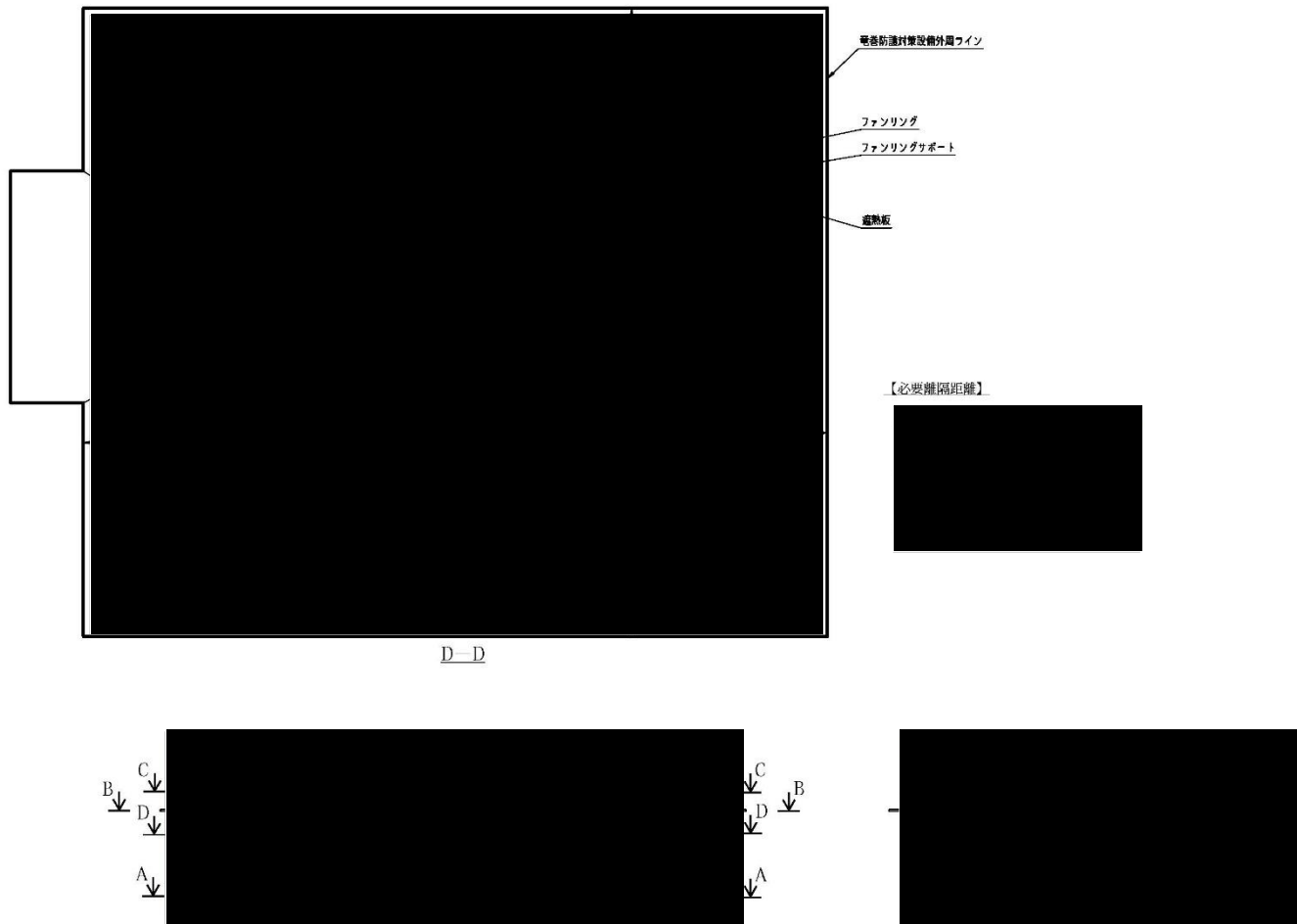
第 7 - 7 図 冷却塔の耐火被覆範囲図 (2 / 4)

■ については商業機密の観点から公開できません。



第 7 - 8 図 冷却塔の耐火被覆範囲図 (3 / 4)

■ については商業機密の観点から公開できません。



第 7 - 9 図 冷却塔の耐火被覆範囲図 (4 / 4)

■ については商業機密の観点から公開できません。

令和3年6月25日 R2

別紙－3

竜巻ネットの評価書

目 次

1. 概要	1
2. 評価対象部位の選定について	1
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	5
2. 2 評価対象部材の選定	5
3. 評価方針について	7
3. 1 支持構造物の評価方針	7
4. 評価結果	7
4. 1 支持構造物の評価結果	7

1. 概要

本資料は、航空機墜落火災に対する、再処理施設の安全冷却水B冷却塔飛来物防護ネット（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。

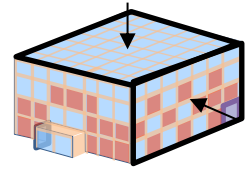
また、本資料は、第1回申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

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

2. 評価対象部位の選定について

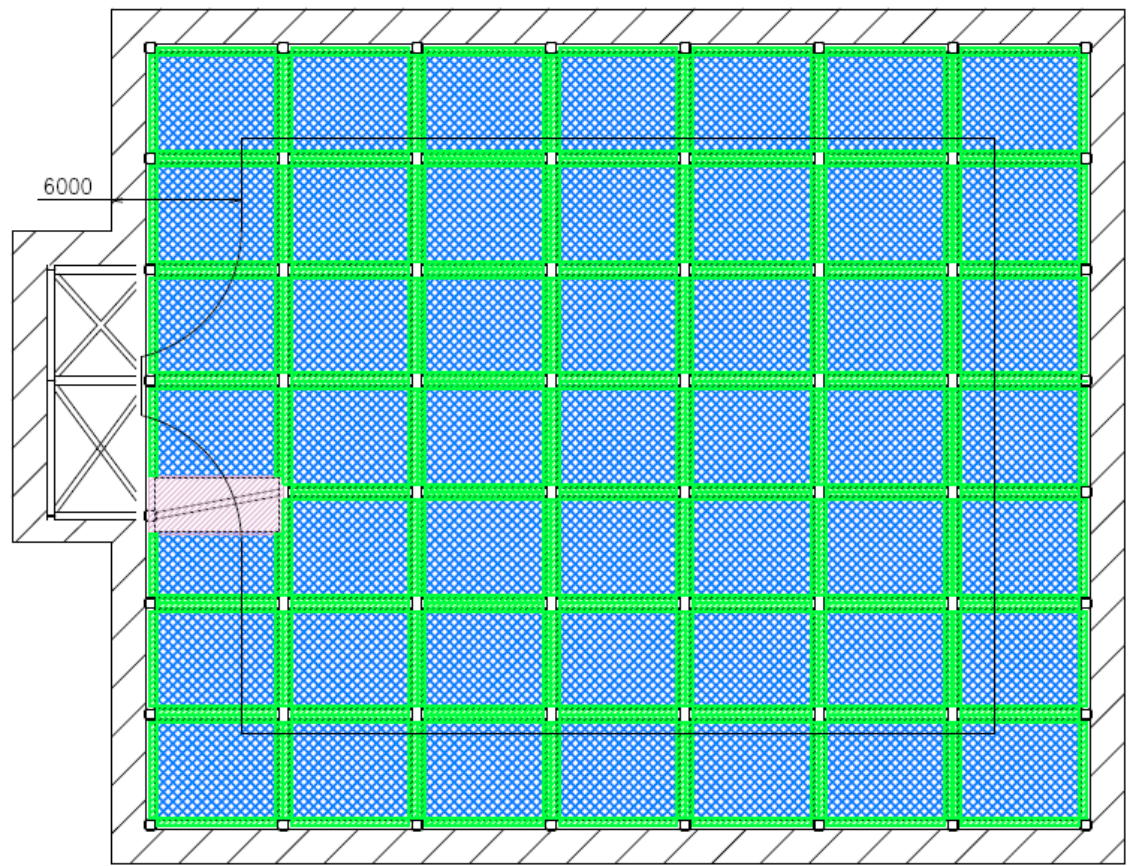
飛来物防護ネットは、竜巻襲来時において、安全冷却水B冷却塔へ飛来物が衝突することを防止するための設備であり、竜巻襲来時にその機能を求められることとなる。そのため、航空機墜落火災においては、飛来物の衝突を考慮する必要がないことから、安全冷却水B冷却塔へ波及的影響を及ぼさないことが求められる。安全冷却水B冷却塔へ波及的影響を及ぼさないために必要な部位と評価対象部位を抽出する。

飛来物防護ネットの概要図を第2-1図に示す。

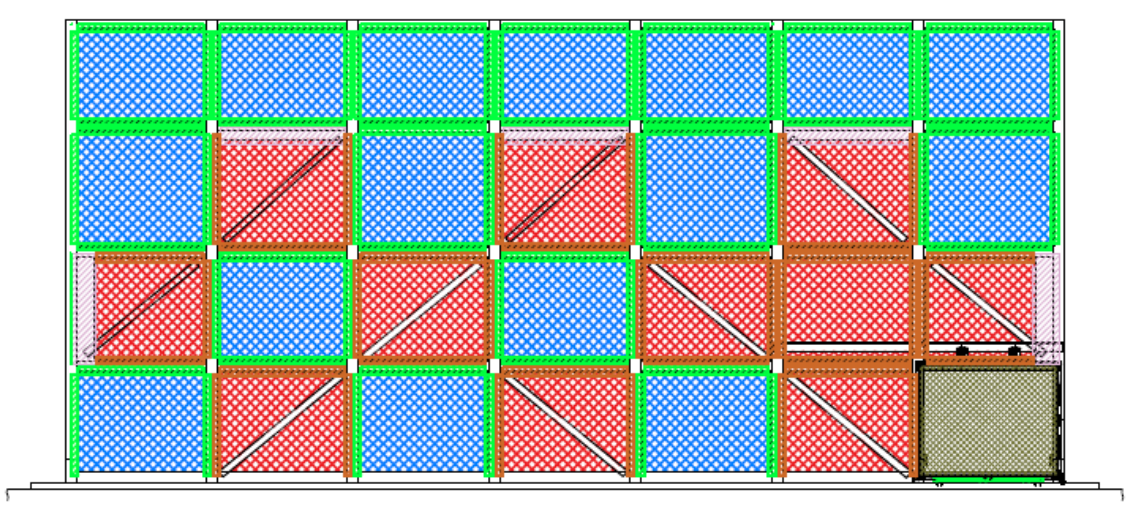


【凡例】

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



(天面)



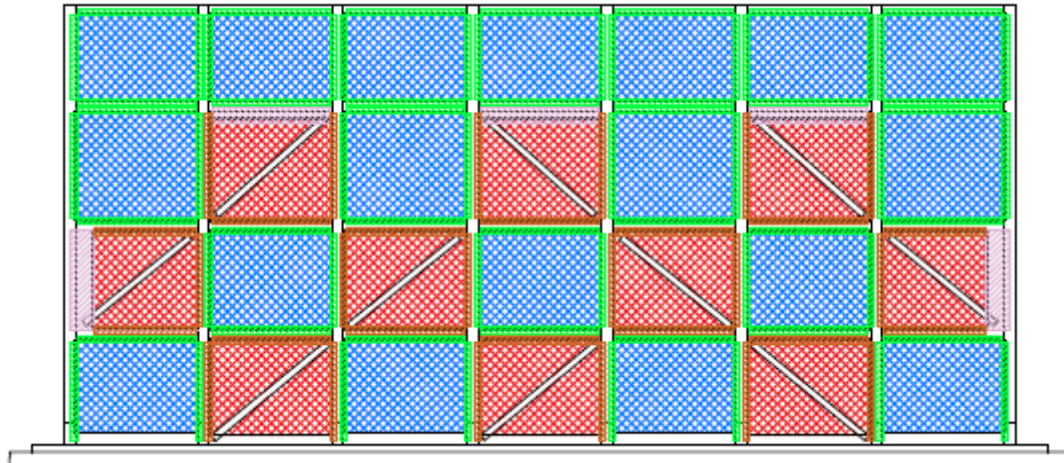
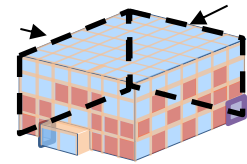
(南面)

第 2-1 図 防護ネット及び防護板割付図 (1 / 3)

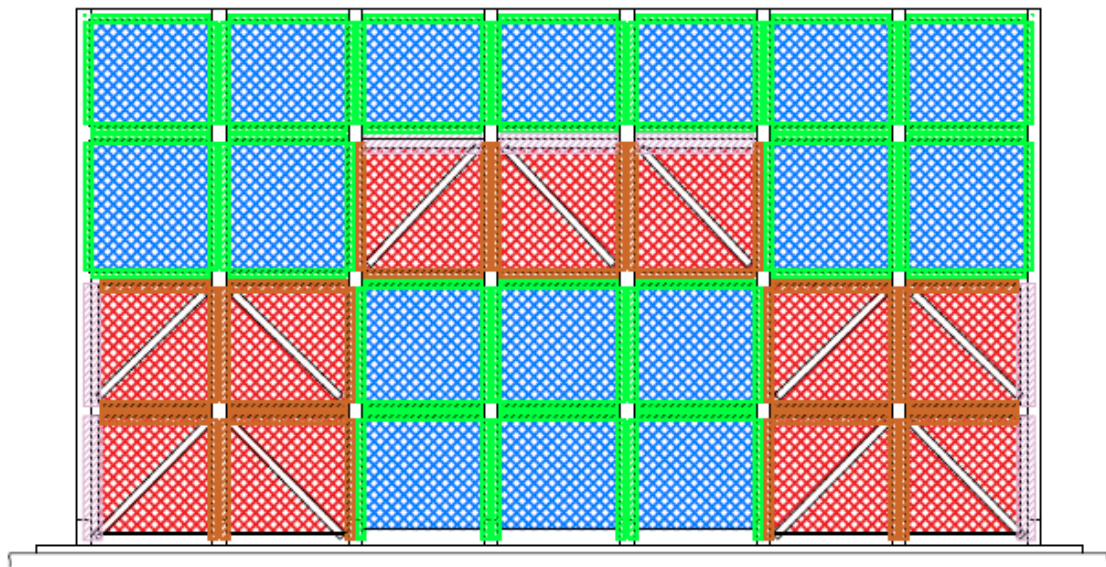
【凡例】

外張りネット : 内張りネット : 防護板

車面用扉 : 補助防護板（外取付） : 補助防護板（内取付）



(北面)

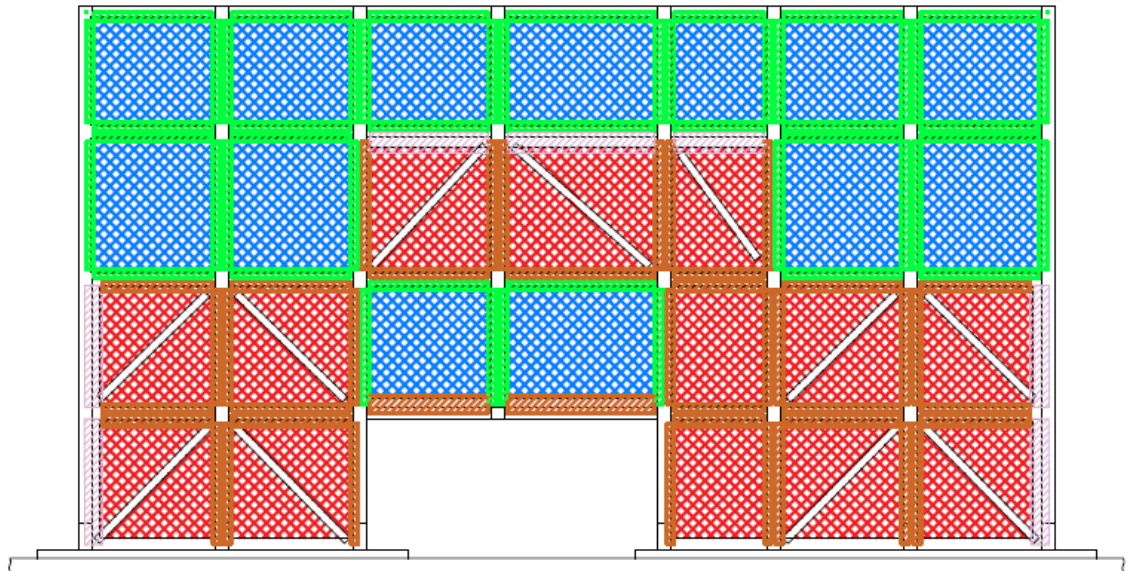
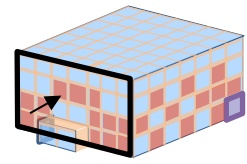


(東面)

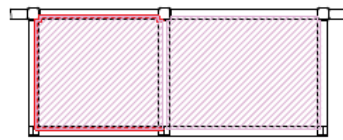
第2-1図 防護ネット及び防護板割付図 (2/3)

【凡例】

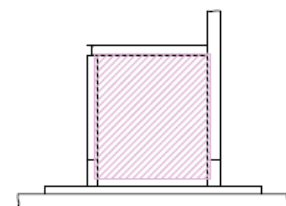
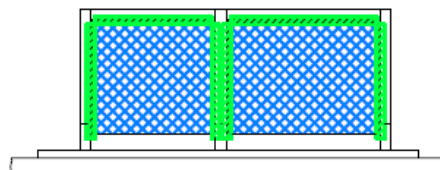
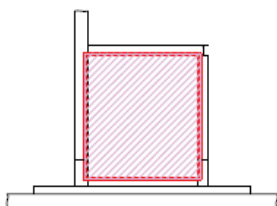
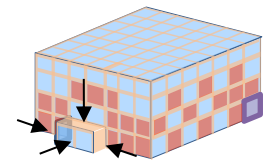
- : 外張りネット
- : 内張りネット
- : 防護板
- : 車両用扉
- : 補助防護板（外取付）
- : 補助防護板（内取付）



(西面)



(張出し部天面)



(張出し部南面, 北面及び西面)

第2-1図 防護ネット及び防護板割付図 (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。そのため、物理的影響を及ぼし得る部位について抽出する。

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	防護ネットの重量は軽量であり、例え天井部の防護ネットが脱落したとしても、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。 <u>また、車両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柵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、当該ネットについても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。</u>	二
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、水平ブレース、鉛直ブレース、により構成されている。

支持架構を構成する部位が損傷した場合、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。

設計方針「支持構造物」に基づいた設計を実施することとし、防護対策の施工を前提とする。

(2) 防護板/補助防護板

鋼板およ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。設計方針「支持構造物」に基づいた設計を実施することとし、防護対策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	○	離隔距離表を用いた評価を実施する。 離隔距離を満足しない部材がある場合には耐火被覆を施工する。
	大梁		
	小梁		
	トラス柱		
	水平ブレース		
	鉛直ブレース		
防護ネット		—	—
防護板 補助防護板	鋼板	○	離隔距離表を用いた評価を実施する。 離隔距離を満足しない部材がある場合には耐火被覆を施工する。
	取付けボルト	○	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

離隔距離表を用いて、火災と評価対象部材の距離が離隔距離を上回っていることを確認する。

火災と評価対象部材の距離が下回っている場合は、耐火被覆 2 mm を施工する。

波及的影響を考慮する施設である飛来物防護ネットは、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、支持架構は構造健全性を確保していることを確認する。評価においては、航空機墜落火災と重畳を考慮する、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

離隔距離表に基づき、支持架構を構成する柱、梁およびブレースに対し、火災との距離を評価した。

評価結果、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。飛来物防護ネットの支持架構、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 図に示す。

飛来物防護ネットの支持架構に取付いている防護ネットについては、その機能の阻害とならないように塗装しないこととする。なお、塗装しないことによる防護ネット取付金物周辺の塗装範囲を第 4-3 図、防護ネット（車両用扉）周辺の塗装範囲を第 4-4 図に示す。

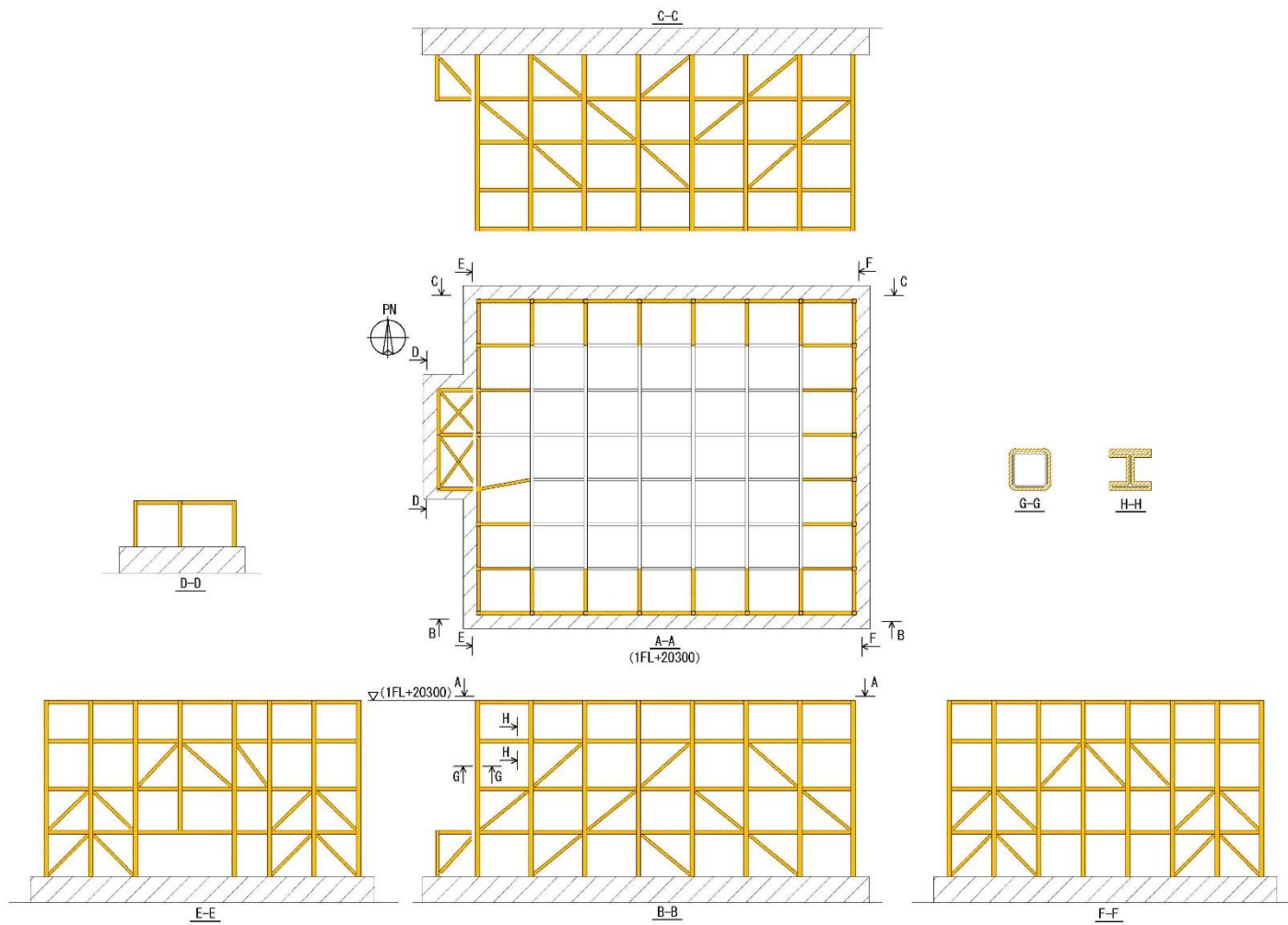
飛来物防護ネットを構成する柱、梁およびブレース材は耐火被覆の厚さ検討に用いた代表部材（SUS304, 9mm）より板厚を有している鋼材で構成されていることから、耐火被覆施工後、鋼材の温度上昇が許容温度内であることを試験結果より確認した。

また、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）の評価結果を表 4-1 に示す。飛来物防護ネットの支持架構は、許容値を満足しており、構造健全性が確保されていることを確認した。

第 4-1 表 飛来物防護ネットの評価結果

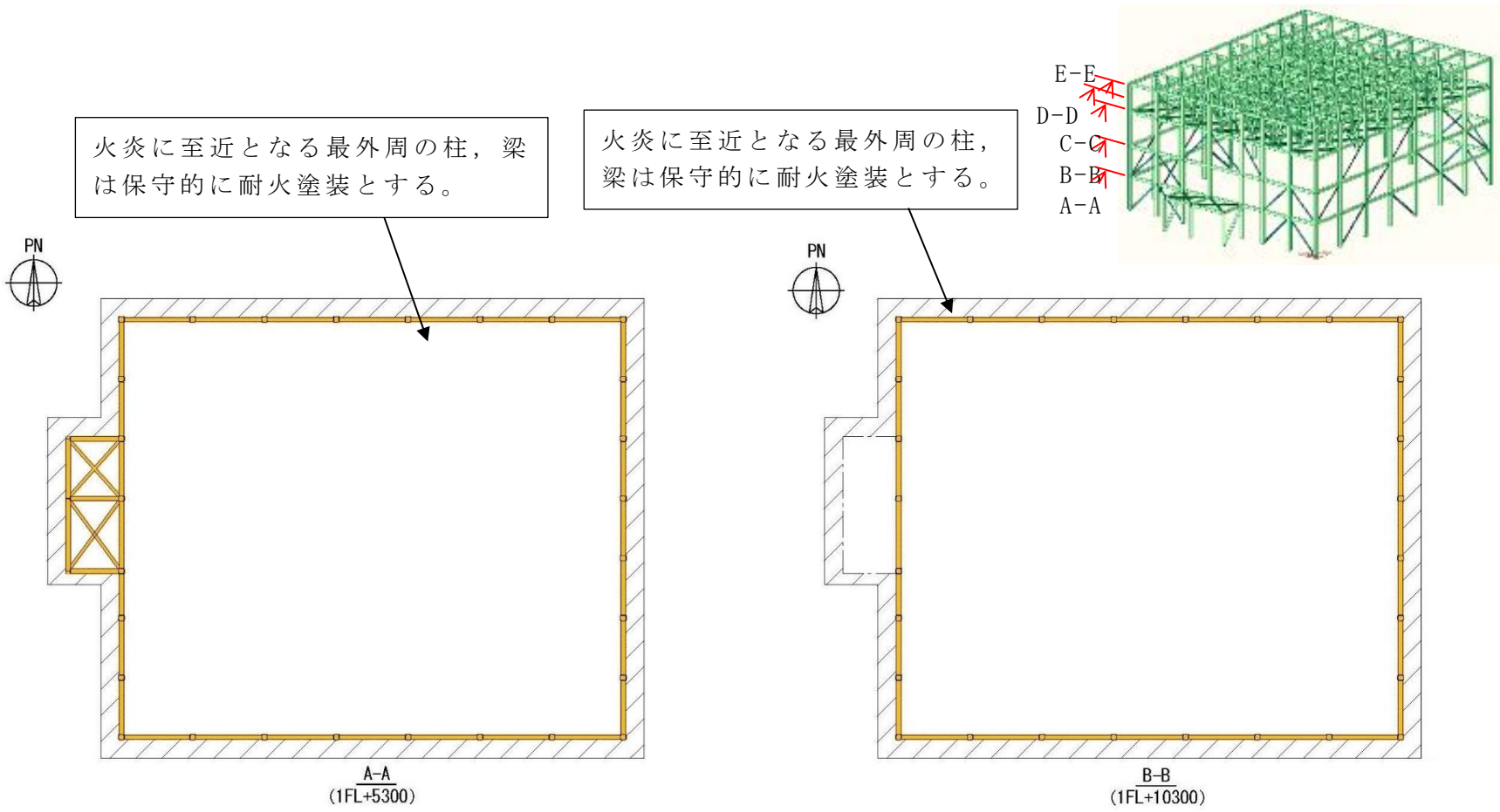
部位	最大応力度比 (常温)	最大応力度比 ^(注) (450℃)
柱	0.35	0.53
大梁	0.24	0.36
小梁	0.37	0.55
トラス柱	0.29	0.43
鉛直ブレース	0.28	0.42
水平ブレース	0.14	0.21

注：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



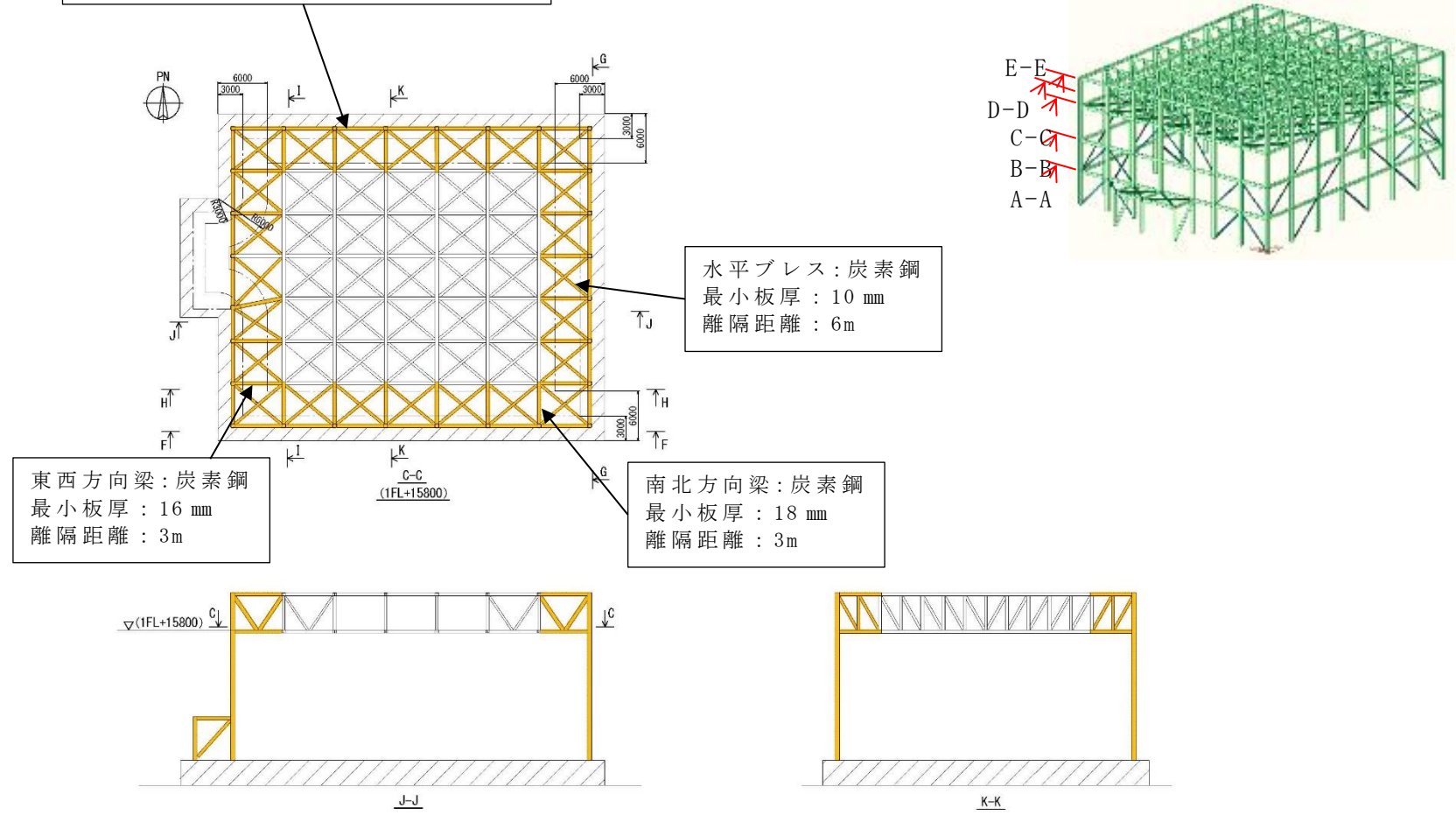
第 4 - 1 図 飛来物防護ネット塗装図 (1 / 4)

外外火 04-別紙 3-8

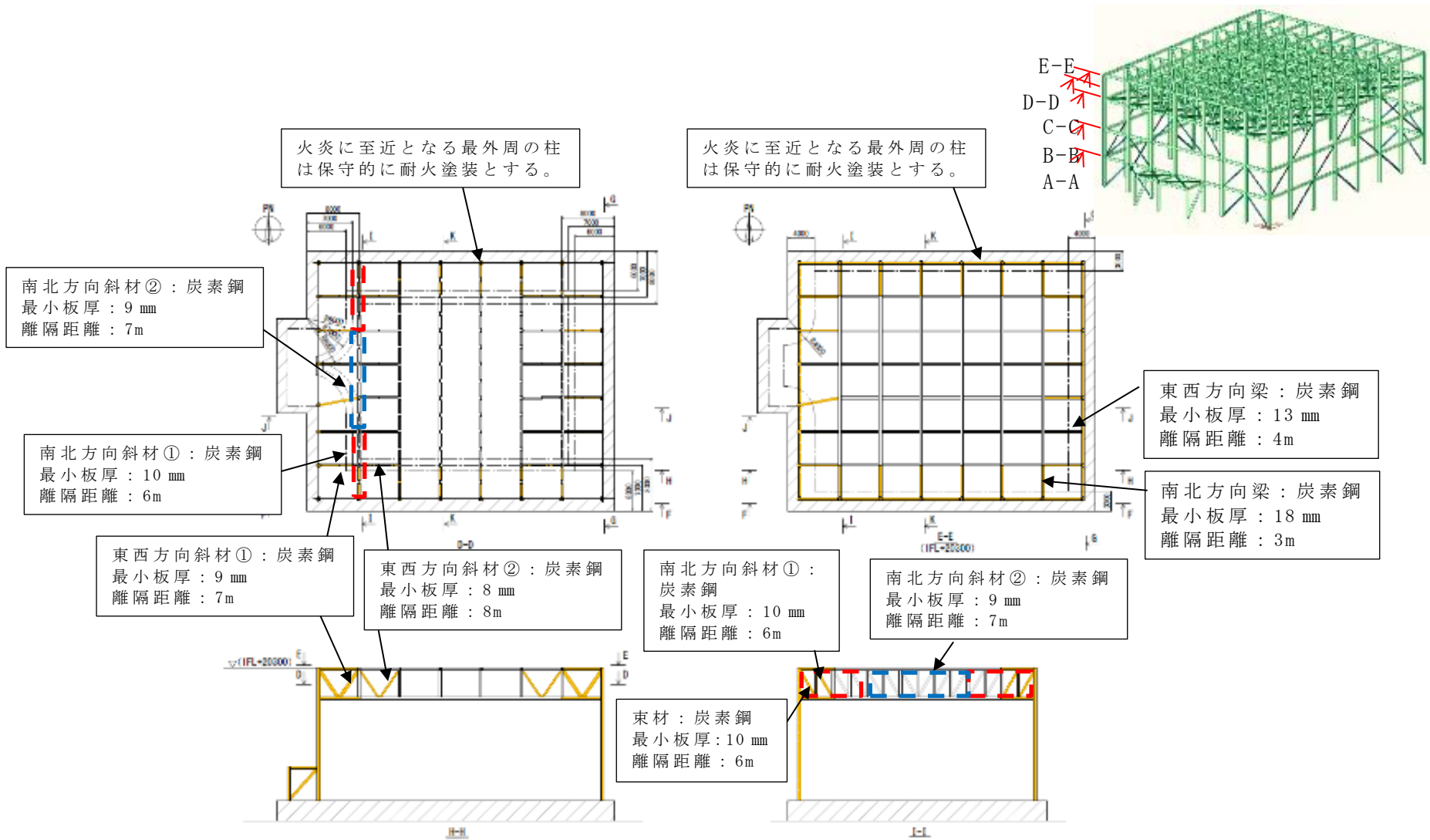


第 4 - 1 図 飛来物防護ネット塗装図 (2 / 4)

火炎に至近となる最外周の柱, 梁は
保守的に耐火塗装とする。










第 4 - 1 図 飛来物防護ネット塗装図 (3 / 4)

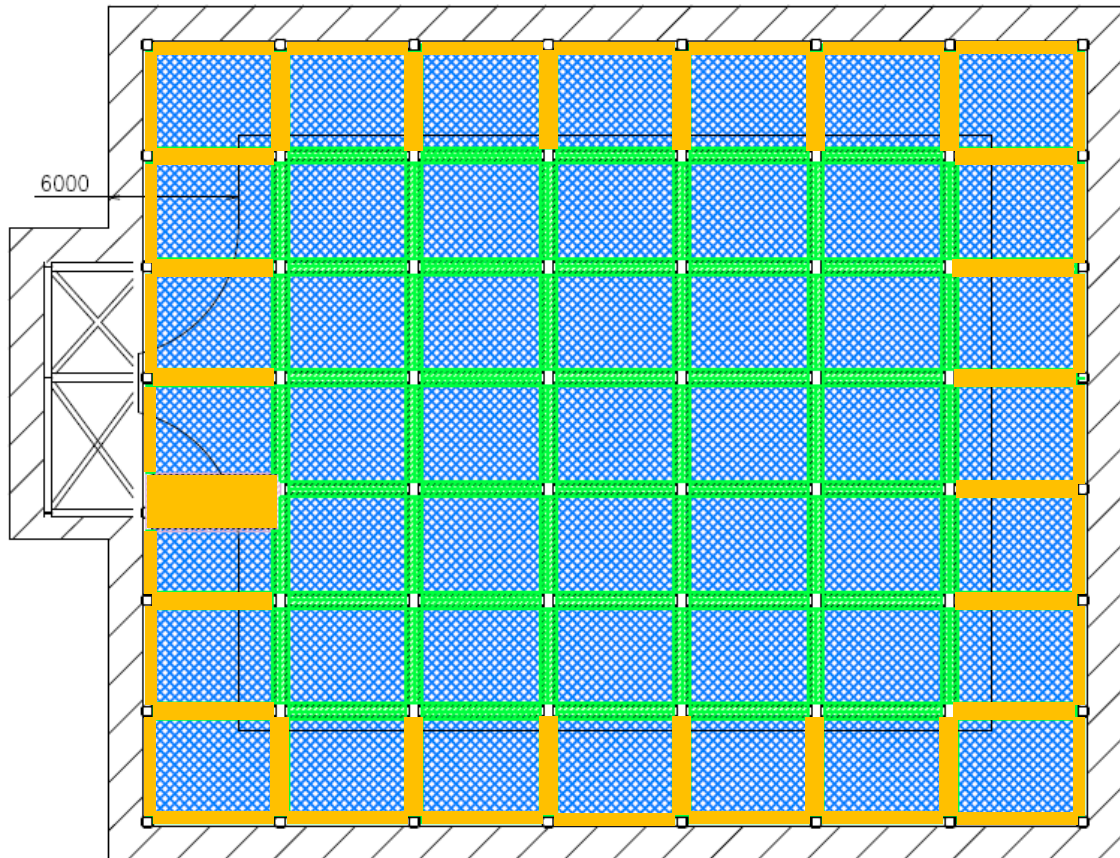
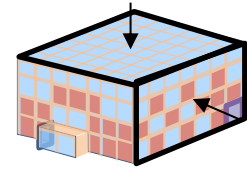


第 4 - 1 図 飛来物防護ネット塗装図 (4 / 4)

アトクハ U4-カリ紙 3-11

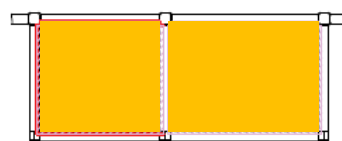
【凡例】

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

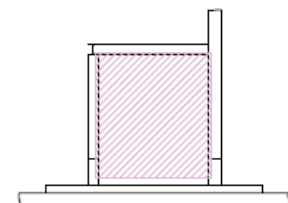
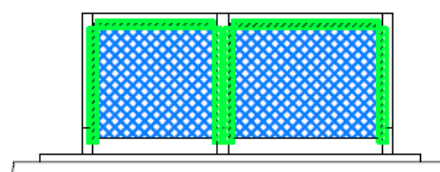
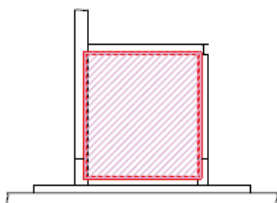
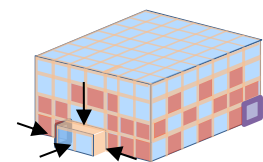


(天面)

(西面)

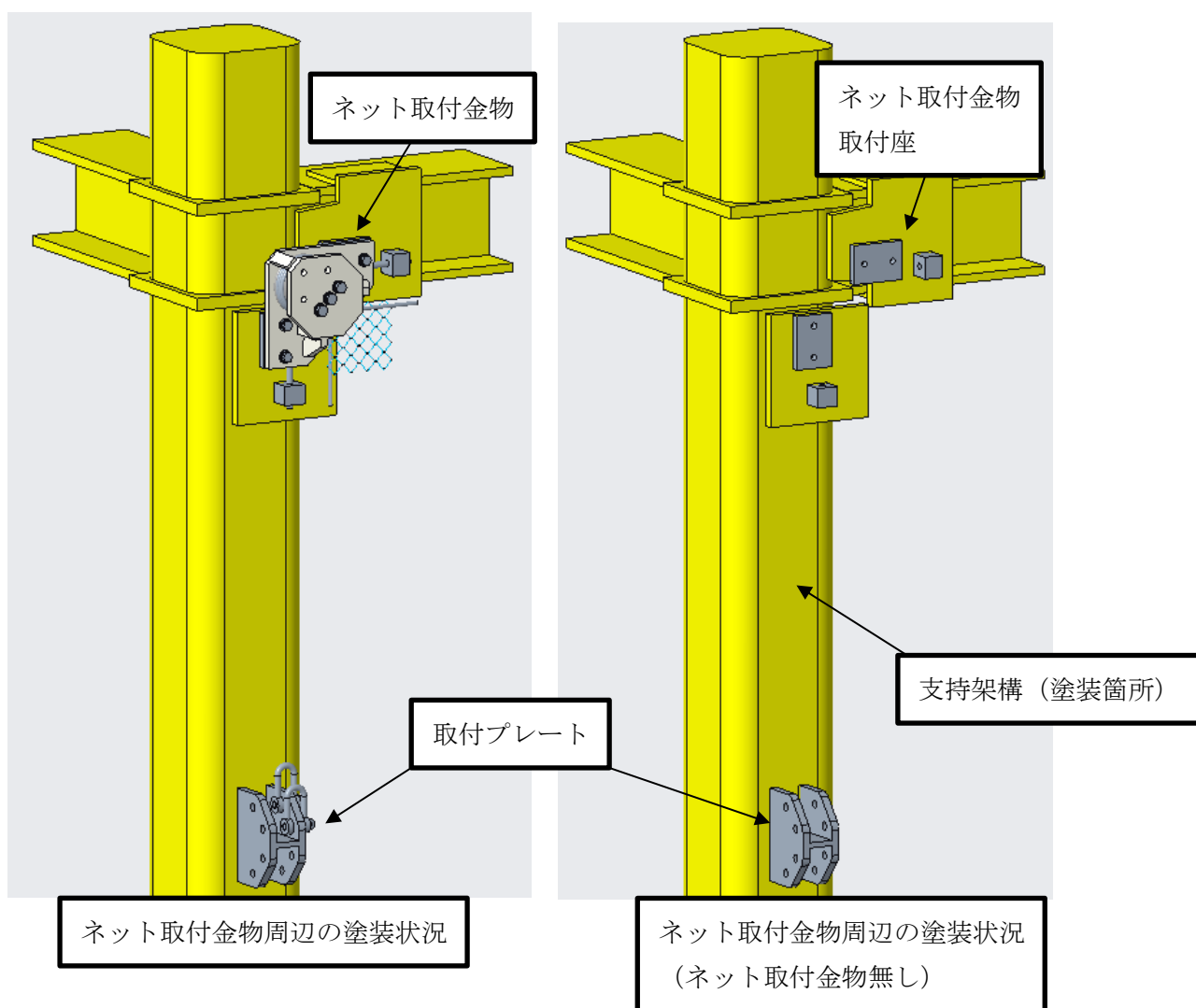


(張出し部天面)

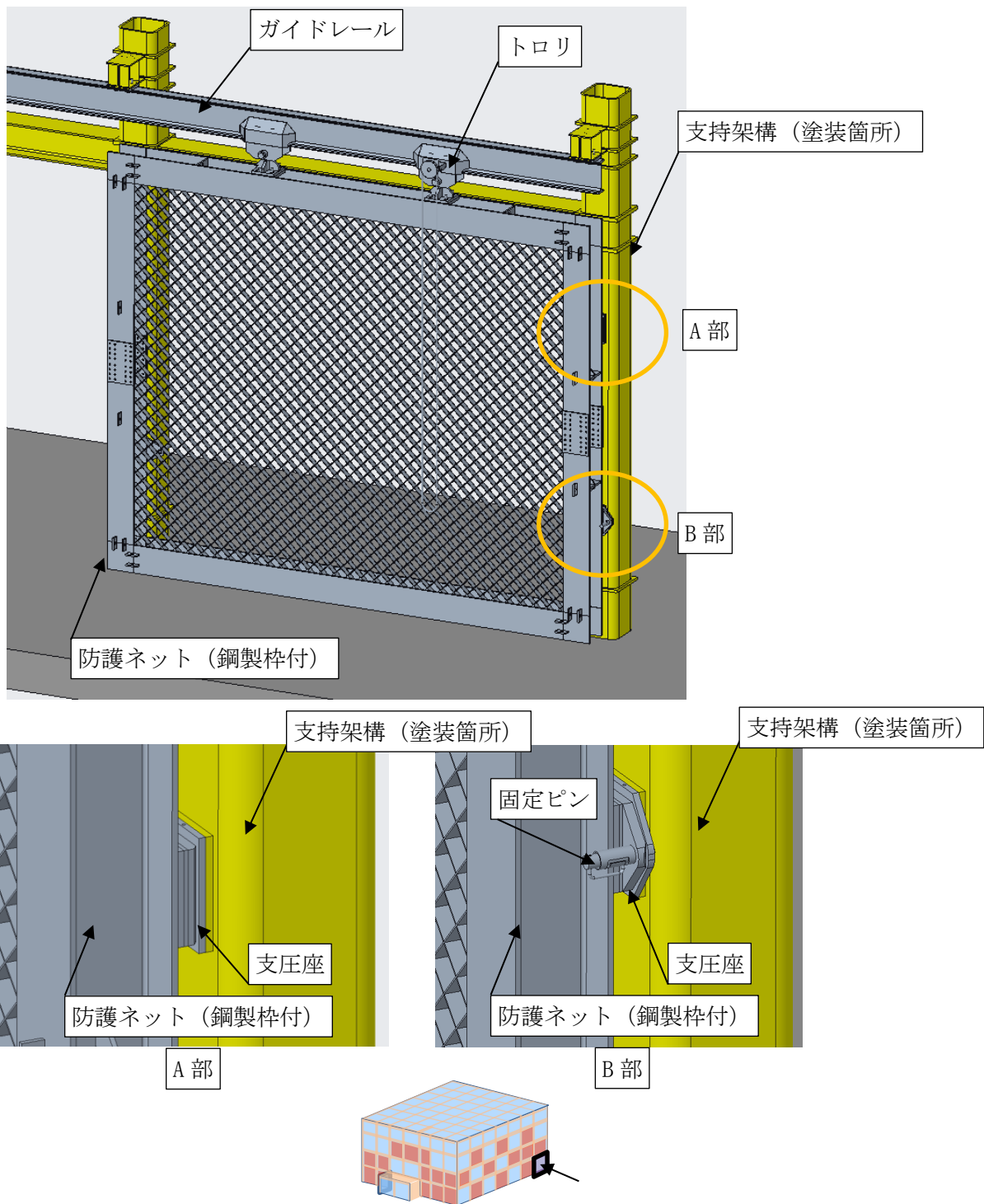


(張出し部南面, 北面及び西面)

第4-2図 飛来物防護ネット 防護板塗装図



第4-3図 防護ネット取付金物周辺塗装図



第4-4図 防護ネット（車両用扉ネット）周辺塗装図