

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外外火 04 R7
提出年月日	令和 3 年 7 月 30 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

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 航空機墜落地点の設定	3
3. 2 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定	3
3. 3 航空機墜落火災と他の事象の組合せについて	4
4. 設計方針	4
4. 1 航空機墜落火災の影響を考慮する部位	5
4. 2 航空機墜落火災の影響を考慮する部位の分類	5
4. 3 設計方針	6
4. 4 その他の考慮	10
5. 評価方針	10
5. 1 評価方針	10
5. 2 評価条件の設定	12
5. 3 航空機墜落火災に対する防護設計の火災条件	13
6. 防護対策	13
6. 1 耐火被覆	13
6. 2 遮熱板	14
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 離隔距離の算出	
別添－4 耐火被覆厚さの設定の考え方	
別添－5 許容温度の考え方	
別添－6 対流熱伝達	
別添－7 熱応力評価	
別添－8 耐火塗料の説明書	
別添－9 航空機墜落火災の温度評価と大臣認定試験との比較	
別添－10 施工管理	
別添－11 維持管理	

参考 仕様表への記載について（設計条件及び仕様）

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象施設に対する、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基準について（平成21年6月30日 原子力安全・保安院）」（以下「航空機落下評価ガイド」という。）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。

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。

本資料は、第1回設工認申請対象施設を対象とした記載であり、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. 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（以下「波及的影響を及ぼし得る施設」という。）
 - d. 建屋に収納する外部火災防護対象施設のうち、航空機墜落火災の熱影響を間接的に受ける施設（以下「航空機墜落火災の熱影響を間接的に受ける施設」という。）
- (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、以下のとおり設計する。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. 航空機墜落火災の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、建屋外壁が火災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. 航空機墜落火災の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。
- 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する。
 - b. 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。
 - c. 耐火塗装は、部材の受熱面に限らず、全面に施行することを基本とするが、明らかに輻射を受けないと判断できる面は施工対象外とする。
 - d. 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

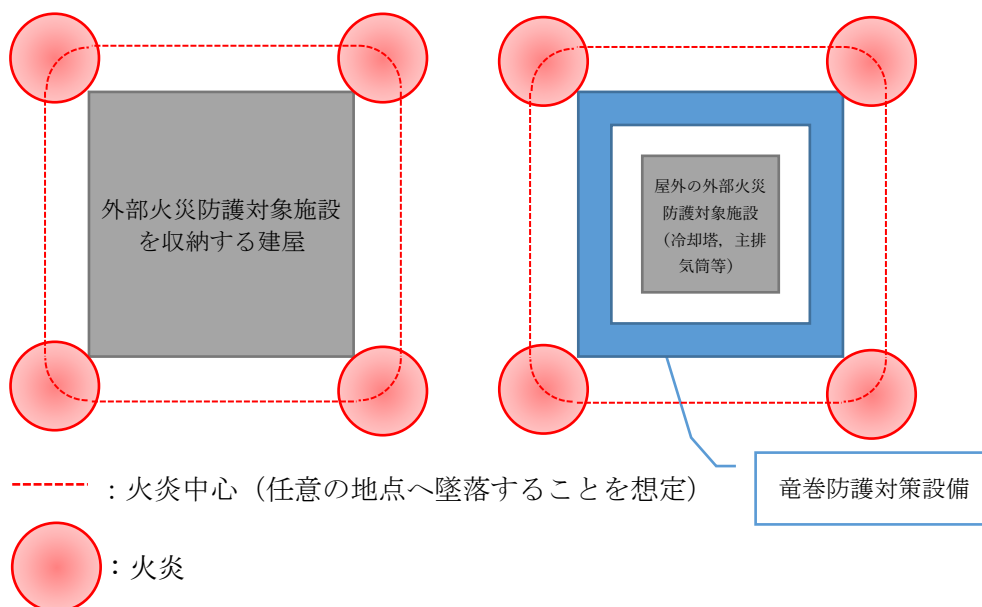
設定する。

- e. 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。

3. 航空機墜落火災について

3. 1 航空機墜落地点の設定

航空機の墜落地点については、建屋等の直近の熱影響が厳しいどのような地点へ墜落した場合でも、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3-1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3-1図 設計上想定する航空機の墜落地点のイメージ (平面図)

3. 2 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は、以下の手順で選定する。

- (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。
- (2) (1)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
- (3) (2)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. 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により、損傷した施設が復旧するまでの間、使用済燃料の再処理を停止する等の措置については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、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上の配慮として、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、耐震性を確保するために基礎が大きくなり、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。

第1回申請対象施設以外の施設に関する記載は、申請回次に合わせて追記する。

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。

(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、外壁及び天井スラブのうち、建屋外壁を対象とする。

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。

- a. 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。
- b. 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。
- c. 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として、冷却水が最高使用温度を上回らないことを評価する。そのために必要となる部位及びそれらを支持する支持構造物を対象とする。

(3) 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。

(4) 航空機墜落火災の熱影響を間接的に受ける施設

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 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とおり分類する。

(1) 建屋外壁

上記4. 1 (1) の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。

(2) 冷却塔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4. 1 (2) の屋外に設置する外部火災防護対象施設のうちの冷却塔の冷却能力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4. 1 (2) の屋外に設置する外部火災防護対象施設のうちの冷却塔の冷却能力を損なわないために必要となる電動機等及び、上記4. 1 (3) の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の竜巻防護対策設備とする。

(4) 他の施設

上記4. 1 (2) の屋外に設置する外部火災防護対象施設のうちの主排気筒及び屋外ダクト並びに、上記4. 1 (4) の航空機墜落火災の熱影響を間接的に受ける施設とする。

4. 3 設計方針

「4. 2 航空機墜落火災の影響を考慮する部位の分類」に基づき、設計方針を示す。

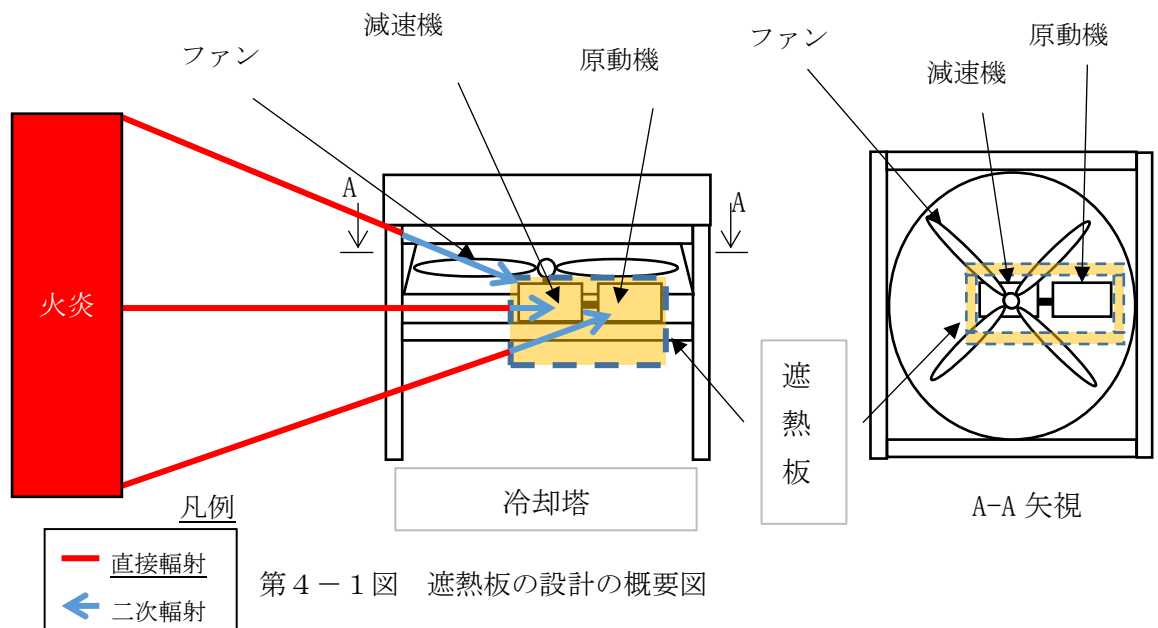
(1) 建屋外壁

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によるひび割れ等の損傷が想定されるが、建屋外壁の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) 冷却塔の冷却能力

冷却塔は、その安全機能を維持するため、航空機墜落火災による熱影響に対し、以下の設計とする。

- a. 冷却水は、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。
- b. 冷却に必要な部位の許容温度は、部位毎に運転を継続するための設計温度が設定されているものが有り、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。
 - (a) 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。遮熱板の設計の概要を第4-1図に示す。
 - (b) 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設計とする。



(3) 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（以下「離隔距離」という。）を設定する。

離隔距離は、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距離を算出する。離隔距離表を第4-1表に示す。離隔距離の詳細な算出過程は別添-3参照。

第4-1表 離隔距離表

材料	板厚 (mm)	必要離隔距離(m)	
		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	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

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、航空機墜落火災の直近に位置する部材および熱影響を受ける部材を対象とし、離隔距離表を用いて耐火被覆の施工範囲を設定する。第4-2図に耐火被覆の施工範囲の考え方の概要を示す。第4-2図に示すとおり、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の部材は、施工する対象とする。

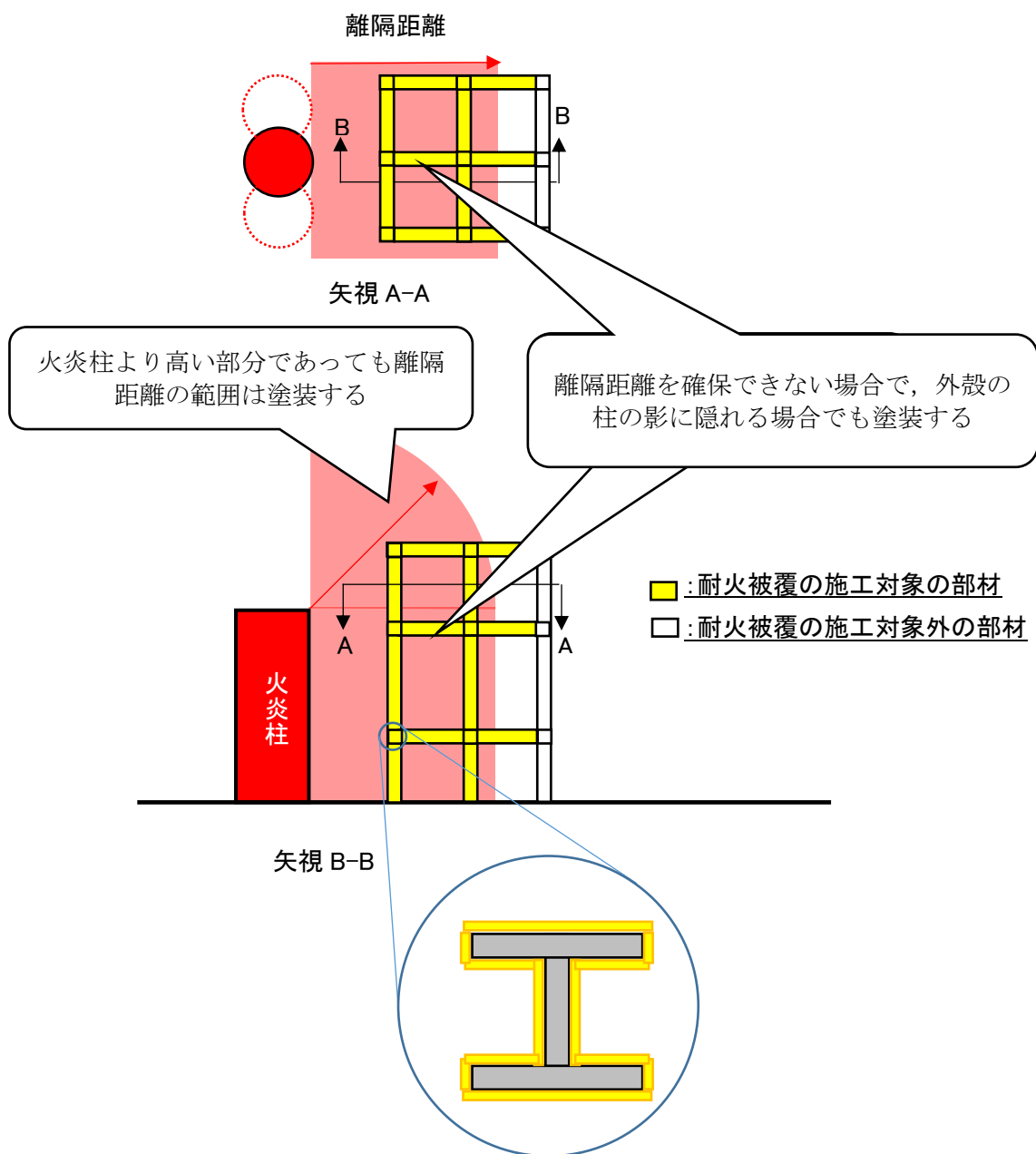
耐火被覆の施工厚さは許容温度を踏まえ設定する。塗装厚さの設定においては、代表部材として9mmの鋼板を用いることとし、火炎から直近の輻射強度を受けた場合でも許容温度以下となる厚さを算出する。(別添-4参照)

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、波及的影響を及ぼし得る施設では450℃に設定する。許容温度の設定の考え方は別添-5参照。

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、施工時の品質確保の観点から、設備の重要度に応じて一律に設定することとし、外部火災防護対象施設

は、許容温度 325℃以下とするのに必要な厚さを 3 mmに設定し、波及的影響を及ぼし得る施設は許容温度 450℃以下とするのに必要な厚さを 2 mmに設定する。

波及的影響を及ぼし得る施設については、許容温度を 450℃とすることにより、一時的な強度低下が起こるが、その場合においても、構造健全性が維持される設計とする。



第 4 - 2 図 耐火被覆の施工範囲の概要

(4) 他の施設

後次回で申請予定

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する。(別添-6 参照)

同様に、加熱された際に場所により生じる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、火炎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する。(別添-7 参照)

構造体レベルとしては、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、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する。(別添-7 参照)

5. 評価方針

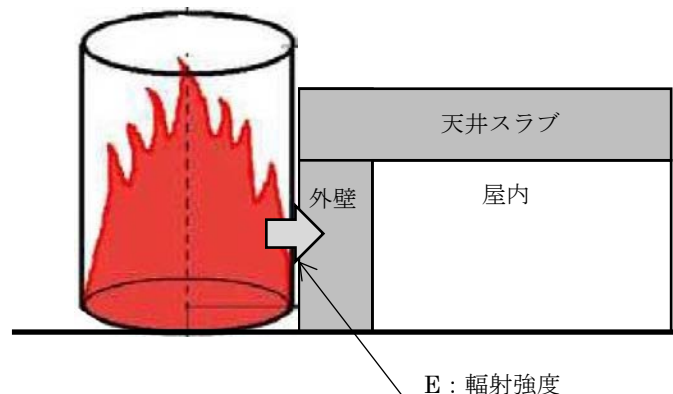
5. 1 評価方針

「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。評価の詳細は別紙-1, 2及び3参照。

(1) 建屋外壁

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。円筒火災モデルの概要を第5-1図に示す。

第5-1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5-1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(*)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/(m・K))

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)

* : 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第4版 1986

(2) 冷却塔の冷却能力

冷却能力を損なわないことを確認するため、以下の評価を実施する。

- a. 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冷却水の温度上昇を算出し、溶解液等から発生する崩壊熱の除去機能を損なわないことを評価する。
- b. 冷却に必要な部位は、防護対策も含めた航空機墜落火災の輻射による温度上昇を算出し、機能を損なわないことを評価する。

(3) 支持構造物

冷却塔、飛来物防護ネット等の支持架構は、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，構造健全性が損なわれないことを評価する。

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，耐火被覆の施工対象とする。

また，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，構造健全性が維持されていることを評価する。

(4) 他の施設

後次回申請予定

5. 2 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。

(1) 許容温度の設定

a. 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－5 参照。

b. 冷却塔の冷却能力

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。

(b) 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。

c. 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，構造健全性が維持される温度を許容温度とする。鋼材の許容温度の設定に関する考え方の詳細は別添－5 参照。

第5－1表に，設定した許容温度を示す。

第5-1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℃

5. 3 航空機墜落火災に対する防護設計の火災条件

「3. 2 航空機墜落火災における評価対象航空機の選定」にて選定した評価対象航空機から、外部火災ガイドに基づき第5-2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5-2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

6. 防護対策

6. 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とおり。耐火被覆の詳細は別添-8参照。

- ・耐火被覆は、第4-1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。

外部火災防護対象施設である冷却塔等は3 mm、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2 mmとする。塗装厚さの設定に関する詳細は別添-4 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-9 参照。

(2) 施工範囲

耐火被覆は、火災源からの影響を直接受ける最外周の部材は全て対象とし、輻射による影響を考慮する部材は、第4-1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施工する。そのため、ネット自体への施工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できるよう管理を行う。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-10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-11に示す。

6. 2 遮熱板

(1) 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。遮熱板は、表面（輻射の受熱面）に耐火被覆を施工し、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通り。

- ・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。
- ・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。
- ・遮熱板を設置しても、防護対象部位の点検が可能な構造とする。

(2) 塗装対象範囲

6. 1項の記載の通り、耐火被覆を施工する。ただし、遮熱板の裏面は、輻射を受けないことから、施工範囲外とする。

耐火被覆施工後の遮熱板及び遮熱板の防護対象部位は許容温度を満足していることを確認した。

仕様表への記載について（設計条件及び仕様）

2. 再処理設備本体等に係る「その他再処理設備の附属施設」

2.2 給水施設及び蒸気供給施設

2.2.2 冷却水設備

2.2.2.2 安全冷却水系

(1) 熱交換器

		変更前		変更後	
名称		—			
<p>耐火被覆 仕様表記載（案）</p> <p>○航空機墜落火災の防護対策である耐火被覆の設計上の重要事項は、以下の3点だと考えている。</p> <p>①耐火被覆材（耐火被覆に用いる塗料は、塗装厚さの設計の考え方に一致する耐火性能を有していること）</p> <p>②施工厚さ（防護対象を許容温度に収めるために、必要な厚さが施工されていること）</p> <p>③施工範囲（航空機墜落火災の熱影響を受ける範囲が確実に塗装されていること）</p> <p>○そのため、これら3点を設工認申請上、どのように記載するかと検討した。検討にあたっては、使用前検査を考慮し、炉の記載事例を参考にした。</p> <p>○結論</p> <p>①耐火塗料材の性能：仕様表の注記にて記載する。 ⇒現状、使用前事業者検査においては、大臣認定番号を受けた塗料であることをの検査を想定しており、注記書きすることとした。</p> <p>②施工厚さ：使用前事業者検査にて、厚さの測定を想定しており、仕様表に厚さを記載する（現状とおり）。</p> <p>③施工範囲：塗装範囲が設計通りであることを確認するため、塗装範囲図を構造図に追加する。</p>					
	塔	主要材料	伝熱管（内管）	—	
			フィン	—	
			ヘッダー	—	
	耐火被覆	種類	—	—	耐火塗装*4
		厚さ	mm	—	3以上
	原動機	種類	—		
出力		kw			
ファン台数		台			

		変更前	変更後
	個数	—	
取付箇所	系統名（ライン名）	—	
	設置場所	—	
	溢水防護上の区画番号	—	
	溢水防護上の 配慮が必要な高さ	—	
	化学薬品防護上の区画番号	—	
	化学薬品防護上の 配慮が必要な高さ	—	

- 注記
- *1 公称値を示す。
 - *2 記載の適正化を行う。既設工認には「伝熱面積（フィン外表面）」と記載。
 - *3 既設工認の仕様表に記載がないため、記載の適正化を行う。記載内容は設計図書による。
 - *4 建築基準法第2条第七号に基づく国土交通大臣の認定番号FP060CN-XXXXを取得した塗料を使用する。

令和3年7月30日 R3

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
<u>F-2</u> 及び <u>F-16</u> 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]}

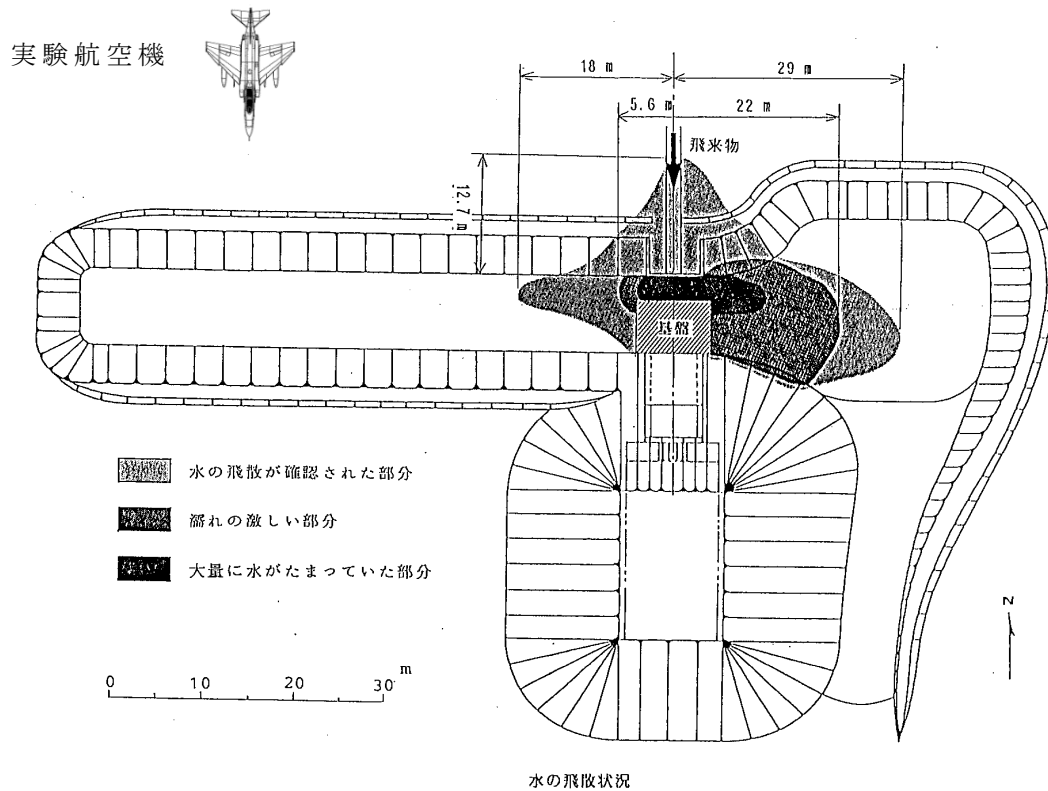
	投影面積 (m ²)
<u>K C - 767</u>	約 1500
<u>F - 2</u>	約 110
<u>F - 16</u>	約 90
<u>F - 35</u>	約 110

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

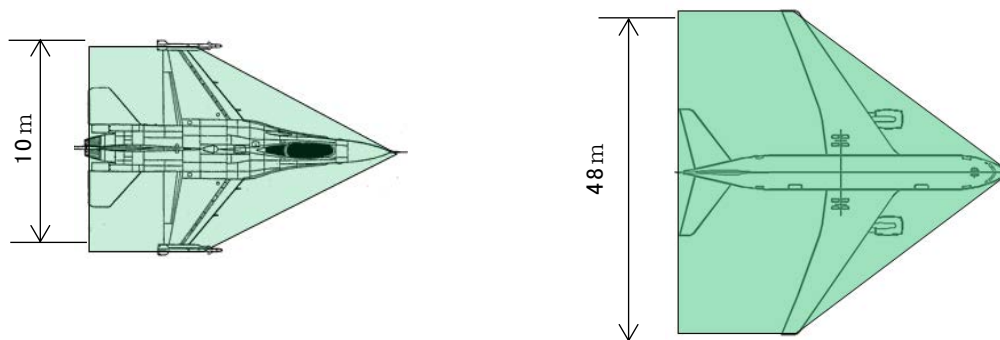
[2] Paul.Jackson. ed. Jane's All the World's Aircraft 1997-98. Jane's Information Group, 1997.

[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 : 燃焼時間 (s)

V : 燃料積載量 (m^3)

A : 燃焼面積 (m^2)

v : 燃焼速度 (m/s)

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 (<u>m</u>)	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	約 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．

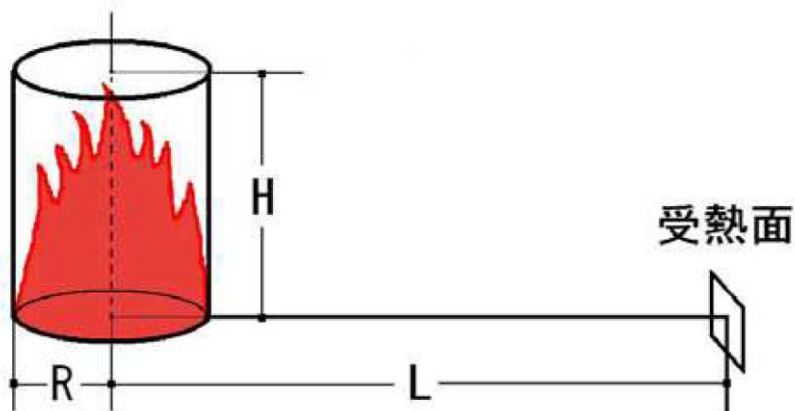
3. 2 輻射強度の算出

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。

(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)	輻射強度 (W/m^2)
K C - 767	0.5	58×10^3	29×10^3
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7月30日 R6

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	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，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。

- 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
- m. 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

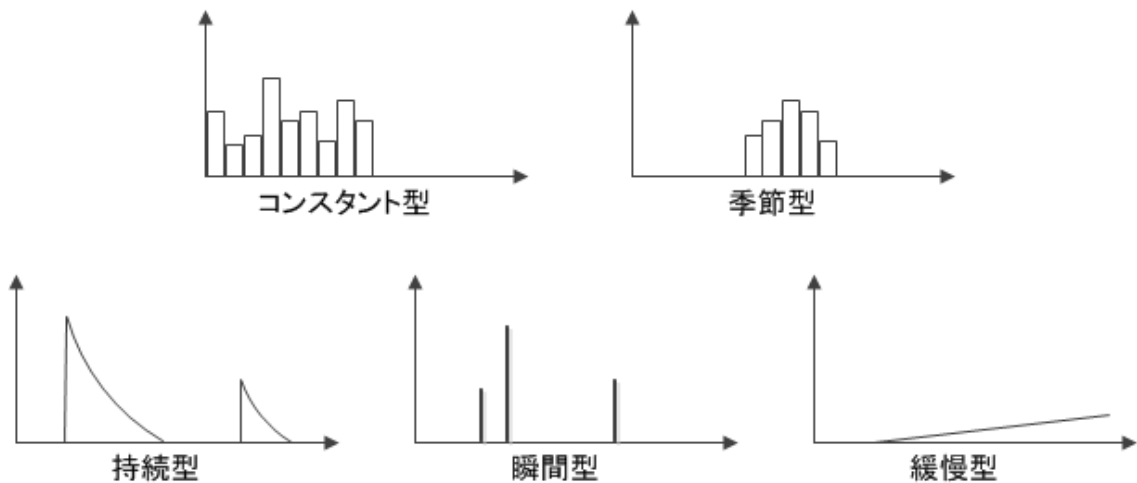
自然現象	検討結果
地震	<ul style="list-style-type: none"> 航空機墜落又は航空機墜落火災により地震が誘発されることは考えられない。 地震による影響は、飛行中の航空機に影響を及ぼすことはなく、地震が航空機墜落を誘発することは考えられない。
風 (台風)	<ul style="list-style-type: none"> 航空機墜落又は航空機墜落火災により風(台風)が誘発されることは考えられない。 風(台風)が飛行中の航空機に影響を及ぼすことは考えられるが、台風を事前に予測して航空機の運航計画を見直すことができることから、風(台風)が航空機墜落を誘発することは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

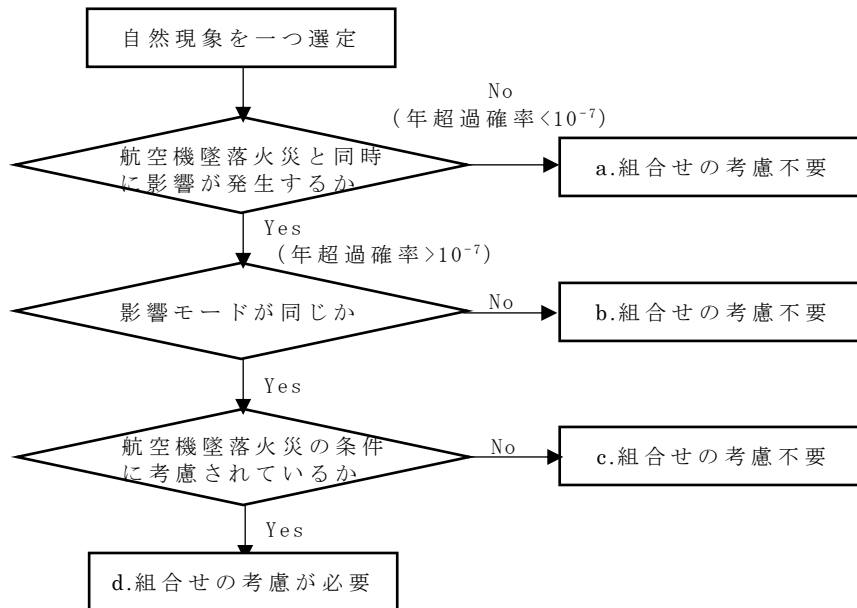
航空機墜落又は航空機墜落火災と相関性がなくても、その自然現象が再処理施設等に影響を及ぼす年超過確率、影響モード等を考慮し、航空機墜落火災との組合せを適切に考慮する必要がある。航空機墜落火災との組合せの考慮の要否は以下の観点から検討した。検討フローを第3-1図に示す。

- a. 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。

- b. 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。

- c. 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が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⁽¹⁾⁽²⁾戻るものと考えられる。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）

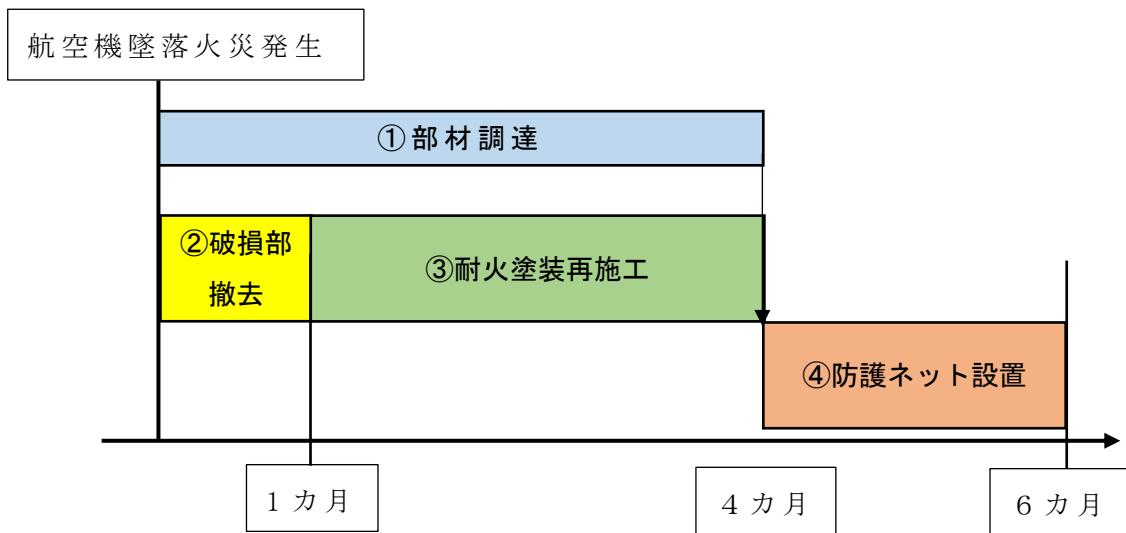
$$\begin{aligned} &= (\text{航空機墜落確率}) \times (\text{1年のうち航空機墜落火災の影響が及ぶ期間の比率}) \times (\text{地震の年超過確率}) \\ &= \frac{4.6 \times 10^{-8} \times (1 / 365) \times 1 \times 10^{-4}}{1} \\ &= 1.26 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

- ◆（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）

$$\begin{aligned} &= (\text{航空機墜落確率}) \times (\text{1年のうち航空機墜落火災の影響が及ぶ期間の比率}) \times (\text{火山の年超過確率}) \\ &= \frac{4.6 \times 10^{-8} \times (1 / 365) \times 5.5 \times 10^{-6}}{1} \\ &= 6.93 \times 10^{-16} \end{aligned}$$

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）

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

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

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

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7月30日 R4

別添－3

離隔距離の算出

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	3
4. 必要離隔距離の算出方法	5
4. 1 輻射強度の算出	5
4. 2 必要離隔距離の算出	6
5. 必要離隔距離の算出結果	8
6. 時間刻み設定の妥当性について	10

参考 飛来物防護ネットの支持架構の構成部材について

1. 支持構造物の評価の方針について

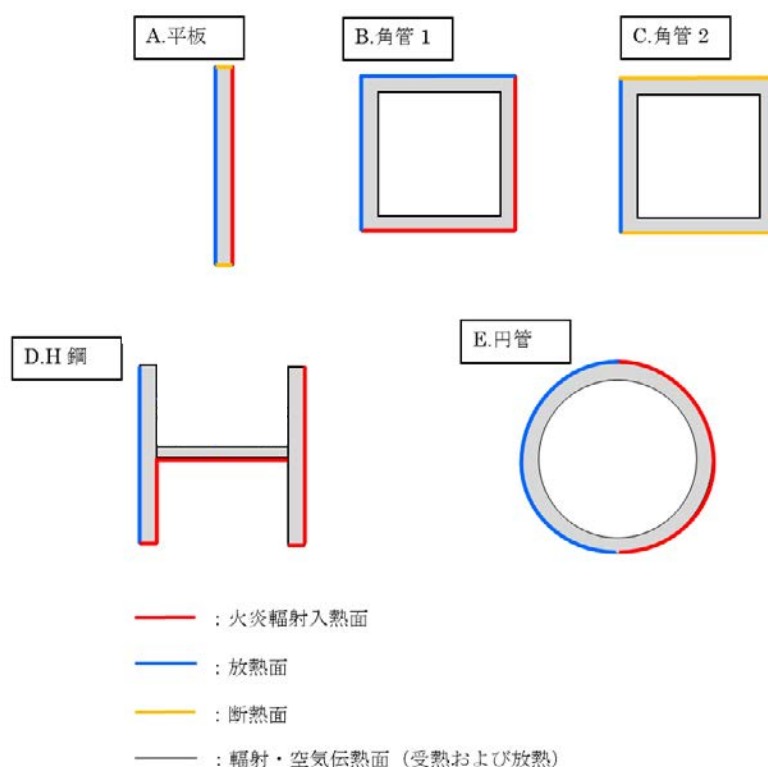
許容温度を超える部材に対しては，耐火被覆又は遮熱板による防護対策を施すが，防護対策の範囲を特定するにあたり，航空機墜落火災による円筒火炎に対して鋼材の板厚毎に許容温度以下となる離隔距離（以下「必要離隔距離」という）を算出することとする。

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。

調査の結果，確認された形状に対し，水平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 部材の形状毎に想定する熱的条件（水平輻射の場合）

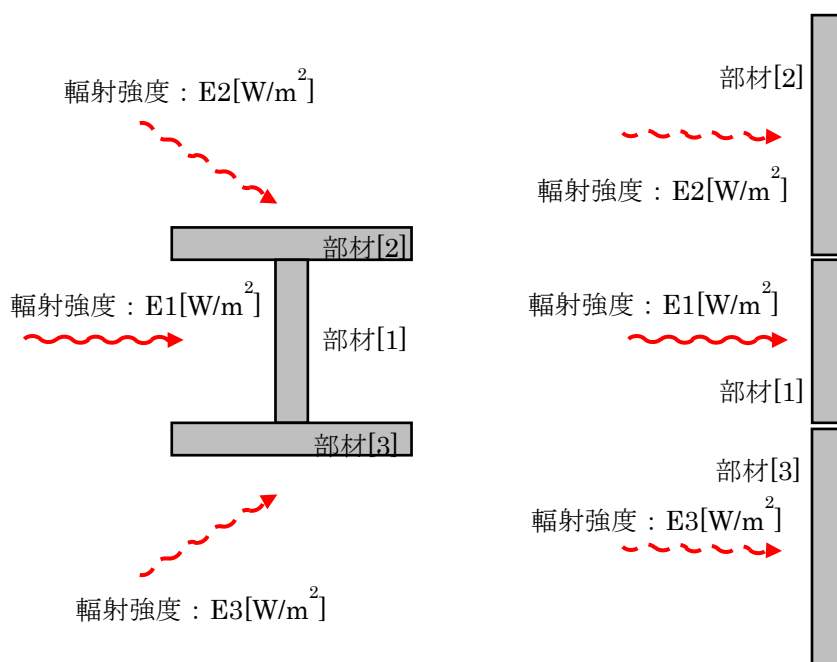
部材の単位時間当たりの温度上昇は、時間当たりの熱量を熱容量で割ることで算出され、熱量は入熱量及び放熱量で与えられる。水平方向からの輻射を想定した第2-1図に示した部材の材質と板厚を同一とした場合、角管及び円管は内包している空気を無視しても、平板に比べ熱容量が大きい。また、H鋼は鋼材に対して垂直に輻射が入れば、平板と同様と考えることができ、斜めに輻射が入る場合は、離隔距離が大きく、入射角による単位面積の輻射強度が小さくなるため、入熱量が減ることとなる。

よって、部材の板厚と同じ厚さの平板の温度評価をすることで、選定した部材の評価を包絡することができる。

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

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



第2-2図 代表形状の考え方 (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。

なお、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のうち炭素鋼は、材質がSS400, SM490B, SN400A等のいずれも軟鋼に分類されるが、解析として保守側となる密度及び比熱が小さい中炭素鋼として、必要離隔距離を算出する。

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	保守的に平板と設定
材質	炭素鋼（軟鋼）， 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]	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 ²]	Es	400	IAEA 放射性物質安全輸送規則から設定*
低減率	ϵ	1	外部火災ガイドに従い、保守的に考慮しない。
燃焼面積 [m ²]	A_b	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	29	設計外気温
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 (伝熱工学資料の中炭素鋼より)

温度 [K]	密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kgK]	熱伝導率 [W/mK]
300	7850	0.473	51.5
500	7800	0.520	47.2
800	7700	0.665	36.8

第3-5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 ³]	比熱 [kJ/kgK]	熱伝導率 [W/mK]
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

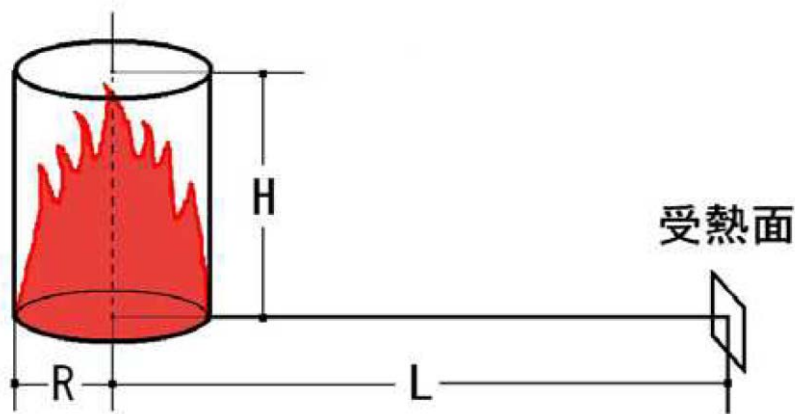
4. 必要離隔距離の算出方法

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。

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

ただし、

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

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。

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

ここで、

E : 輻射強度 (W/m^2)

Rf : 輻射発散度 (W/m^2)

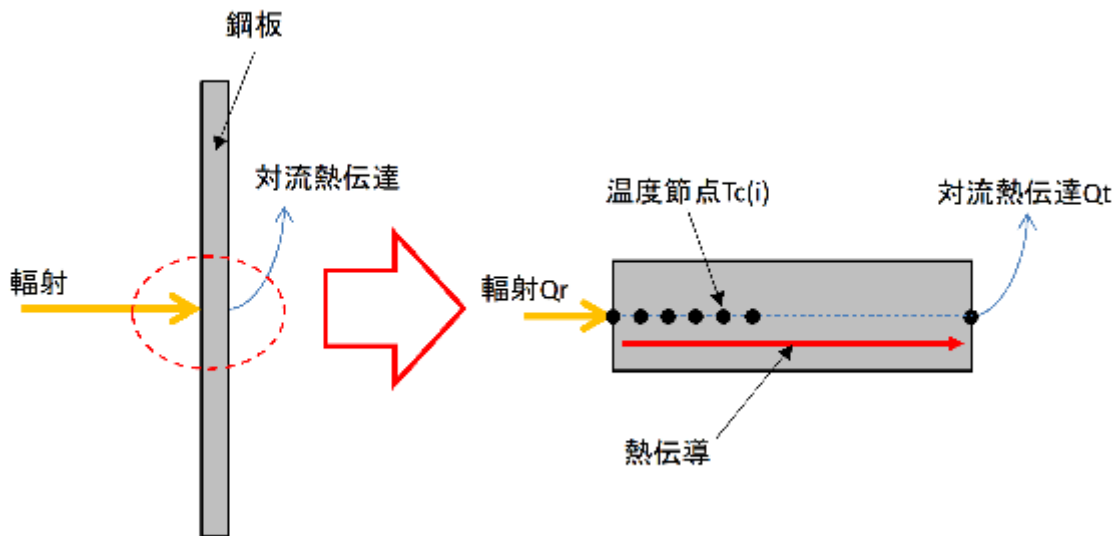
ϕ : 形態係数 (-)

E_s : 太陽輻射 (W/m^2)

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/m²]

A : 対象鋼板の面積 [m²] (=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,

Q_r : 火炎からの輻射熱伝達 [W]

A : 対象鋼板の面積 [m^2] (=1 単位面積)

Q_t : 裏面での対流熱伝達 [W]

$T_c(i)$: 平板の温度 [$^{\circ}C$] 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 [$W / (m \cdot K)$]

ρ_c : 鋼板の密度 [kg / m^3]

C_c : 鋼板の比熱 [$J / (kg \cdot K)$]

L_c : 区分区間 [m] (=板厚厚さ / (N-1))

V : 区分区間の体積 [m^3]

$T_c(i)_{new}$: 時間経過後の平板の温度 [$^{\circ}C$] ($i=1 \sim N$)

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. 時間刻み設定の妥当性について

必要離隔距離の算出において、時間刻みを 0.01s から 0.001s へ変更し、解析を実施した結果を第 6 - 1 表に示す。

両者を確認したところ、必要離隔距離の結果に差がないことから、時間刻みを小さくすることによる影響はなく、現状の時間刻みで問題ないことを確認した。

第 6 - 1 表 離隔距離表時間刻み変更による影響

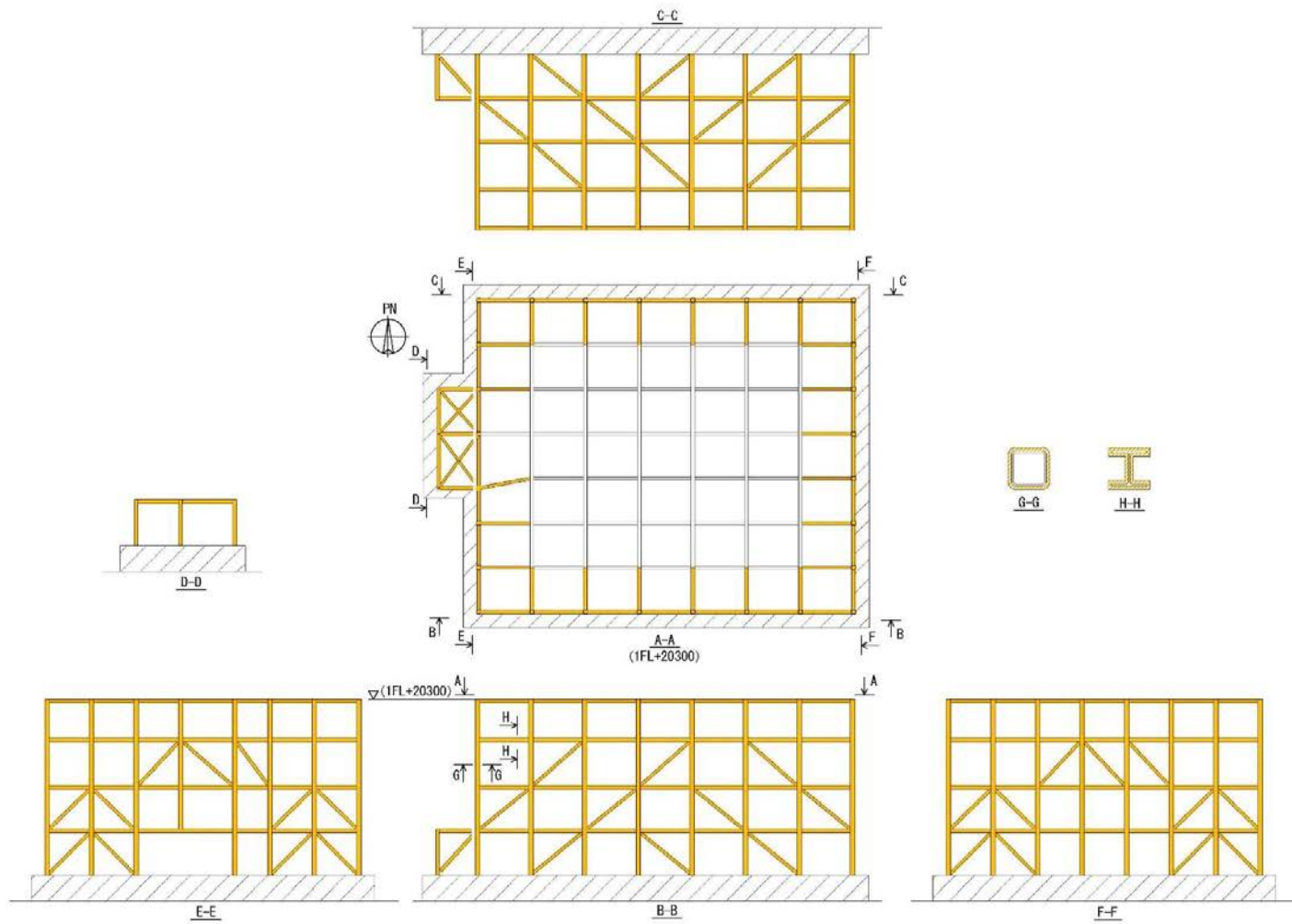
材質	板厚	離隔距離(安重)	離隔距離(安重)	差分	離隔距離(非安重)	離隔距離(非安重)	差分
		時間刻み0.01	時間刻み0.001		時間刻み0.01	時間刻み0.001	
	mm	m	m		m	m	
炭素鋼	36	1	1	0	0	0	0
炭素鋼	28	2	2	0	0	0	0
炭素鋼	22	3	3	0	1	1	0
炭素鋼	19	5	5	0	1	1	0
炭素鋼	15	7	7	0	3	3	0
炭素鋼	14	7	7	0	3	3	0
炭素鋼	13	8	8	0	4	4	0
炭素鋼	12	9	9	0	4	4	0
炭素鋼	11	9	9	0	5	5	0
炭素鋼	10	10	10	0	6	6	0
炭素鋼	9	11	11	0	7	7	0
炭素鋼	8	12	12	0	8	8	0
炭素鋼	6.5	14	14	0	9	9	0
炭素鋼	6.4	14	14	0	9	9	0
炭素鋼	6	15	15	0	10	10	0
炭素鋼	4.5	18	18	0	12	12	0
炭素鋼	3.91	19	19	0	13	13	0
炭素鋼	3.9	19	19	0	13	13	0
炭素鋼	3.2	20	20	0	15	15	0
炭素鋼	2.3	23	23	0	16	16	0
炭素鋼	2.11	23	23	0	17	17	0
炭素鋼	1.2	25	25	0	19	19	0
SUS304	20	4	4	0	1	1	0
SUS304	16	6	6	0	2	2	0
SUS304	12	8	8	0	4	4	0
SUS304	9	11	11	0	6	6	0

参考 飛来物防護ネットの支持架構の構成部材について

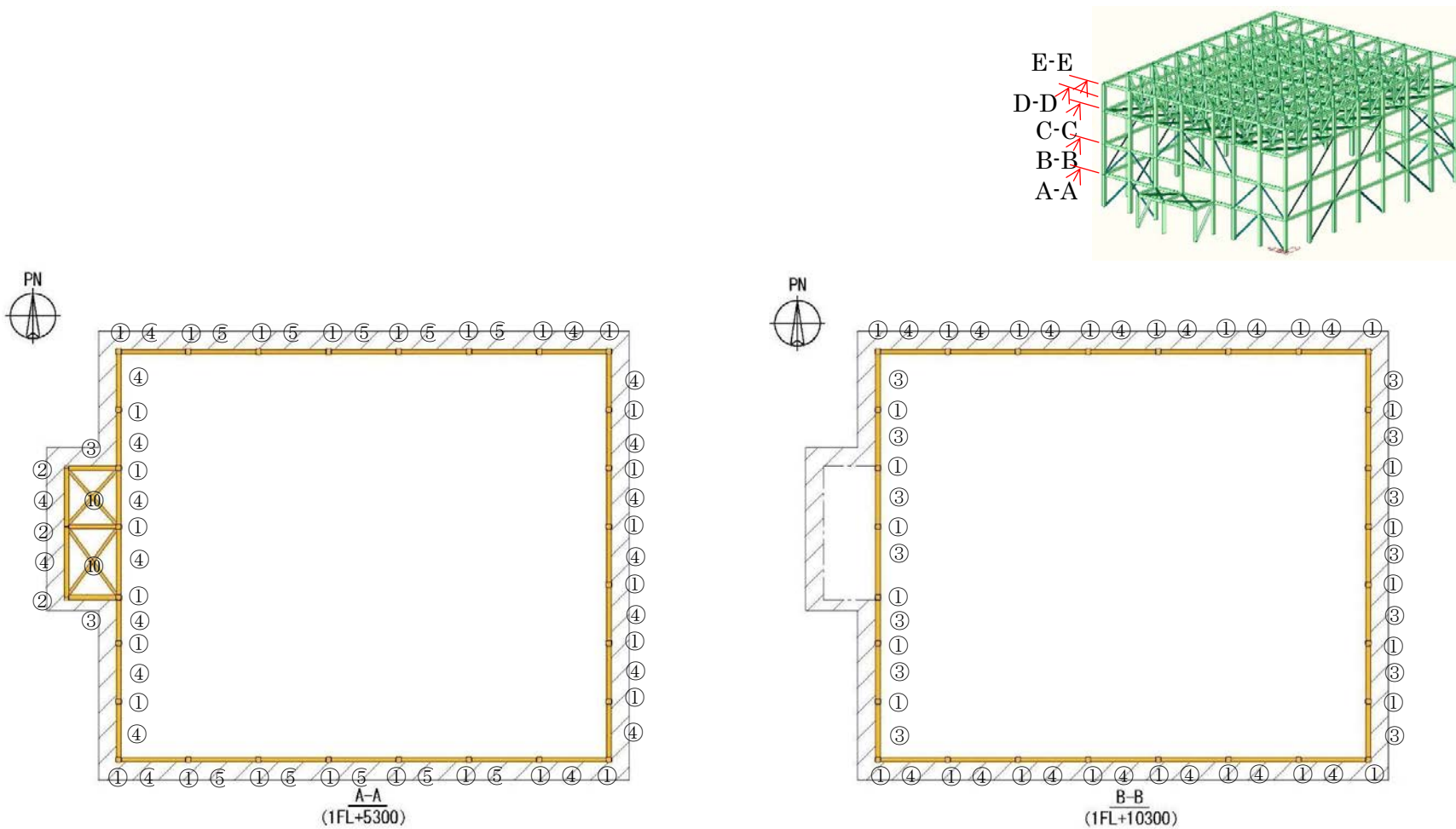
飛来物防護ネットの支持架構の構成一覧を第1表に、図面を第1図に示す。

第1表 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット塗装部材リスト

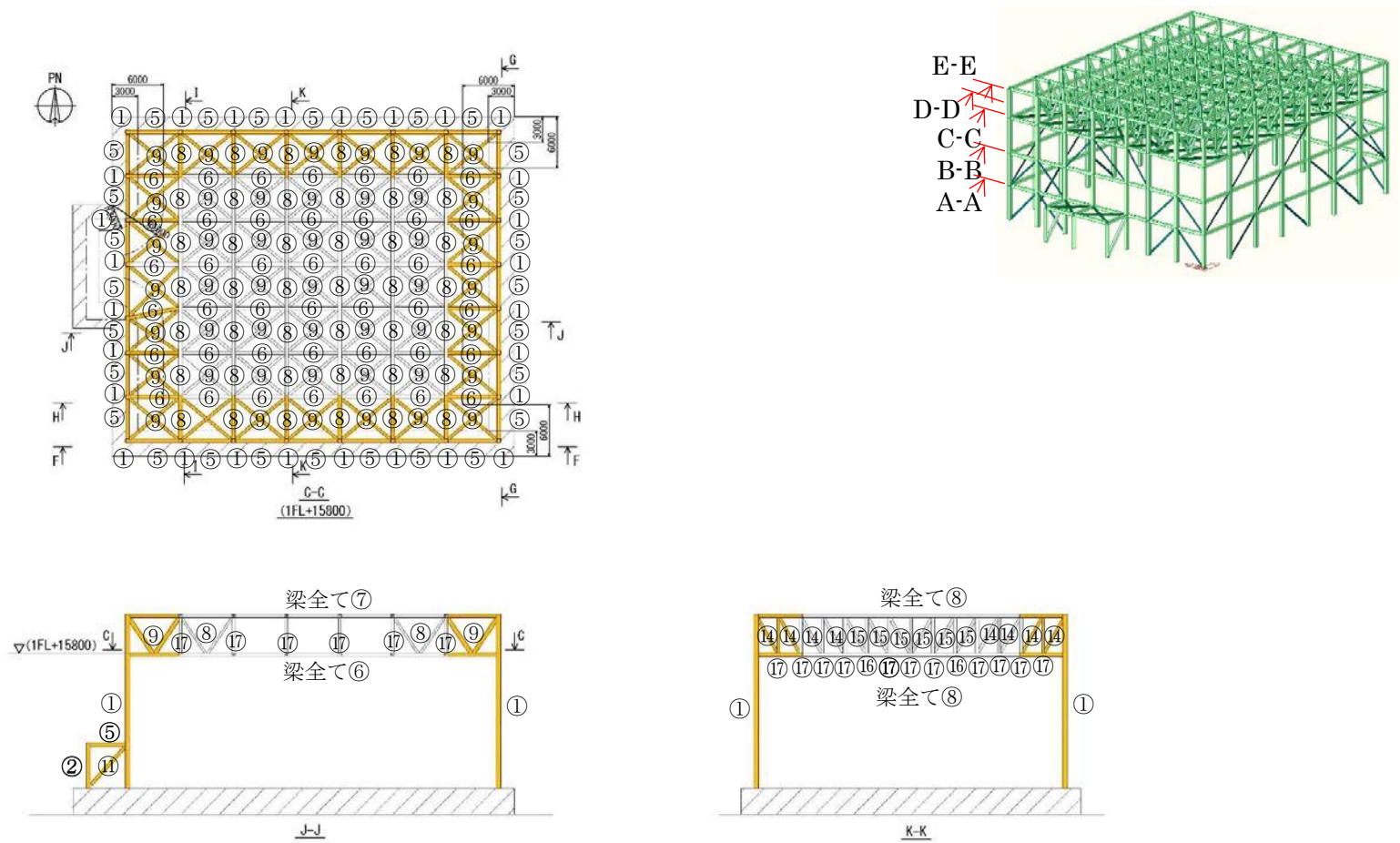
No	材質	板厚	必要離隔距離	備考
①	炭素鋼	28mm	0m	火炎の至近にあるため、離隔距離に関わらず耐火被覆を実施
②		13mm	4m	
③		20mm	1m	
④		18mm	3m	
⑤		13mm	3m	
⑥		10mm	6m	離隔距離範囲内の部材に耐火被覆を実施
⑦		13mm	4m	
⑧		18mm	3m	
⑨		10mm	6m	
⑩		9mm	7m	
⑪		12mm	4m	
⑫		9mm	7m	
⑬		8mm	8m	
⑭		10mm	6m	
⑮		9mm	7m	
⑯		13mm	4m	
⑰		10mm	6m	



第1図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット (1 / 4)



第1図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット (2 / 4)



第1図 安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット (3 / 4)

令和3年7月30日 R7

別添－4

耐火被覆厚さの設定の考え方

目 次

1. 耐火被覆厚さの設計方針	1
2. 大臣認定試験	3
3. 断熱材相当の厚さの算出	7
4. 耐火被覆厚さの設定と温度評価	9
5. 耐火試験	14
6. 温度評価及び耐火試験の考察	26

参考1 鋼材の温度評価（断熱材相当の厚さの算出）の方法

参考2 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3 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

(1) 耐火被覆厚さの基本設計方針

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必要がある。

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。

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となる。

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、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。

また、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入熱量(1,400秒)と大臣認定試験における1時間耐火の入熱量(3,600秒)は同程度である。(詳細は別添-9参照)

したがって、航空機墜落火災への防護対策として採用する耐火塗料は、1時間耐火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。

(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の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という施設の屋外での発生に限定していることから、至近の鋼材を許容温度以下とする塗装厚さを、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。

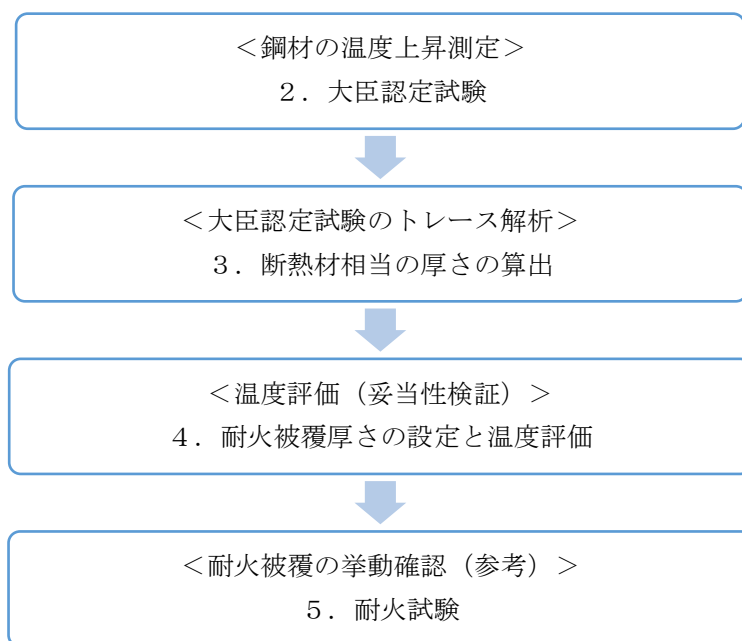
そのため、耐火被覆厚さの設計においては、耐火被覆厚さの設定が厳しくなるよう代表形状と評価条件を設定する。

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。

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する。

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。



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。

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となる。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。

使用する耐火塗料は、耐火塗料の製造メーカーの供給能力及び製造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、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。（別添-8参照）

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。

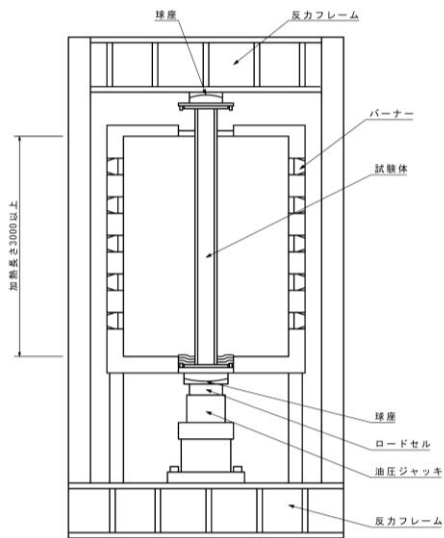
(2) 大臣認定試験の方法及び条件

第2-1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。

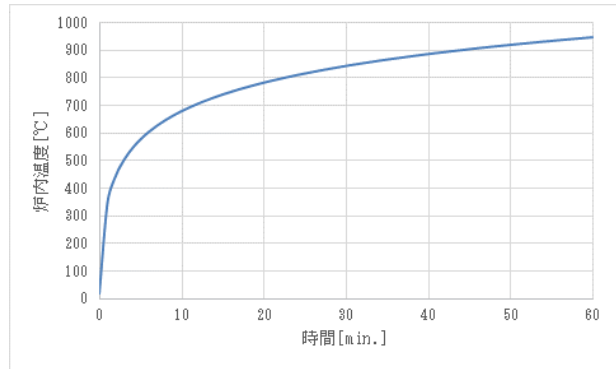
第2-2図に試験装置雰囲気の加熱曲線を示す。試験装置雰囲気の温度は、ISO834にて示される標準加熱曲線に従って上昇させ、炉内熱電対によりほぼ一様の温度となるよう管理する。

第2-3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。

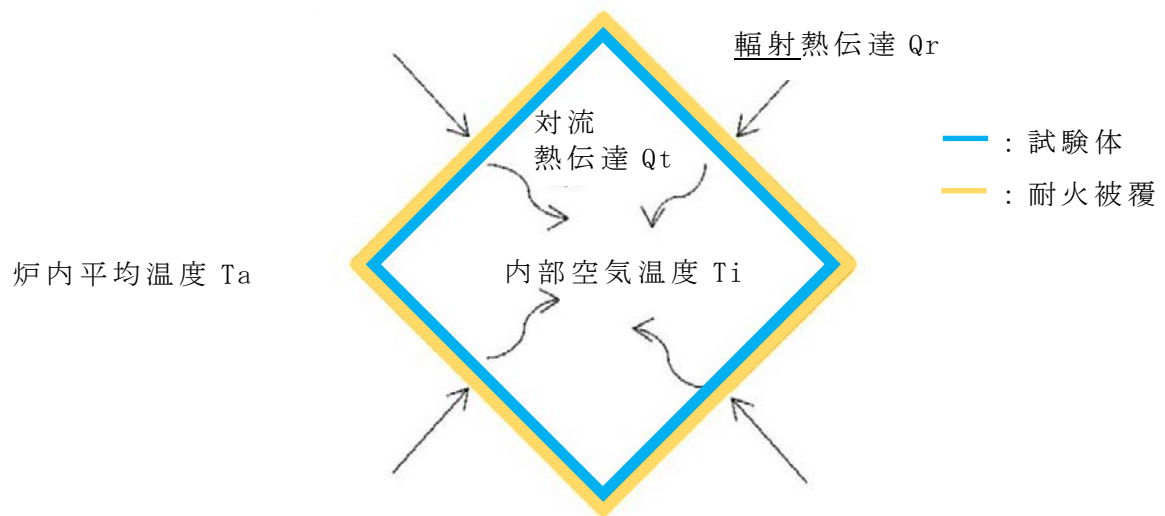
第2-1表に耐火被覆の種類毎に試験体寸法、耐火被覆厚さ、加熱面、加熱時間、試験荷重、試験時間及び試験体数の条件を示す。



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 (角管の断面図)

第 2 - 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 (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 最大軸方向収縮速度 (mm/分): 10.5	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)	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。

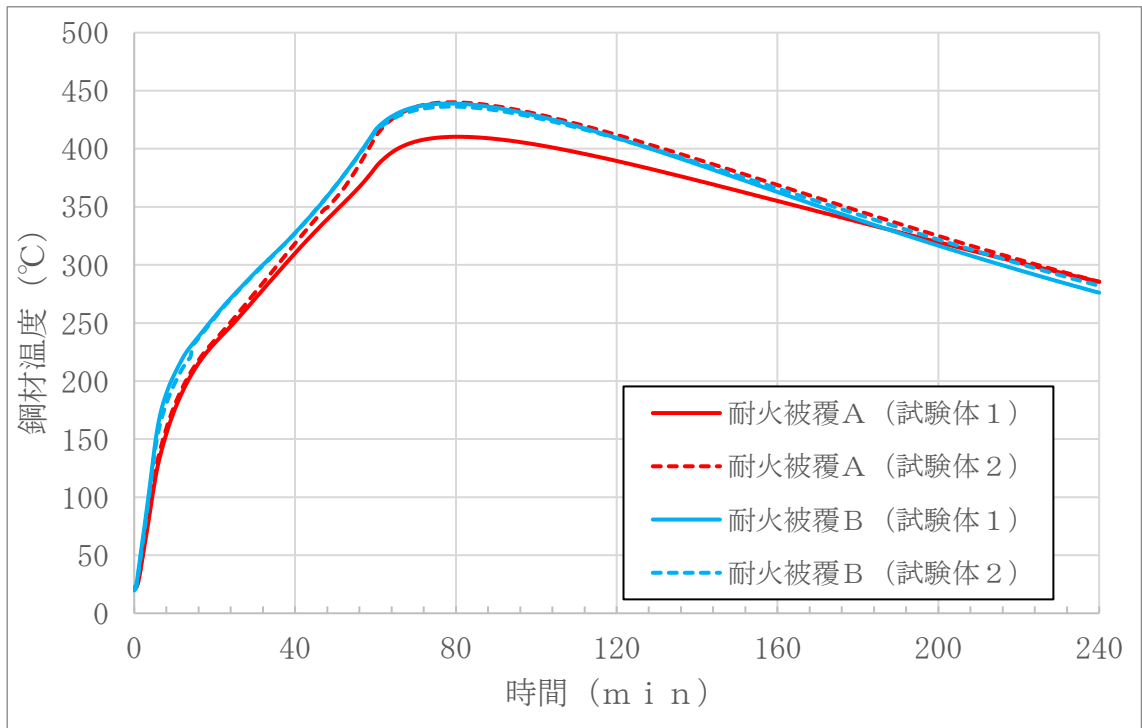
(3) 大臣認定試験の結果

大臣認定試験から得られた鋼材の温度測定結果を第 2 - 4 図に, 耐火被覆表面の様子を第 2 - 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, 載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, 参照した大臣認定試験の結果, 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 2 - 4 図 試験体の鋼材温度の時刻歴



(発泡前)



(発泡後)

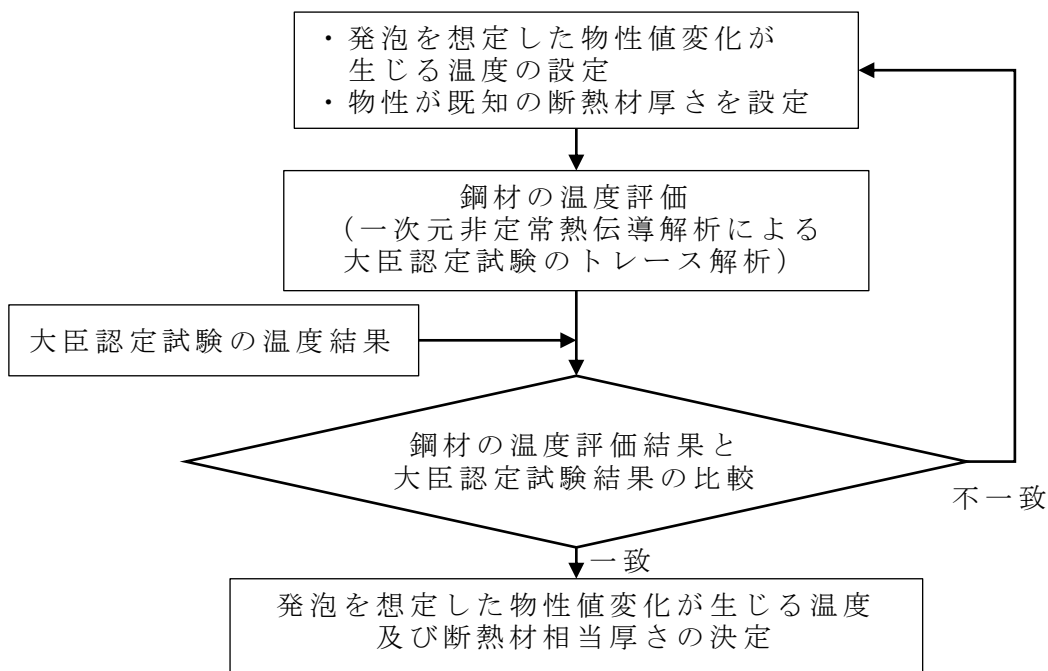
第 2 - 5 図 大臣認定試験の試験体の発泡前後の例

3. 断熱材相当の厚さの算出

(1) 評価方針

上記2. より得られた大臣認定試験の温度測定結果と高温特性が明らかになっている断熱材の熱物性値を用いて、鋼材の温度を一次元非定常熱伝導解析によりトレースし算出した温度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。

断熱材相当の厚さの算出の流れを第3-1図に示す。



第3-1図 断熱材相当の厚さの算出の流れ

(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3-1表に評価対象の仕様及び加熱条件、第3-2表に本温度評価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は、高温域の密度、比熱及び熱伝導率が既知である断熱ボードを選択する。

第 3 - 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	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^{※1}の熱物性値

温度 T	密度 ρ_d	比熱 C_d	熱伝導率 λ_d
[°C]	[g/cm ³]	[kJ / (kg · K)]	[W / (m · K)]
100	0.25	0.858	—
200	0.25	0.959	—
400	0.25	1.083	0.10
600	0.25	1.153	0.14
800	0.25	1.198	0.20
1000	0.25	1.227	0.26

※1 ニチアス ファインフレックス B I O ボード 5625-A

※2 400°C未達は 0.10W / (m · K) を設定

第 3 - 3 表 炭素鋼の物性値 (伝熱工学資料の機械構造用炭素鋼より)

温度 T	密度 ρ_f	比熱 C_f	熱伝導率 λ_f
[K]	[kg / m ³]	[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輻射熱伝達、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 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、断熱材の厚さの切り替えは、断熱材の温度が 280℃に到達した時点としてモデル化することとした。

また、完全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 1.25mm 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。

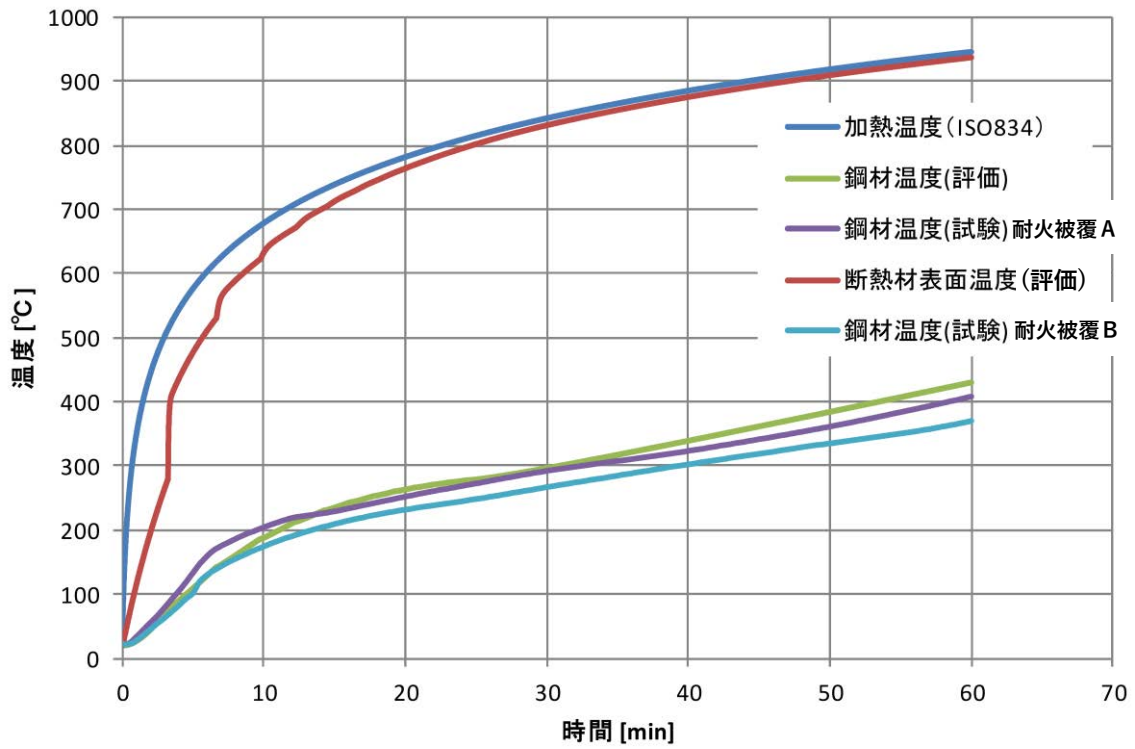
なお、発泡前及び発泡後の断熱材の熱物性値の切り替えは、断熱材の温度及び熱物性値を考慮する計算節点毎に行うこととし、発泡後の断熱材の計算節点で与える熱物性値は、設定する断熱材の熱物性値とする。発泡前の熱物性値は、比熱の場合は設定する断熱材の熱物性値に対して 20 分の 1 に、熱伝導率の場合は設定する断熱材の熱物性値に対して 20 倍に設定する

(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）、鋼材の温度結果（緑色）及び大臣認定試験の鋼材の温度結果（緑色、水色）を第 3-2 図に示す。

温度評価の結果から、断熱材表面温度（赤色）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）ことから、断熱材表面が 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、鋼材の温度結果（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、鋼材表面で温度上昇が緩和されている。

上記の鋼材の温度結果（緑色）は、大臣認定試験の鋼材の温度結果（緑色、水色）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 3 - 2 図 耐火被覆 2 m m 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

4. 耐火被覆厚さの設定と温度評価

上記3. 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、鋼材の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、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（t 9 mm））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 飛来物防護ネットを構成する部材のうち、最も薄い平板であるSUS304（t 9 mm）防護板を代表とする。

(2) 評価条件

保守的に平板の表裏共に熱的境界条件を断熱にて評価を行う。

また、航空機墜落火災で想定される輻射強度である約 30 kW/m^2 を加熱開始の初期条件として設定し、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4－1表に評価対象の仕様及び加熱条件、第4－2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3. の第3－2表の断熱材及び断熱材厚さのモデルと同じとする。

第 4 - 1 表 評価対象の仕様および加熱条件

鋼材の材質	S U S 304
鋼材の形状	平板
鋼材の厚さ	9 m m
輻射強度	29.4 k W / m ²

第 4 - 2 表 ステンレス鋼の物性値（伝熱工学資料の S U S 304 より）

温度 [K]	密度 [k g / m ³]	比熱 [k J / k g 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

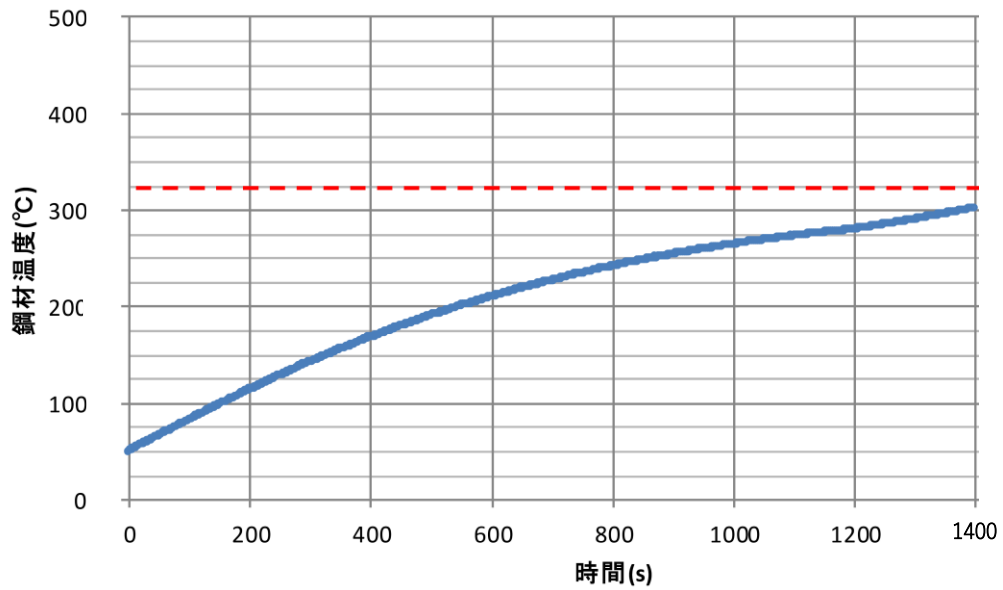
鋼材の温度評価は、添付資料「VI - 1 - 1 - 1 - 4 - 5 外部火災防護における評価方針」の「4.4.3 航空機墜落火災に対する屋外施設（竜巻防護対策設備等）の熱影響評価」における式 4.4.3-6 に基づき実施する。

(4) 評価結果

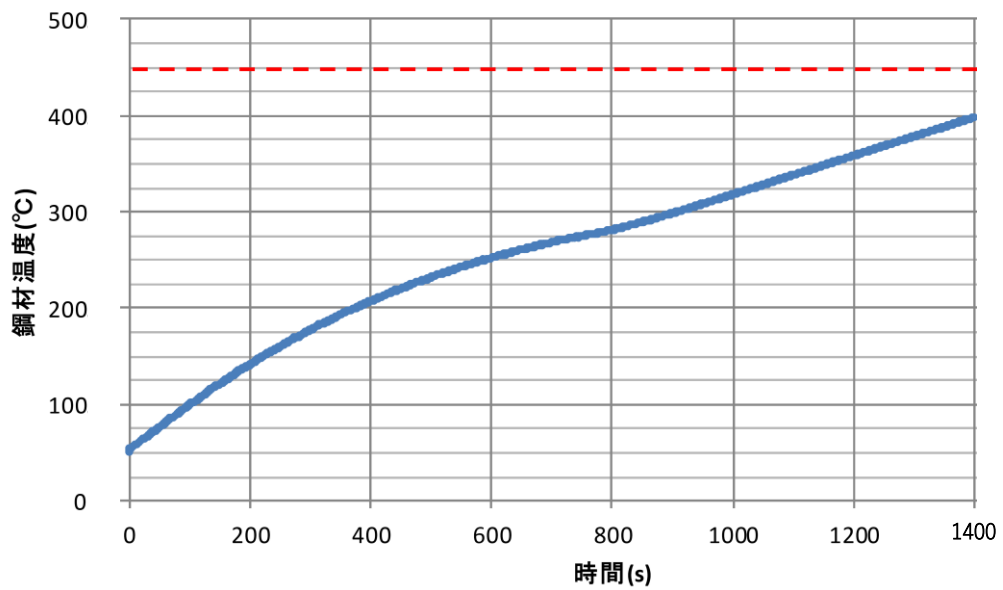
S U S 304 の 9 m m 平板を代表に、耐火被覆厚さを設定して温度評価を行った結果を第 4 - 1 図及び第 4 - 2 図に示す。

評価の結果、鋼材温度を 325℃ 以下とするためには 3 m m の耐火被覆厚さ、450℃ 以下とするためには 2 m m の耐火被覆厚さ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 2 に、時間刻みの影響については参考 3 に示す。



第 4 - 1 図 安全上重要な施設（耐火被覆 3 m m）の
温度評価結果



第 4 - 2 図 波及的影響を及ぼし得る施設（耐火被覆 2 m m）の
温度評価結果

5. 耐火試験（参考）

上記4.にて耐火被覆厚さを設定し、SUS304平板（t 9 mm）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で確認するために、参考として耐火試験を実施した。耐火試験は、4.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条件を念頭に置いた条件）にて行った。

条件①：SUS304平板（t 9 mm）、片面耐火被覆

条件②：SS400平板（t 6 mm, t 12 mm）、両面耐火被覆

耐火試験の条件②と温度評価では、鋼材の材質、鋼材厚さが異なるが、比熱はSUS304よりもSS400の方が小さいこと、鋼材厚さは温度評価を行ったSUS304の鋼材厚さより厚いものと薄いもの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

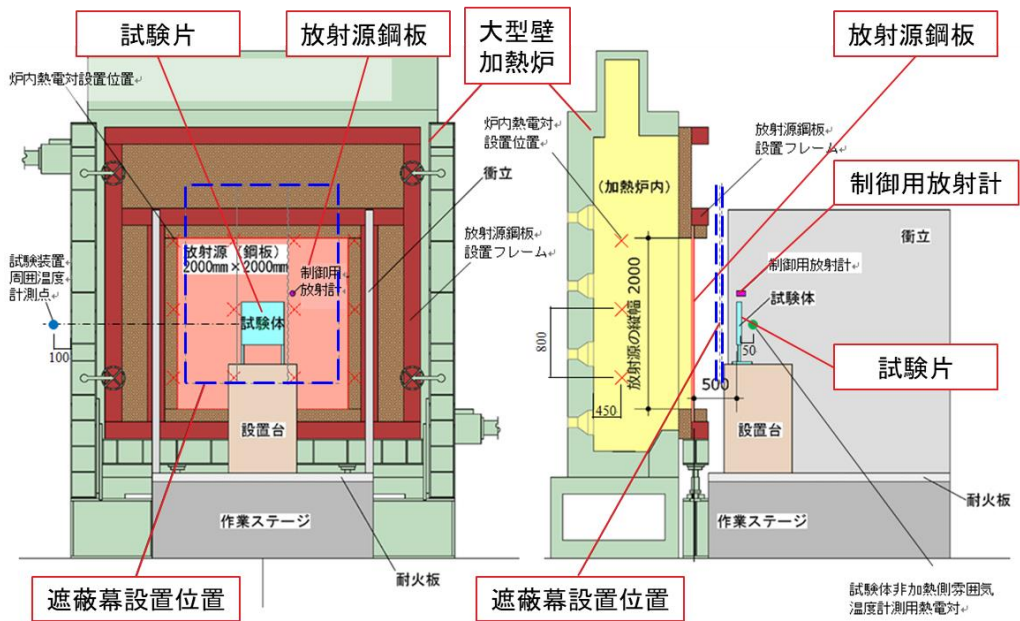
a. 試験方法

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。

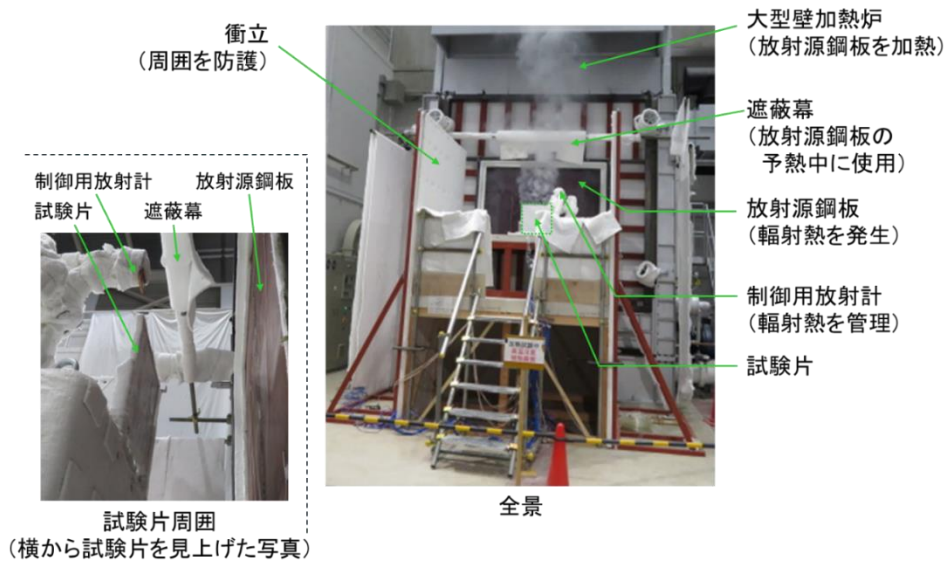
試験開始前に放射源鋼板を予熱し、輻射強度が所定の強度に達した時点で試験を開始する。予熱中は、試験片への入熱を軽減するため、試験片と放射源鋼板の前に遮蔽幕を設置する。試験片の近傍に設置した制御用放射計を用いて輻射熱を管理する。

b. 試験条件

火災の輻射強度、燃焼時間及び試験体の条件を第5-1表及び第5-2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①

項目		条件①				
輻射強度		耐火被覆表面にて $29,400 \text{ W/m}^2$				
耐火試験ケース		1-1	1-2	2-1	2-2	
燃焼時間		3600 s [*]				
試験体	鋼材	種類	平板			
			S U S 304			
		厚さ	9 m m			
	耐火被覆	施工面	片面			
		種類	A	B	A	B
		厚さ	2 m m		3 m m	

※ 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 5 - 2 表 試験条件②

項目		条件②				
輻射強度		耐火被覆表面にて $29,400 \text{ W/m}^2$				
耐火試験ケース		3-1	3-2	4-1	4-2	
燃焼時間		3600 s [*]				
試験体	鋼材	種類	平板			
			S S 400			
		厚さ	12 m m	6 m m		
	耐火被覆	施工面	両面			
		種類	A	B	A	B
		厚さ	2 m m			

※ 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の結果について

耐火試験により得られたケース 1-1 及び 1-2 の温度測定結果及び温度評価結果を第 5 - 3 図に，ケース 2-1 及び 2-2 の温度測定結果及び温度評価結果を第 5 - 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 の温度結果は，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。

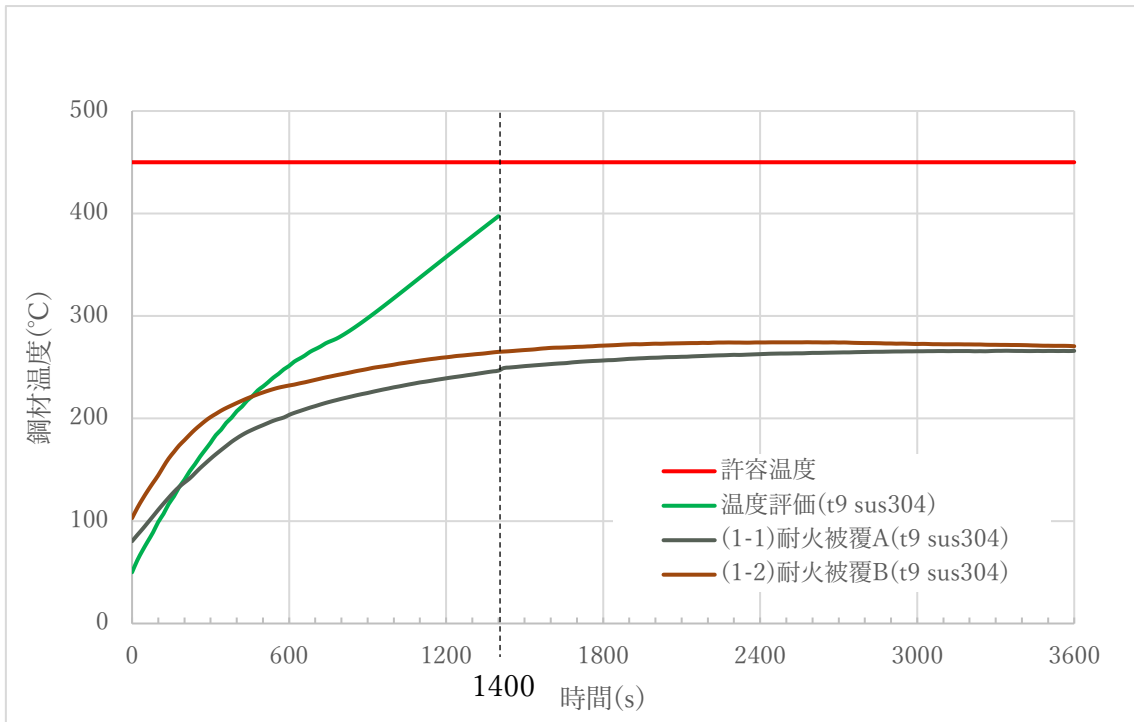
b. 試験条件②の結果について

ケース 3-1 及び 4-1 の温度測定結果及び温度評価結果を第 5 - 5 図に，ケース 3-2 及び 4-2 の温度測定結果及び温度評価結果を第 5 - 6 図に示す。

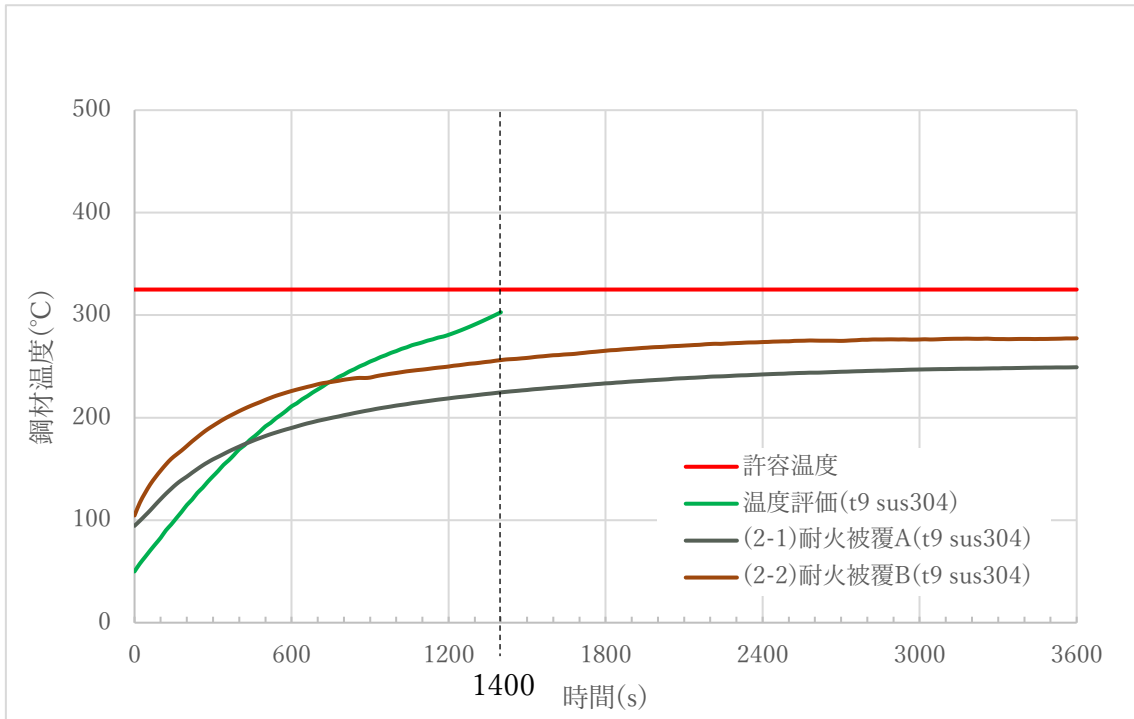
第 5 - 5 図及び第 5 - 6 図の耐火被覆が 2 m m で鋼材厚さが 6 m m 又は 12 m m の耐火試験ケース 3-1 から 4-2 の初期温度は，温度評価結果と比較して数 10℃から 100℃程度高い結果となった。また，耐火試験ケース 3-1 から 4-2 の温度上昇は緩やかであり，温度評価の結果と比べて許容温度を大きく下回る結果となった。

c. 試験条件①及び②の結果について

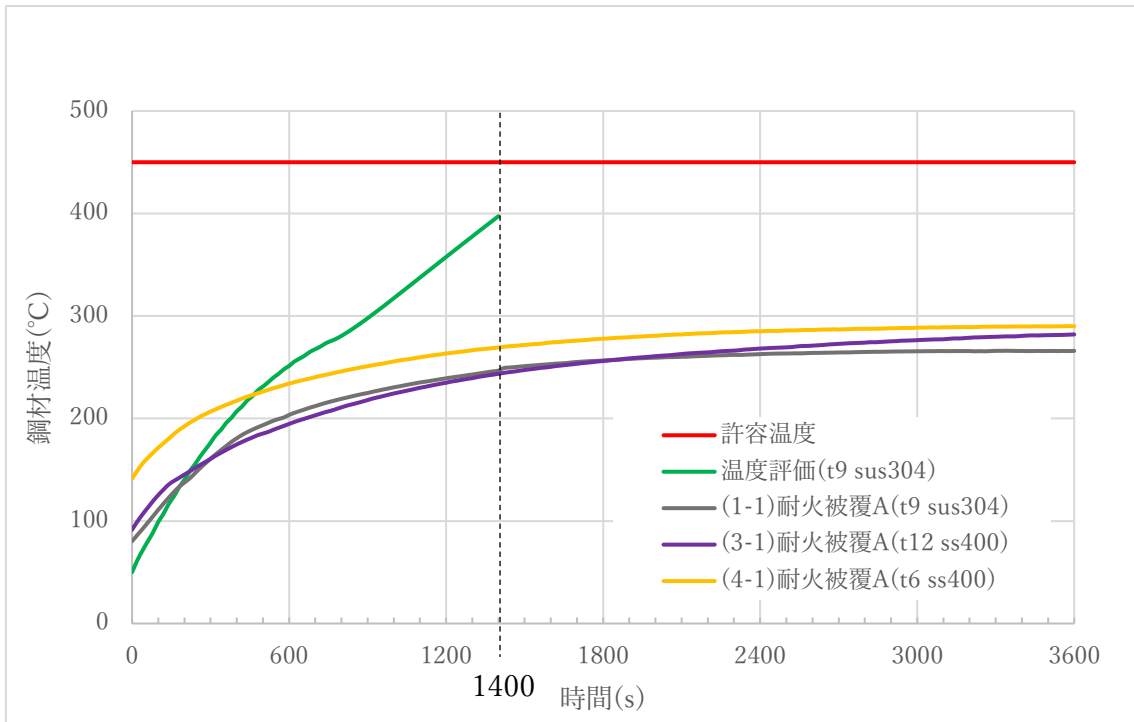
耐火試験ケース 3-1 から 4-2 と耐火試験ケース 1-1 及び 1-2 の結果を比較すると，鋼材厚さが 6 m m の温度測定結果（3,600 秒後）が最も温度が高く，次に鋼材厚さが 12 m m，最も温度が低いのが鋼材厚さ 9 m m となった。



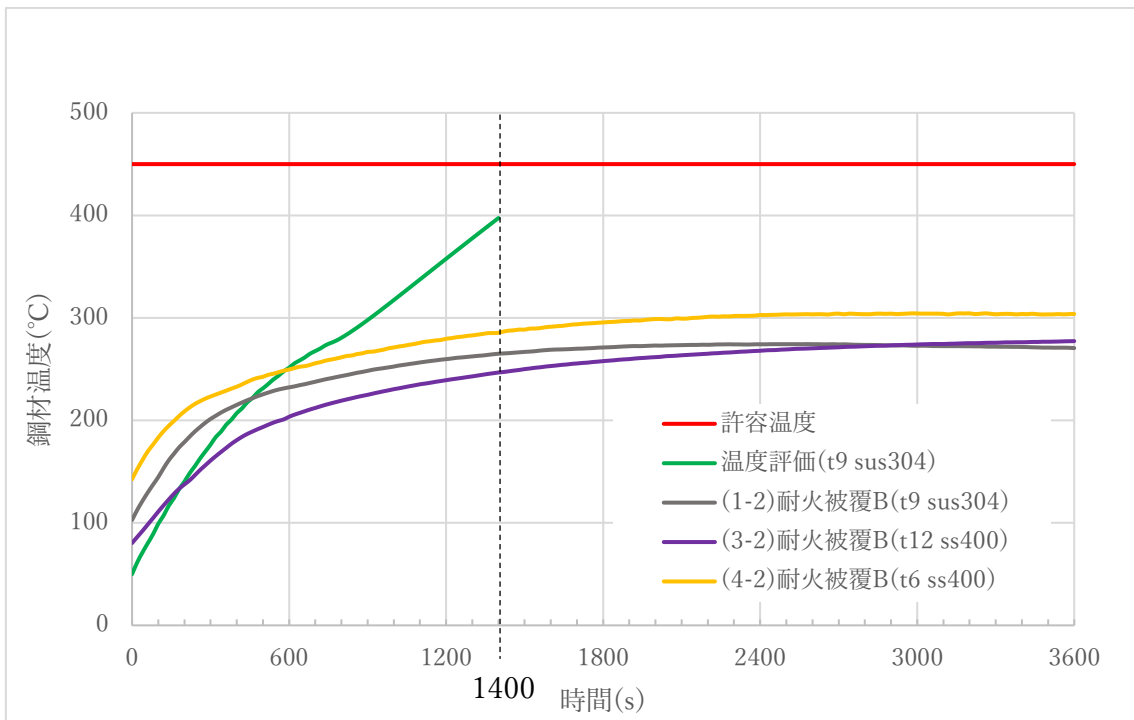
第 5 - 3 図 耐火被覆 2 m m の温度評価と耐火試験ケース 1-1, 1-2 の比較



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



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



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

(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 5 - 7 図から第 5 - 12 図に示す。

第 2 - 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が確認できるが, 灰化にまでは至っていないことが確認できる。

また, 第 5 - 3 図から第 5 - 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5-3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>9 m m</u>	片面	<u>2 m m</u>	—	第5-3図, 第5-5図, 第5-6図	50℃	410℃	410℃超	—
温度評価 2	SUS304	<u>9 m m</u>	片面	<u>3 m m</u>	—	第5-4図	50℃	300℃	300℃超	—
耐火試験 1-1	SUS304	<u>9 m m</u>	片面	<u>2 m m</u>	<u>A</u>	第5-3図	80℃	249℃	266℃	第5-7図
耐火試験 2-1	SUS304	<u>9 m m</u>	片面	<u>3 m m</u>	<u>A</u>	第5-4図	95℃	225℃	249℃	第5-9図
耐火試験 3-1	SS400	<u>1 2 m m</u>	両面	<u>2 m m</u>	<u>A</u>	第5-5図	92℃	244℃	282℃	第5-11図
耐火試験 4-1	SS400	<u>6 m m</u>	両面	<u>2 m m</u>	<u>A</u>	第5-6図	141℃	269℃	290℃	第5-13図
耐火試験 1-2	SUS304	<u>9 m m</u>	片面	<u>2 m m</u>	<u>B</u>	第5-3図	103℃	265℃	274℃	第5-8図
耐火試験 2-2	SUS304	<u>9 m m</u>	片面	<u>3 m m</u>	<u>B</u>	第5-4図	105℃	256℃	277℃	第5-10図
耐火試験 3-2	SS400	<u>1 2 m m</u>	両面	<u>2 m m</u>	<u>B</u>	第5-5図	80℃	247℃	277℃	第5-12図
耐火試験 4-2	SS400	<u>6 m m</u>	両面	<u>2 m m</u>	<u>B</u>	第5-6図	143℃	285℃	304℃	第5-14図



(試験開始前)



(1時間後)

第5-7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5-8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5-9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5-10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5-11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5-12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5-13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5-14図 耐火試験ケース4-2の試験前後の試験体の様子

6. 温度評価及び耐火試験の考察

第5-3図から第5-6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秒後までの温度変化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(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(表側)内部、耐火被覆から鋼材表面、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(表面)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°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、耐火被覆から鋼材表面、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

鋼材初期温度の乖離，鋼材の温度変化の乖離及び鋼材の温度結果についての考察を，下記 a. から b. 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 5 - 3 図から第 5 - 6 図を参照する。(ケース一覧は第 5 - 3 表参照)

a. 鋼材初期温度の乖離についての考察

温度評価と耐火試験の鋼材初期温度の乖離に関して，温度評価と耐火試験の違い (a)，耐火試験の鋼材厚さの違い (b) の観点から考察を行う。

(a) 温度評価と耐火試験の鋼材初期温度について

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(①)，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(耐火試験ケース 1-1 から 4-2) は，温度評価(初期温度 50℃)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。

(b) 耐火試験の鋼材厚さによる鋼材初期温度への影響について

鋼材厚さ 6 mm 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 12 mm 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 6 mm 鋼材の方が熱容量が小さく，厚さ 12 mm 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。

b. 鋼材の温度変化の乖離についての考察

温度評価と耐火試験の鋼材の温度変化の乖離について，温度評価と耐火試験の放熱の考慮の違い (a) 及びについてトレース解析の結果から想定される放熱の程度 (b) の観点から考察する。

(a) 温度評価と耐火試験の温度変化への放熱の影響について

第 5 - 3 図から第 5 - 6 図から，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という乖離がある。

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解析を実施している。

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、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ることはできない。

このため、温度評価と耐火試験の結果では、温度上昇の傾向に乖離が生じているものと考えられる。

(b) 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

耐火試験における放射源鋼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、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し、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見込んで設定した。

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比較を第 6-1 図及び第 6-2 図に示す。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。

よって、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、耐火試験条件は妥当な設定であったと想定される。

c. 鋼材の温度結果 (3,600 秒後) の乖離についての考察

鋼材温度 (3,600 秒後) の乖離について、耐火試験の鋼材の熱容量の違い (a)、試験体の耐火被覆厚さの違い (b) 並びに入熱量の違い (c) の観点から考察する。

(a) 耐火試験の熱容量による温度結果 (3,600 秒後の鋼材温度) への影響について

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、熱容量が最も小さく、耐火被覆厚さ 2 mm の耐火試験ケース 4-1 及び 4-2 が、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ことが考えられるが、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く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) 耐火試験の耐火被覆厚さによる温度結果（3,600秒後の鋼材温度）への影響の考察

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）が低いが、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、鋼材初期温度及び鋼材温度（3,600秒後）において、同じ2から3℃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、鋼材温度（3,600秒後）において約15℃の違いが現れているが、鋼材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、鋼材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鋼材温度をもたらす耐火被覆厚さが異なるのは、鋼材初期温度の違いによると考えられる。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）への影響の考察

・入熱量の影響について

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。

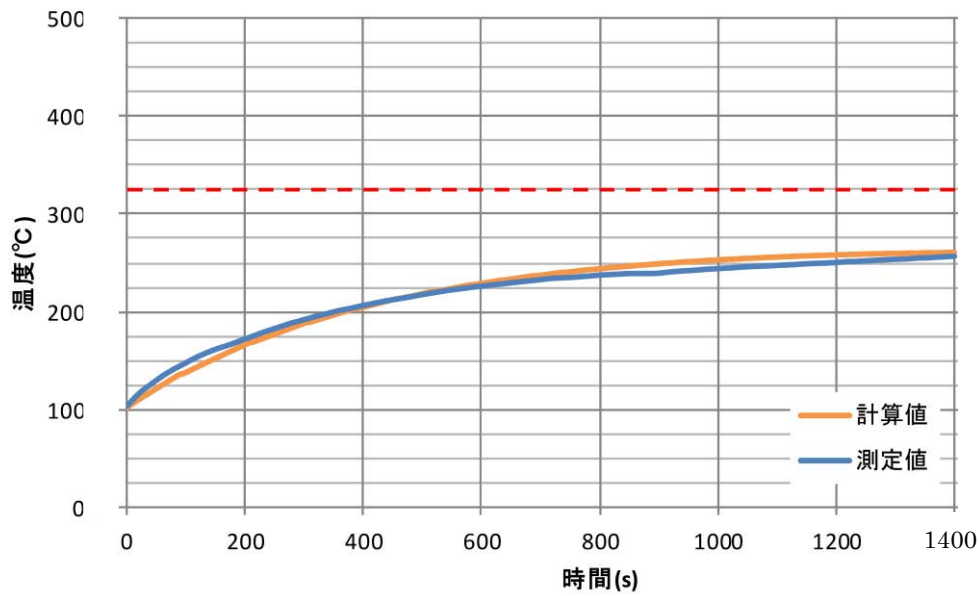
このような乖離については、温度評価の内容は保守的に輻射強度を設定していることから、温度評価の入熱量（約18,000kJ/m²）が、耐火試験の入熱量（約8,000kJ/m²）を大幅に上回っていることが影響していると考えられる。（詳細は別添9参照）

(3) まとめ

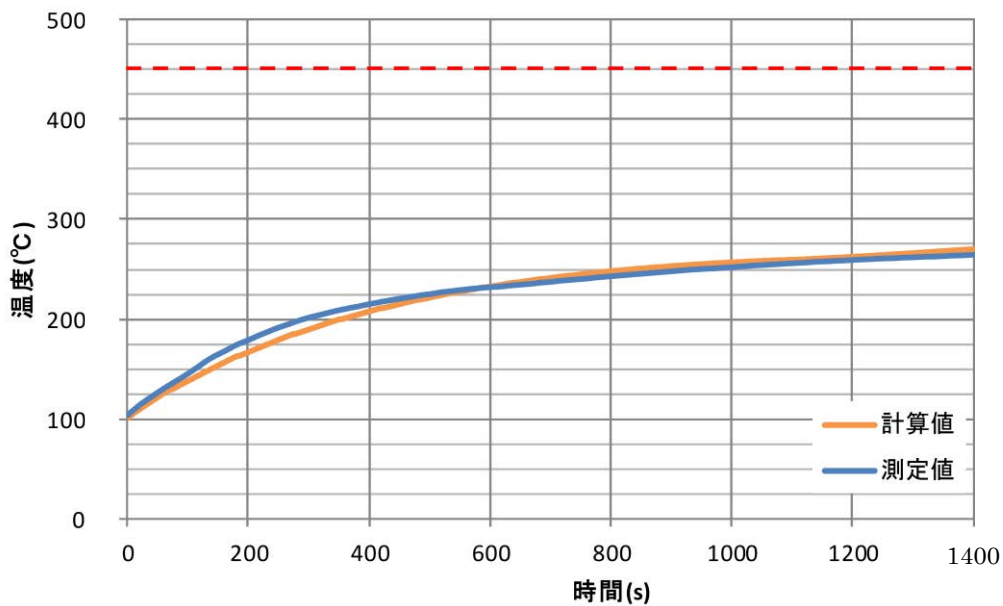
上記の温度評価と耐火試験の鋼材初期温度の乖離、温度評価と耐火試験の鋼材の温度変化の乖離、鋼材温度（3,600秒後）の乖離について考察した結果から、耐火試験は航空機墜落火災の条件を再現している一方、温度評価は以下のように保守性を確保している。

- ・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、鋼材の境界からの熱の逃げがなく、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 k J / m²）を大幅に上回る入熱量（約 18,000 k J / m²）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。

上記の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、安全余裕が見込まれ、設計として妥当といえることができる。



第 6 - 1 図 耐火被覆 B (S U S 304, t 9 m m ,
耐火塗装厚さ 3 m m) のトレース解析による温度評価結果及び
耐火試験による温度測定結果



第 6 - 2 図 耐火被覆 B (S U S 304, t 9 m m ,
耐火塗装厚さ 2 m m) のトレース解析による温度評価結果及び
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。

(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 (m^3)

(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。

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

上式を陽解法により Δt ごとの時間進行の式にすると、

$$Tf_{n+1} = Tf_n + \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho_f \cdot c_f \cdot V_f}$$

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

Tf_n : 現在の温度 ($^{\circ}C$)

Tf_{n+1} : Δt 後の鋼材温度 ($^{\circ}C$)

Q : 熱伝導量 (W)

ρ_f : 鋼材の密度 (kg / m^3)

c_f : 鋼材の比熱 ($J / kg \cdot K$)

V_f : 鋼材の体積 (m^3)

(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。

$$Qt = h \cdot A \cdot (Tf(Nf) - Ti)$$

ここで、

Qt : 対流熱伝達 (W)

h : 熱伝達係数 ($W / (m^2 \cdot K)$)

A : 受熱面積 (m^2)

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 ($^{\circ}C$)

Ti : 内部空気温度 ($^{\circ}C$)

熱伝達係数は、ヌセルト数の定義から、次式にて設定する。

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

ここで、

h : 熱伝達係数 ($W / (m^2 \cdot K)$)

Nul : 平均ヌセルト数

HL : 角鋼管の高さ

λ : 空気の熱伝導率 ($W / (m \cdot K)$)

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 [K]	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

参考2 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

(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、以下の式から求めることができる。

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

ここで、

- d : 拡散数 (-)
- λ : 熱伝導率 (W / (m · K))
- c : 比熱 (J / k g · K)
- ρ : 密度 (k g / m ³)
- Δt : 時間刻み (s)
- Δx : 区分厚さ (m)

計算モデル中の節点数は $N = L + 1$ (L は板厚 [m m] , 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

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。

・断熱材の拡散数 d

本解析のうち断熱材では、時間刻み Δt を 0.001[s]、区分厚さ Δx を 0.001[m] に設定している。

また、比熱 c 、密度 ρ 及び熱伝導率 λ は温度依存性を考慮するとともに、拡散数の評価の結果を厳しく考慮するために、第3-2表に示す断熱材の物性値から、比熱 c 及び密度 ρ は最小値を、熱伝導率は最大値を用いることとする。

上記の設定から拡散数 d を算出した結果、約 1.2×10^{-3} となり、拡散数 d は判断基準値 $1/2$ 以下となるため、本解析の計算パラメータの設定は妥当であることを確認した。

・鋼材の拡散数 d

本解析のうち鋼材では、時間刻み Δt を $0.001[s]$ 、区分厚さ Δx を $0.001[m]$ に設定している。

また、比熱 c 、密度 ρ 及び熱伝導率 λ は温度依存性を考慮するとともに、拡散数の評価の結果を厳しく考慮するために、第 4-2 表に示すステンレス鋼の物性値から、比熱 c 及び密度 ρ は最小値を、熱伝導率は最大値を用いることとする。

上記の設定から拡散数 d を算出した結果、約 6.5×10^{-3} となり、拡散数 d は判断基準値 $1/2$ 以下となるため、本解析の計算パラメータの設定は妥当であることを確認した。

参考3 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0.001s	時間刻み0.0001s	
	Tco(°C)	Tco(°C)	
0	50	50	0.00
1	50.9	50.9	0.00
2	52.2	52.2	0.00
3	53.1	53.1	0.00
4	54.1	54.1	0.00
5	54.4	54.4	0.00
6	54.7	54.7	0.00
7	55.2	55.2	0.00
8	55.8	55.8	0.00
9	56.5	56.5	0.00
10	57.1	57.1	0.00

途中省略

1390	395.4	395.4	0.00
1391	395.6	395.6	0.00
1392	395.8	395.8	0.00
1393	396.0	396.0	0.00
1394	396.2	396.2	0.00
1395	396.4	396.4	0.00
1396	396.6	396.6	0.00
1397	396.8	396.8	0.00
1398	397.0	397.0	0.00
1399	397.2	397.2	0.00
1400	397.4	397.4	0.00

令和3年7月30日 R3

別添-5

許容温度の考え方

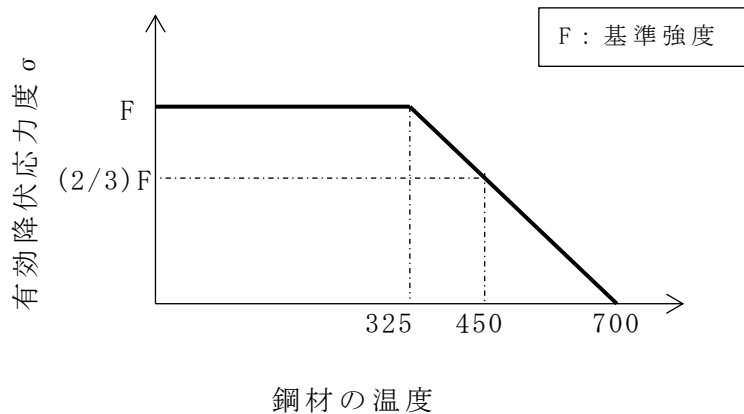
目 次

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°C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°C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

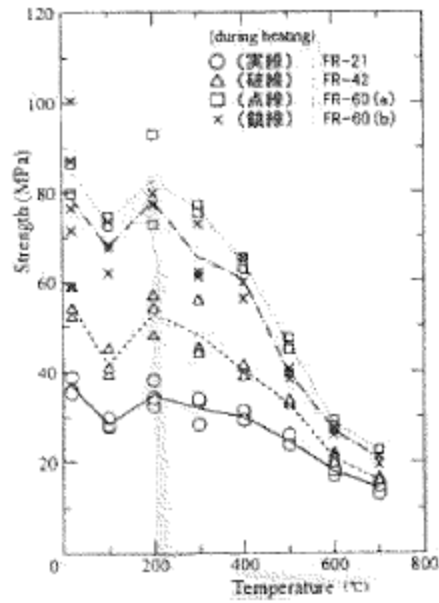
施設	許容温度
安全上重要な施設	325℃
安全上重要な施設に波及的影響を及ぼし得る施設	450℃

- [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7月30日 R4

別添－6
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

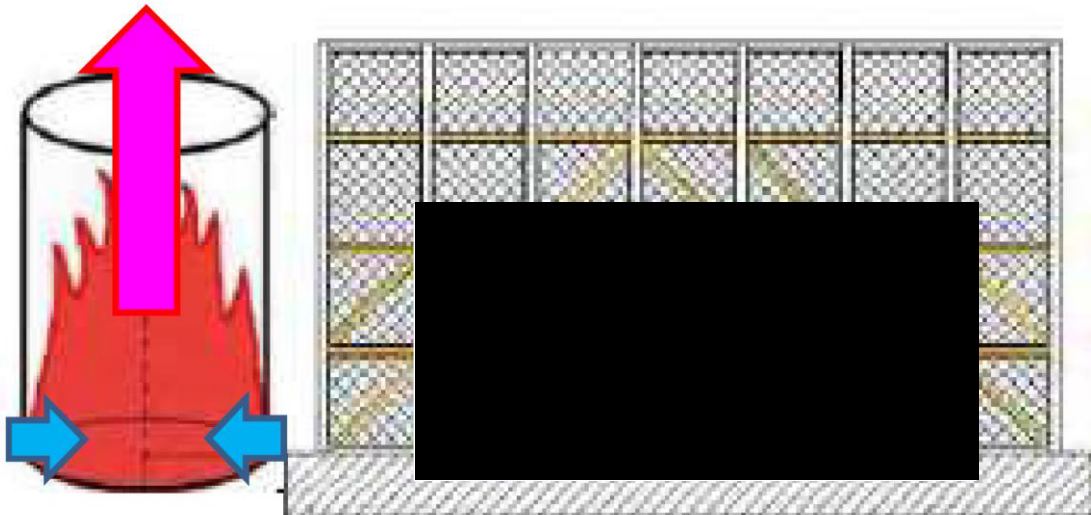
参考1 FDSの計算概要について

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、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している。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。(参考1参照)

FDSを用いた解析の解析条件を第2-1表に示す。航空機墜落火災の対象航空機はF-16であるが、ここでは高温空気の影響を大まかに確認することを目的とするため、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の円筒火炎の諸元は似通っていることから、F-2の諸元に基づく解析結果から大まかな傾向把握できると考えられる。また、航空機墜落火災は開放空間で発生することから、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、燃焼時間が若干異なるF-2の諸元を用いた解析結果でも高温空気の影響の傾向を把握することは可能である。

■ 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-別添 6-1

火炎柱付近の風速データを抽出した結果を第2-1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。

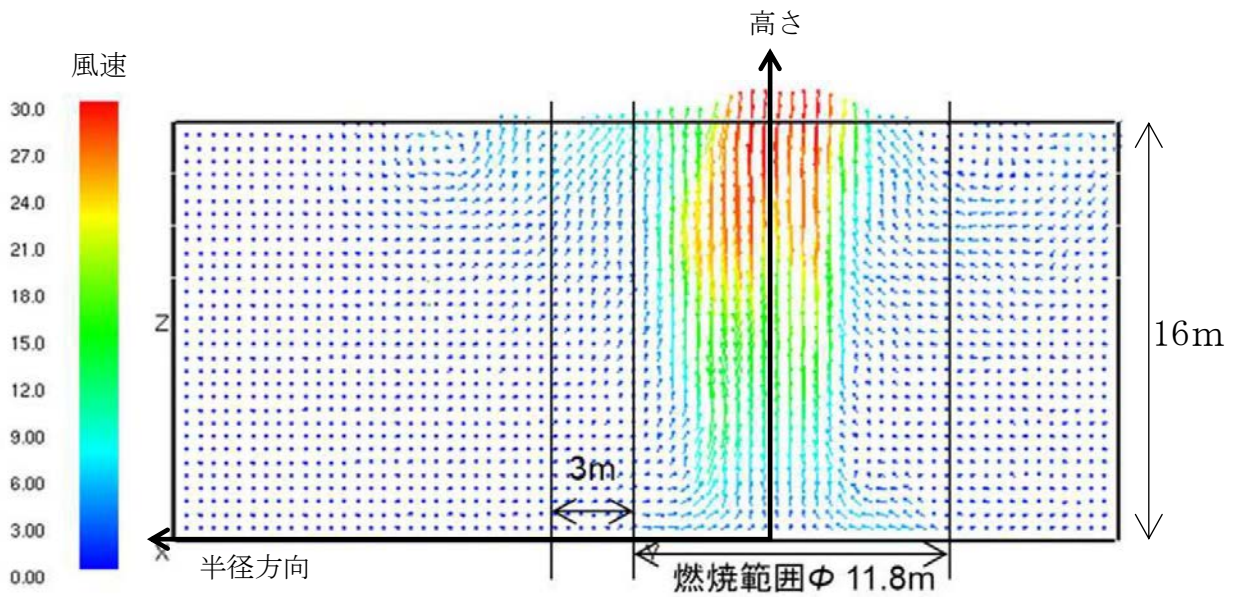
第2-1図より、火炎柱中心では10m/s以上、最大約30m/sの上昇流が発生し、火炎柱に隣接する空間では、火炎柱に向かって周囲の空気を巻き込む流れが発生することが確認できる。また、火炎柱下部において、火炎柱から周辺に向かって高温空気が流れる傾向は見られない。これらのことから、高温空気が冷却塔に向かって流れ込むことは考えられず、冷却塔に影響を及ぼすことはないと考えられる。

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。したがって、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。

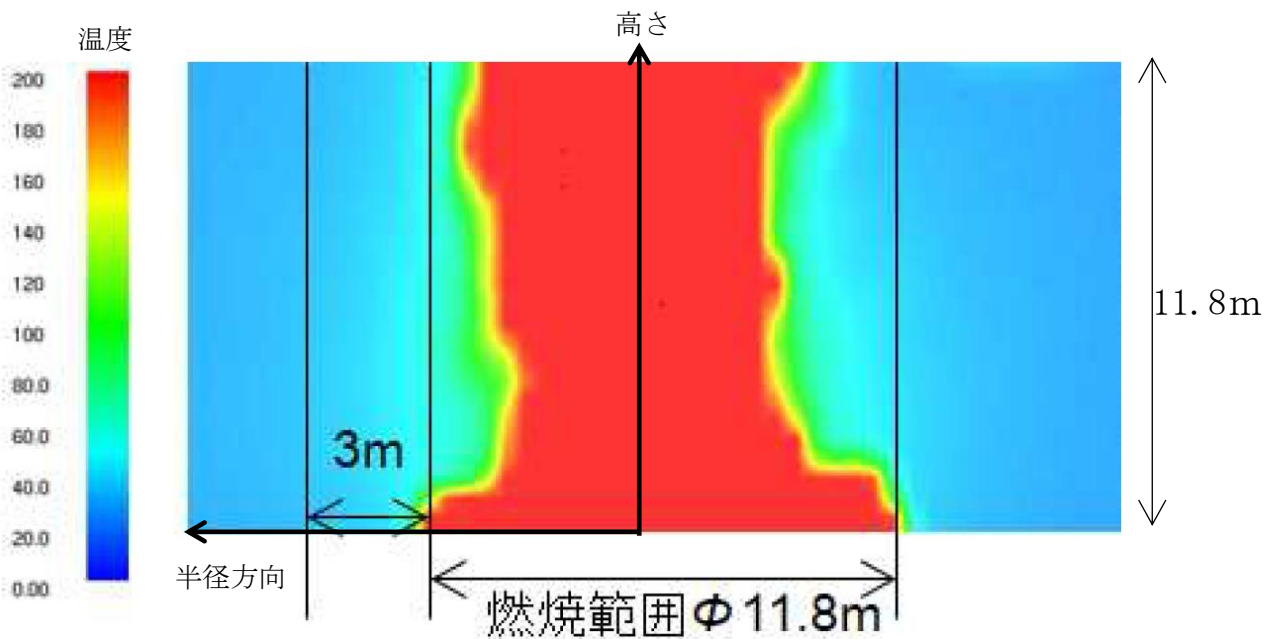
第2-1表 FDSによる火災シミュレーションの設定条件

項目	値	単位	備考
燃焼面積	約110	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90m ² 。
燃料積載量	10.4	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9.8m ³ 。
燃焼速度	8.0×10 ⁻⁵	m/s	石油コンビナート等の防災アセスメント指針より引用。
燃焼時間	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。
燃料プール形状	円形	m	外部火災ガイドに基づき設定。
燃料プール半径	約5.9	m	燃焼面積、燃料プール形状より算出。F-16の場合の燃料プール半径は約5.4m。
外部風速	0	m/s	外部火災ガイドに基づき設定。
外部風向	—	—	外部火災ガイドに基づき設定。
初期温度	29	℃	設計外気温(高温)を設定。



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秒でほぼ安定するが、100秒の時点での可視化画像としている。

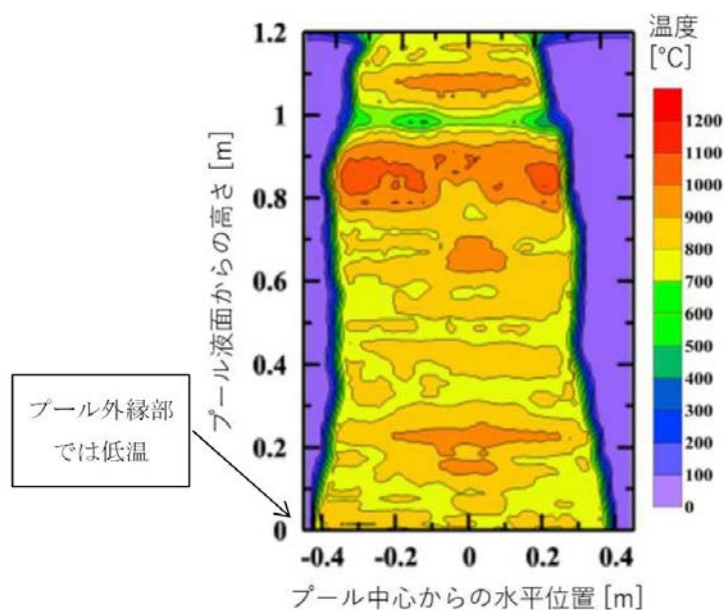


第2-2図 火炎柱近傍における温度データ※ (単位: °C)

※ 火炎の形状は着火から約10秒でほぼ安定するが、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^[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 (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10m/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1~3m/sであるが、安全側に3m/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

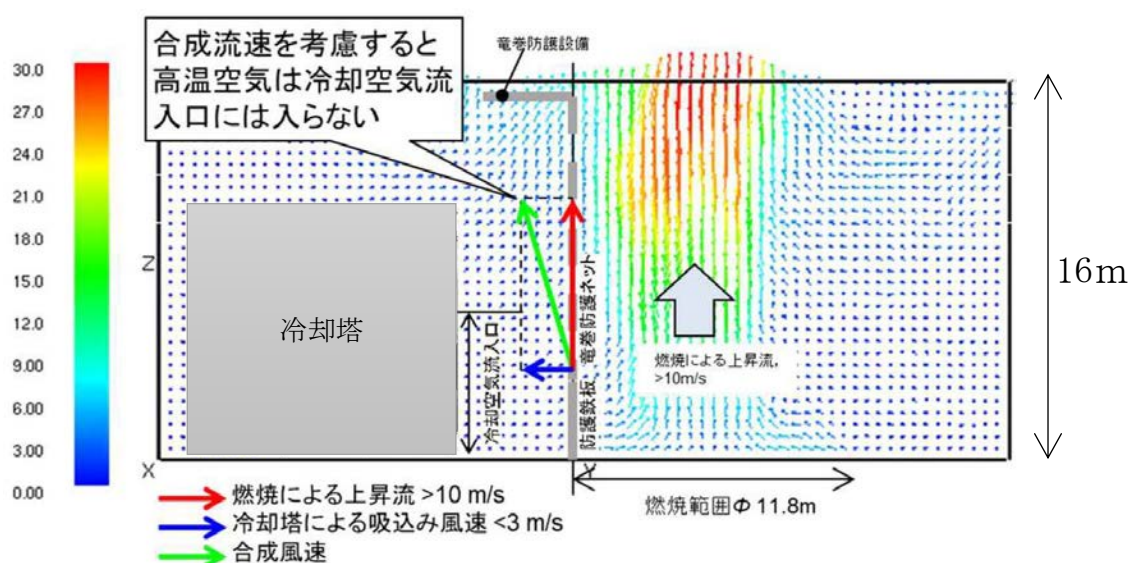
防護ネット外面において空気の流入がある下端の高さとした。

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。

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	3 m	
冷却塔の空気吸い込み口高さ（ファンリング下端高さ）	6 m	
飛来物防護ネット外面の冷却空気流入高さ	3.3 m	
飛来物防護ネット外面からの仰角 (a)	4.2°	
高温空気の流入角度 (b)	7.3°	
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

■ 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-別添 6-5

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^[1]。

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^[2]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^[2]

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_{β} (m^{-1})	ΔH_c (kJ/kg)	SEPmax ($kW \cdot m^{-2}$)	Km (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
Naphtha/ Pentane	0.095	100.000		200	100	0.417	0.23	0.12	0.08
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3年7月30日 R1

別添-7
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 輻射受熱面の影響評価	5
3. 結論	8

1. はじめに

航空機墜落火災により発生する輻射に対し、支持構造物を構成する部位は、耐火被覆を施工する部材と施工しない部材、および輻射を受ける面と受けない面が存在する。そのため、支持構造物内で温度差が生じることから、本資料では、温度差による熱影響について検討する。

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検討と、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について検討する。

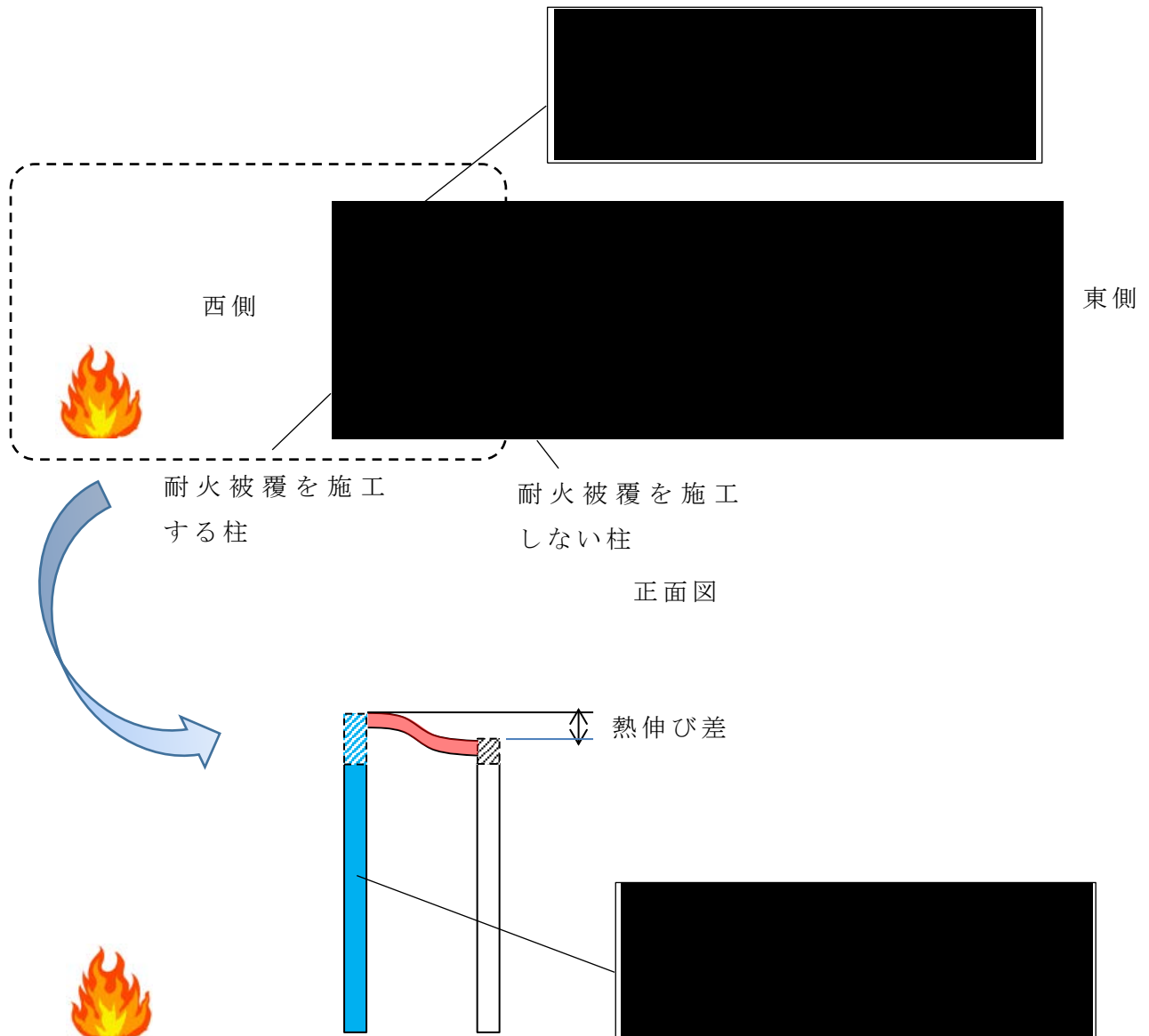
2. 1 支持構造物本体の影響評価

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

構造体としての評価は、耐火被覆の有無が生じる支柱のスペンが短く、梁による拘束力が大きいモデルが熱保守的な評価となることから冷却塔を評価対象とする。

本評価は熱応力による影響を確認するための評価であることから、第1回申請対象施設である安全系冷却水 B 冷却塔を代表に評価する。評価モデルを第2-1図に示す。



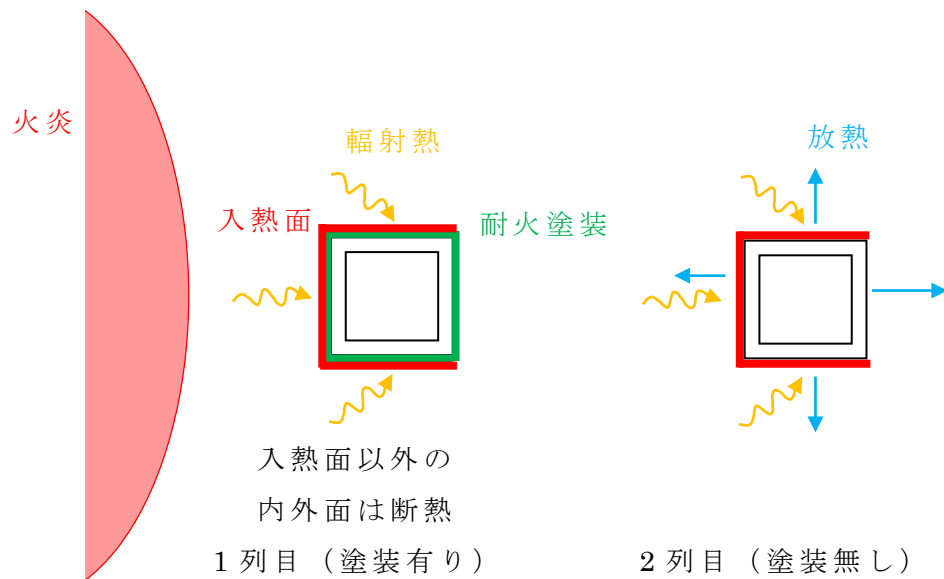
第 2 - 1 図 構造体の評価モデル

(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。

■ については商業機密の観点から公開できません。



第 2 - 2 図 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 Δt ごとの時間進行の式にすると次式となる。

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

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	29
t	sec	燃焼時間	1400
Δt	sec	時間刻み	0.001
Q	W	熱の授受量（輻射入熱）	1 列目：14262 ^{*1} 2 列目：7998 ^{*2}
ρ	k g / m ³	評価点の部材の密度	7850
C_p	J / (k g K)	評価点の部材の比熱	465
V	m ³	評価点の部材の体積	0.016 ^{*3}

※1：（輻射発散度 58000[W/m²]×形態係数 0.239+太陽輻射 400[W/m²])×単位面積。これに塗装の熱抵抗を考慮し、鋼材への入熱を与える。

※2：（輻射発散度 58000[W/m²]×形態係数 0.131+太陽輻射 400[W/m²])×単位面積。これに放熱を考慮し、鋼材への入熱を与える。

※3：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	<u>m m</u>	熱伸び差	9.8
α	<u>1 / K</u>	線膨張係数	1.34×10 ⁻⁵
H	<u>m</u>	柱の高さ	10.75
E	<u>M P a</u>	弾性係数	205000
I	<u>m m⁴</u>	梁の断面二次モーメント	4.72×10 ⁷
ℓ	<u>m</u>	梁の長さ	6.58
Z	<u>m m³</u>	梁の断面係数	4.72×10 ⁵

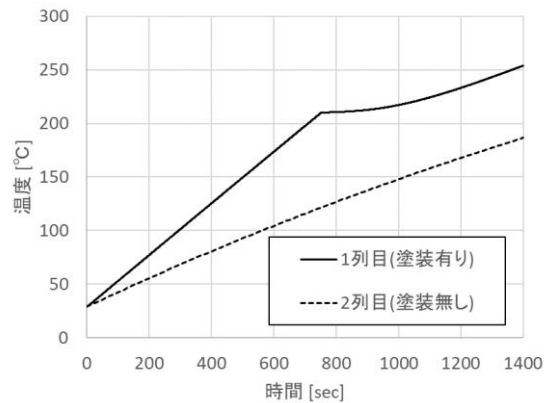
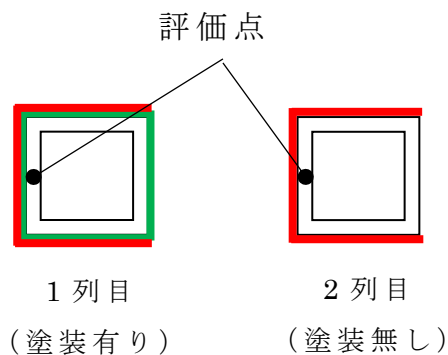
(4) 評価結果について

1 列目と 2 列目の 1400 秒後の部材の温度評価結果を第 2 - 3 表、第 2 - 3 図に示す。

■■■については商業機密の観点から公開できません。

第 2 - 3 表 部材の温度上昇結果

	温度 [°C]
1 列目	255
2 列目	187



第 2 - 3 図 温度評価結果

熱応力評価結果を第 2 - 4 表に示す。

第 2 - 4 表 評価結果

発生応力 (MPa)	許容値 (MPa)
28	245

2. 2 輻射受熱面の影響評価

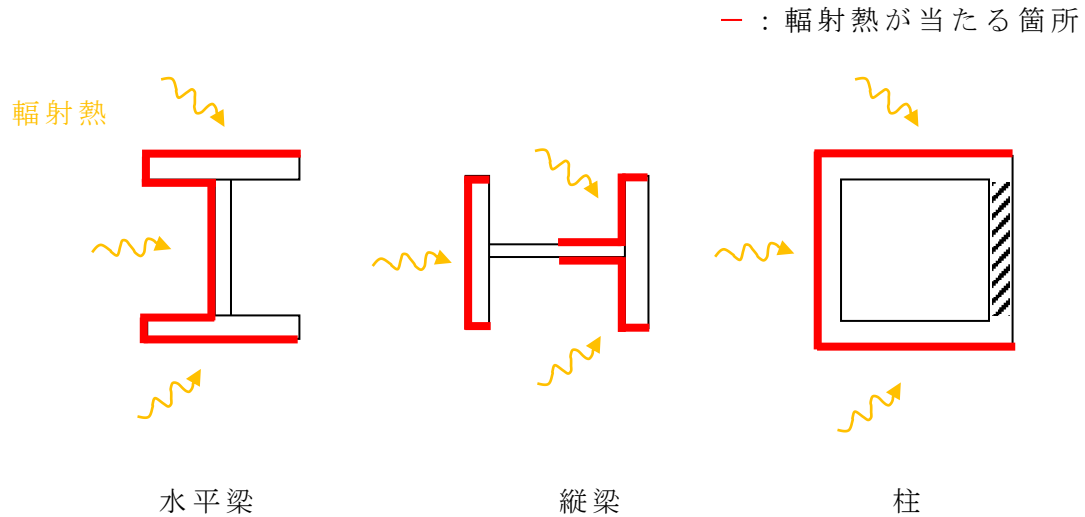
火炎からの輻射を受熱する部材に対する熱影響について検討する。本検討においては、火炎から受ける輻射を受ける面と受けない面で生じる温度差による影響について検討する。火炎に近い方が輻射の有無による温度差が大きいため、竜巻防護対策設備の支持架構を対象に評価を行う。

(1) 評価対象について

支持構造物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。

評価モデルを第2-4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。

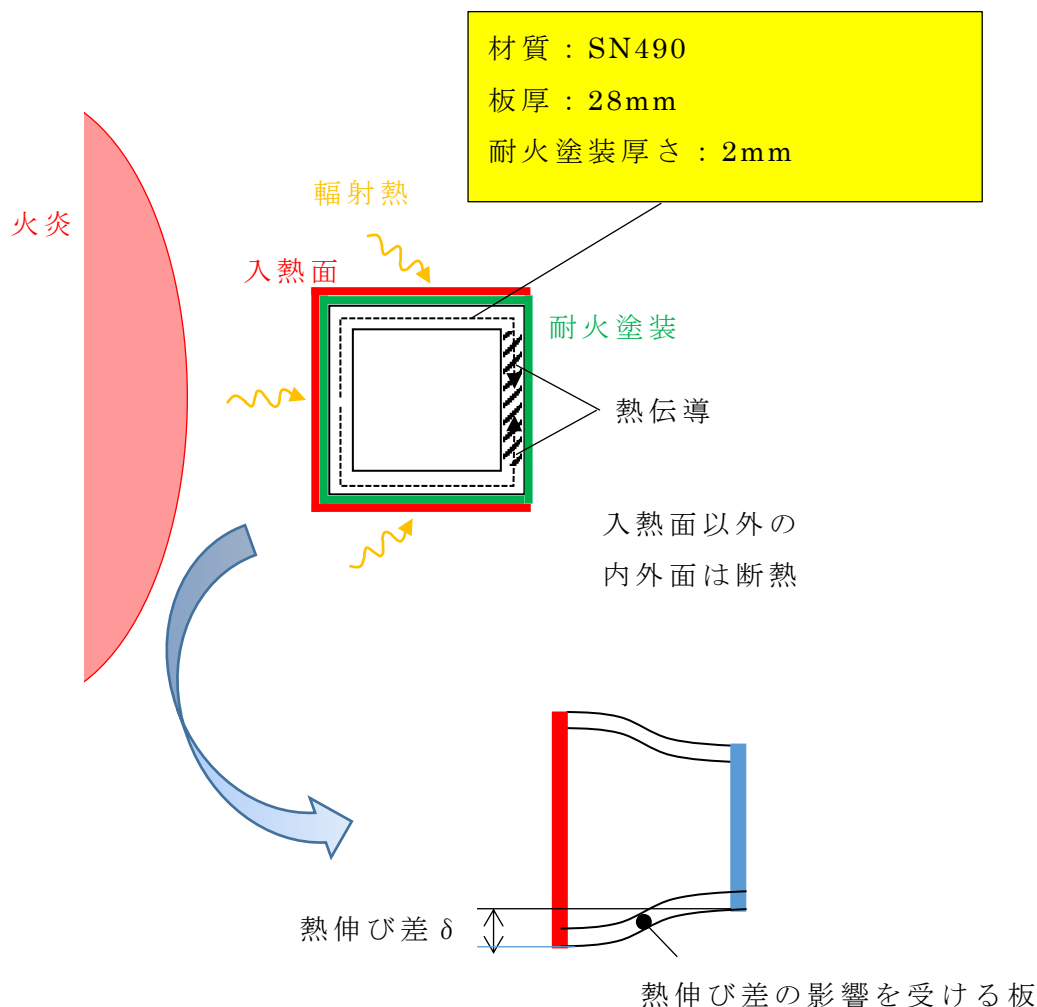


第2-4図 構造体の評価モデル

(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2-5図に示す。



第 2 - 5 図 温度評価モデル

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。

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

(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 評価条件

記号	単位	定義	数値
$T(t=0)$	°C	評価点の初期温度	29
t	sec	燃焼時間	1400
Δt	sec	時間刻み	0.001
Q	W	熱の授受量 (輻射入熱)	正面 : 574 ^{※1} 側面 : 133 ^{※2}
ρ	k g / m ³	評価点の部材の密度	7850
C_p	J / (k g K)	評価点の部材の比熱	465
V	m ³	評価点の部材の体積	7×10^{-4} ^{※3}

※1 : (輻射発散度 58000 [W/m²] × 形態係数 0.389 + 太陽輻射 400 [W/m²]) × 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。

※2 : (輻射発散度 58000 [W/m²] × 形態係数 0.085 + 太陽輻射 400 [W/m²]) × 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 : 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

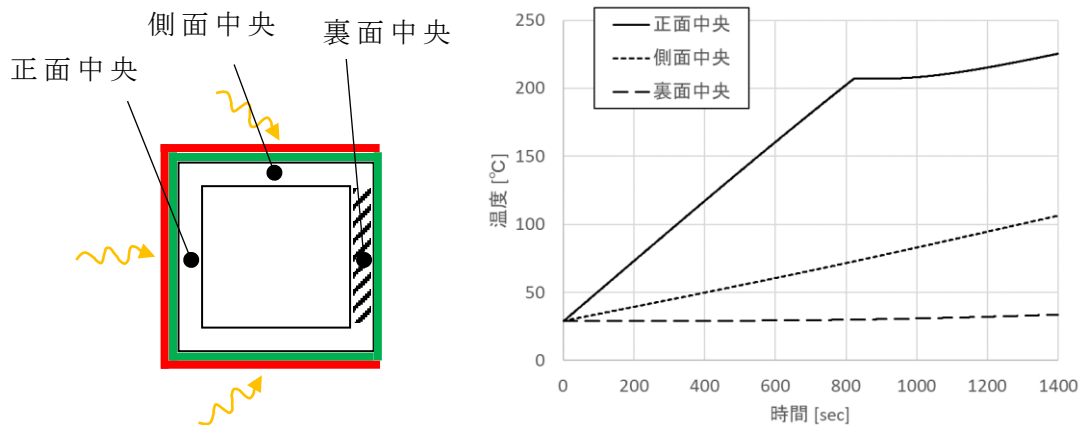
記号	単位	定義	数値
δ	m m	熱伸び差	0.65
α	1 / K	線膨張係数	1.34×10^{-5}
H	m m	角型鋼管のサイズ ÷ 2	250
E	M P a	弾性係数	205000
I	m m ⁴	板の断面二次モーメント	1829
ℓ	m m	板の長さ	500
Z	m m ³	板の断面係数	130

(4) 評価結果について

1 列目と 2 列目の 1400 秒後の部材の温度評価結果を第 2 - 7 表、第 2 - 6 図に示す。

第 2 - 7 表 部材の温度上昇結果

	温度 [°C]
正面	226
裏面	34



第 2 - 6 図 温度評価結果

熱応力評価結果を第 2 - 8 表に示す

第 2 - 8 表 評価結果

発生応力 (MPa)	許容値 (MPa)
45	325

3. 結論

評価結果から支持構造物の構造体としても、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温度差を考慮しても、構造健全性を維持できていることを確認した。

令和3年7月30日 R4

別添－8
耐火塗料の説明書

目 次

1. 耐火塗料とは	1
2. 耐火塗料の組成	1
3. 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厚の塗膜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。

耐火性能試験では、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ISO834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収縮量、最大収縮速度が基準を満たすことを確認する。

耐火塗料は、建設業界にて多数の使用実績があり、総計13,690件の使用実績がある。耐火塗料の使用実績の例を第1-1表に示す。

耐火塗料は、塗料であることから設計上の配慮事項が少なく、また施工性も優れている。

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被覆は、大臣認定を受けたもののうち、2種類の耐火被覆を用いる。耐火被覆は、耐火被覆の層だけは成り立たず、下塗り、中塗りおよび上塗りの4層で構成され、（4層を合わせて「耐火塗装」という。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。それぞれの塗料の役割は次の通りであり、組成は第2-1表に示すとおりである。

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

2種類の耐火被覆は、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-4耐火被覆厚さの設定の考え方「2. 大臣認定試験」）

なお、2種類の耐火被覆は、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。

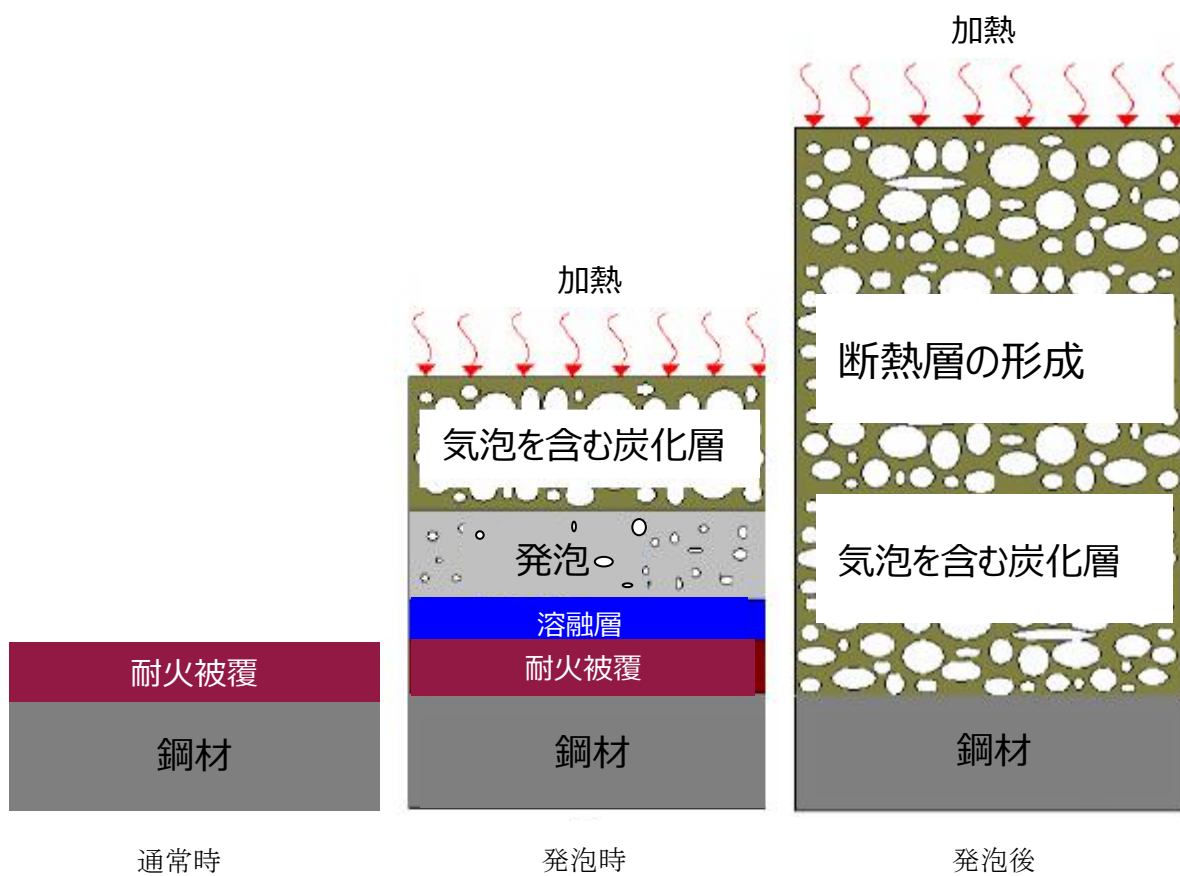
第2-1表 耐火塗料の組成

		耐火被覆A	耐火被覆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	
主材 (耐火被覆)	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

別添－9

航空機墜落火災の

温度評価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. 入熱量の比較	2
4. 判定基準の比較	3
5. まとめ	3

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。また、航空機墜落火災対策の耐火被覆厚さを設定するための被覆厚さに対する発泡後の厚さ、発泡温度及び発泡前後の熱伝導率と比熱の設定には、大臣認定試験の結果を用いている。

ここでは、大臣認定試験と温度評価（耐火被覆厚さの設定）に用いた航空機墜落火災の条件について比較する。

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。

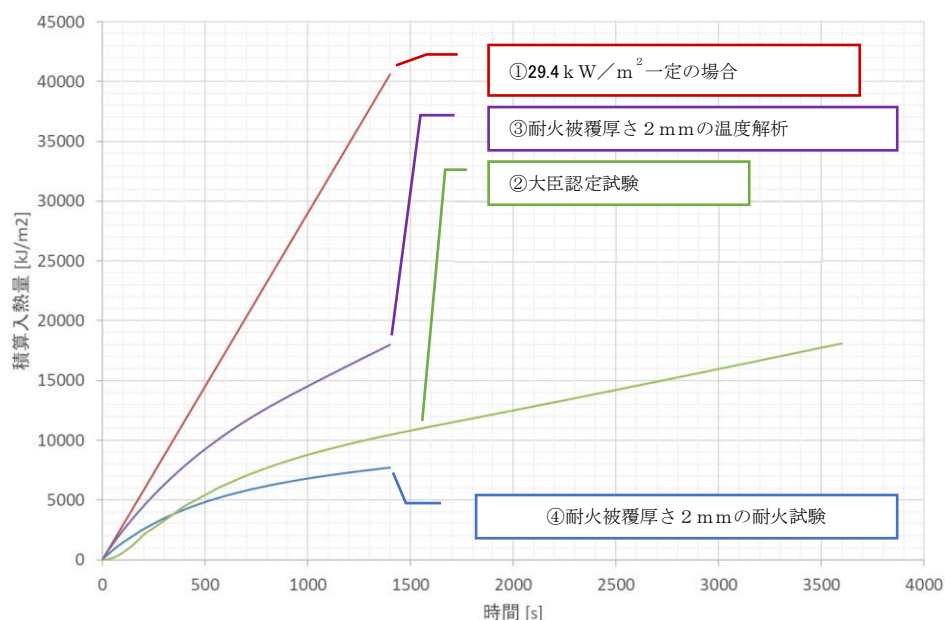
第1-1表 大臣認定試験と航空機墜落火災の条件

	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 ISO 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し、29.4kW/m ² 相当の輻射により加熱
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。

3. 入熱量の比較

大臣認定試験と航空機墜落火災の加熱条件の比較をした結果を第1-1図に示す。また、参考として 29.4 kW/m^2 の一定入熱及び当社が実施した耐火試験における入熱量についても参考に図中に示す。

分類		備考
①	29.4 kW/m^2 の一定入熱	放熱なし
②	大臣認定試験	全面入熱
③	耐火被覆の厚さ 2 mm の温度解析	放熱なし
④	耐火試験	放熱あり



第1-1図 入熱量の比較

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。

耐火被覆の厚さ 2 mm に対する温度評価においては、上記物理現象を考慮し、初期に約 29.4 kW/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ている (③)。温度評価 (③) の入熱量と大臣認定試験 (②) の入熱量を比較した場合、温度評価における $1,400$ 秒後と大臣認定試験の $3,600$ 秒後の時点において、両者の入熱量はほぼ等しいことが確認できる。したがって、温度評価の結果から耐火被覆厚さを設定することは概ね妥当であると考えられる。

一方、外部火災ガイドにおいて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、 29.4 kW/m^2 の一定入熱が与えられることを想定している (①)。

なお、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 29.4 kW/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 29.4 kW/m^2 よりも低下する。

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°C 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°C 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. の結果からすると、大臣認定試験と航空機墜落火災の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といえる。

令和3年7月30日 R5

別添－10
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。
	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。

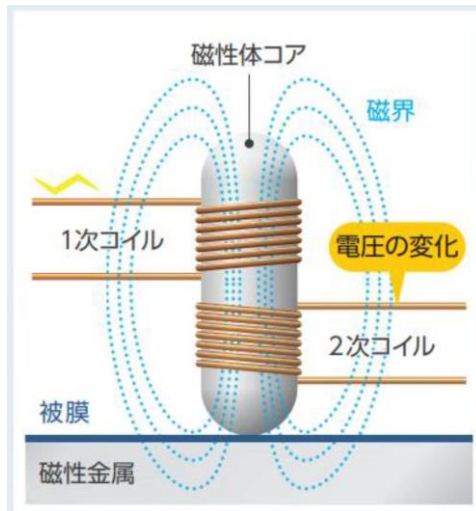
主材被覆厚は下塗りを差し引いた値であり、その値が管理値に達していない場合は主材を再度塗布する。

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、コイルの磁束数に変化し、コイル両端にかかる電圧が変化する。この電圧変化を電流値から読み取り、被覆厚に換算する。



第 1 - 1 図 耐火被覆厚さの測定原理

(3) 耐火被覆厚さの測定管理について

a. 管理単位

鉄骨・防護板部材の被覆厚さの管理は部材毎とし，耐火被覆面積が 8 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にて測定できるように，部材毎に起点を定めそこから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7月30日 R5

別添－11
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

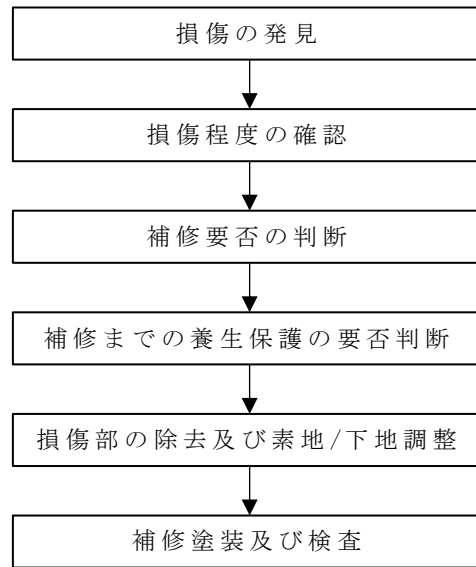
再処理施設は，寒冷地・塩害地域に設置しているため，地域特有の劣化が生じるのか耐火塗装の寒冷地・塩害地域での施工実績を確認した。確認の結果，施工後における塗膜劣化の事例は確認できないことから寒冷地と塩害地域特有の影響は生じないと考えられるため，寒冷地と塩害地域を限定とした特別な点検は不要と考えられる。

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。

外外火 04-別添 11-7

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	<u>7/30</u>	<u>3</u>	
別紙-2	安全冷却水 B 冷却塔の評価書	<u>7/30</u>	<u>2</u>	
別紙-3	安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネットの評価書	<u>7/30</u>	<u>4</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7月30日 R3

別紙-1

燃料加工建屋の評価書

目 次

1. 評価条件	1
2. 評価結果	1
2.1 外壁温度評価結果.....	1
2.2 建屋内に収納する外部火災防護対象施設への影響.....	2
2.3 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.....	2
2.3.1 建屋外壁への要求機能の確認結果.....	2
2.3.2 建屋全体の支持機能について.....	4
3. 参考文献	5

1. 評価条件

燃料加工建屋外壁に対する熱影響評価の計算条件を第 1-1 表に示す。

第 1-1 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 ⁽¹⁾	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 ⁽¹⁾	J/kg・K

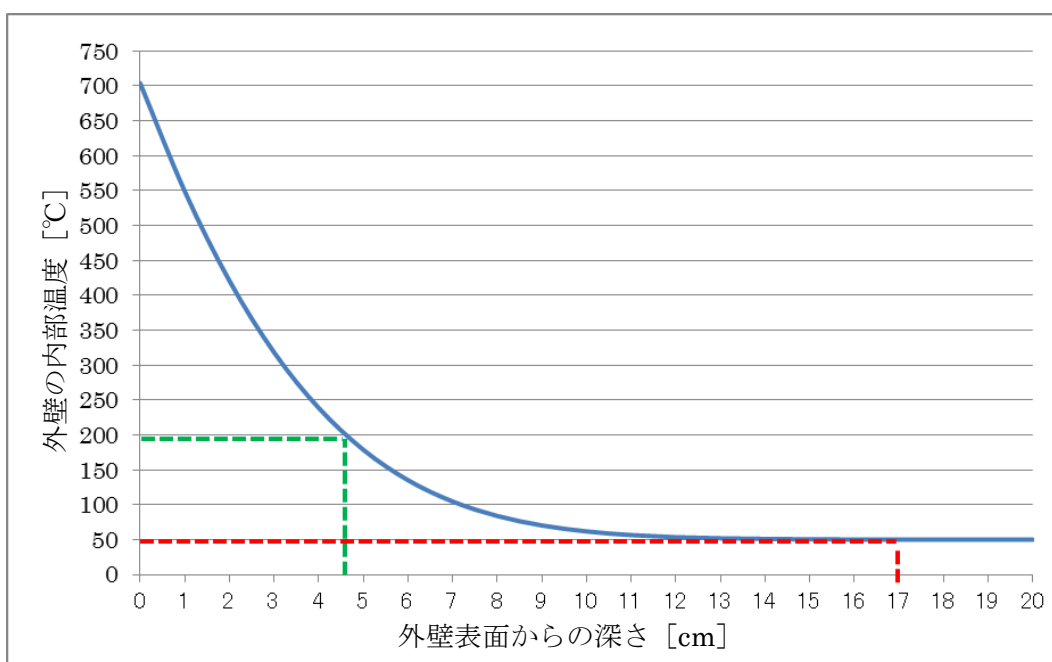
- 1) : 初期温度は、評価が厳しくなるように、屋内最高温度及び外気温度を踏まえ設定。
- 2) : 太陽光の入射を考慮し、0.4kW/m²を加算。
- 3) : 遮蔽設計の最小値

2. 評価結果

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」に示す評価方法及び本別紙「1. 評価条件」の評価条件に基づき、本別紙「2.1 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。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「2.2 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。また、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「2.3 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。

2.1 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 2-1 図に示す。



第 2-1 図 燃料加工建屋外壁を対象とした熱影響評価結果

2.2 建屋内に収納する外部火災防護対象施設への影響

第 2-1 図に示す通り、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。

2.3 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 2-1 図に示す通り、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⁽²⁾以上となる。日本建築学会「建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説」及び「構造材料の耐火性ガイドブック」を参考に鉄筋コンクリートの影響を想定すると、外壁の表層部分のコンクリートひび割れ、外壁表面から深さ約 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⁽³⁾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と想定される。

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ばない。

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。

2.3.1 建屋外壁への要求機能の確認結果

上記 2.3 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 2-1 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 2-1 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 [※] が確保できること(建屋内の壁等も含めた最小壁厚 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。

※：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⁽⁴⁾

2.3.2 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。

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

<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^2 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^2 ）⁽⁵⁾

上記の内容に基づき実施した評価結果を第 2-2 表に示す。

第 2-2 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。

3. 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) 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.
- (3) 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.
- (4) 核燃料物質加工事業変更許可申請書 (MOX燃料加工施設) (令和 2 年 9 月 18 日補正)
- (5) 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3年7月30日 R2

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 遮熱板の構造図	9
4. 評価方針について	10
4. 1 冷却水の評価条件	10
4. 2 ファン駆動部, 管束・配管の評価方針	12
4. 2. 1 減速機の評価方針	12
4. 2. 2 原動機の評価方針	15
4. 2. 3 ファンの評価方針	17
4. 2. 4 チューブサポートの評価方針	20
4. 2. 5 その他の部材	21
4. 3 支持構造物の評価方針	22
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	23
6. 1 冷却水の評価条件	23
6. 2 ファン駆動部, 管束・配管の評価条件	23
7. 評価結果	27
7. 1 冷却水の評価結果	27
7. 2 冷却機能に必要な部位の評価結果	27
7. 2. 1 減速機の評価結果	27
7. 2. 2 原動機の評価結果	27
7. 2. 3 ファンの評価結果	29
7. 2. 4 チューブサポートの評価結果	29
7. 2. 5 その他の部位の評価結果	29
7. 3 支持構造物の評価結果	30

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		冷却塔の冷却能力
管束・配管		冷却塔の冷却能力
ファン駆動部		冷却塔の冷却能力
支持架構		支持構造物

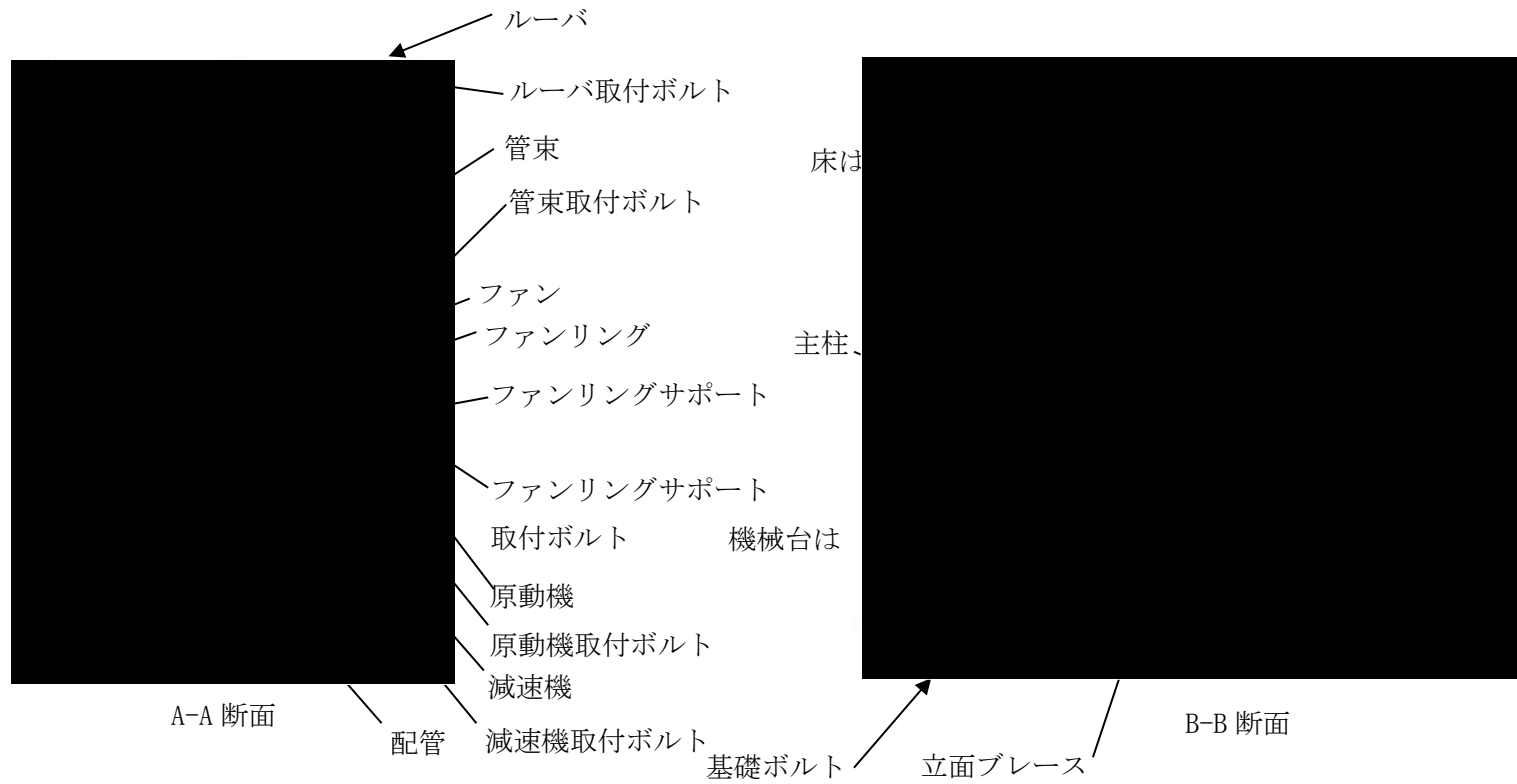
■ については商業機密の観点から公開できません。



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*		○	

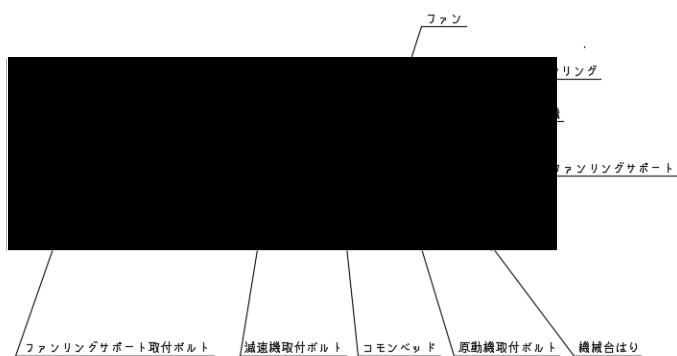
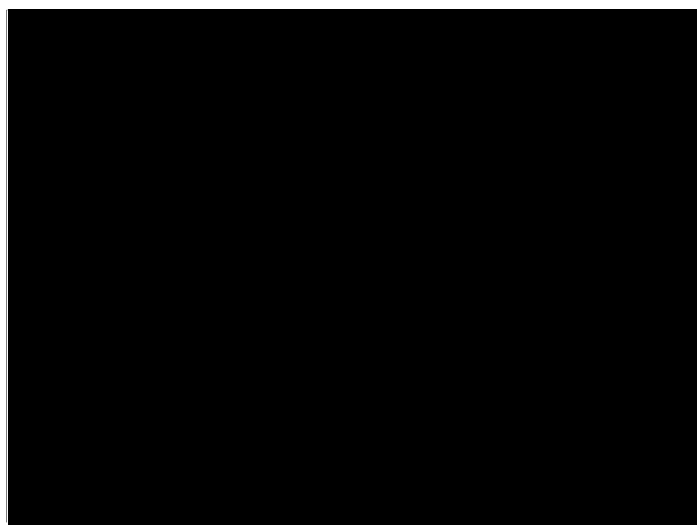
※ [Redacted]
[Redacted]
[Redacted]

(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]
[Redacted]

(4) 支持架構

[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。

対策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
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	○	
	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	○	
	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 > ○ : 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。



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。

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

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。

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

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

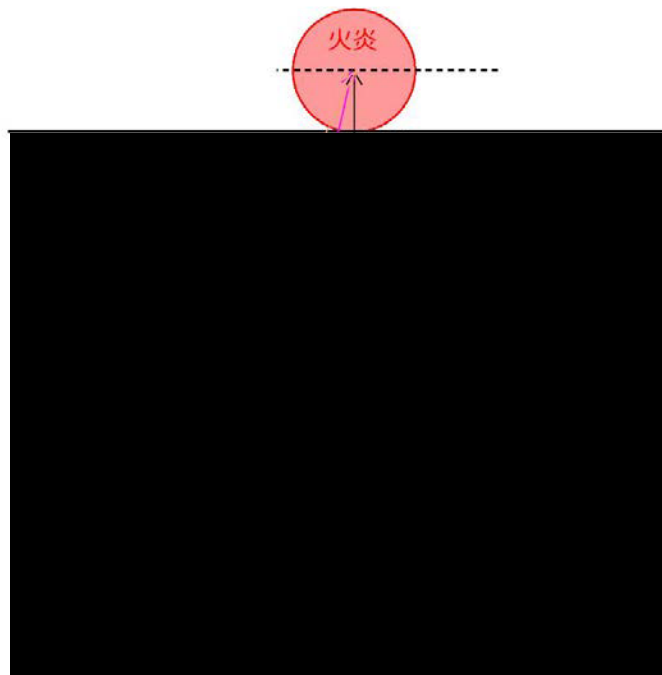
ここで、

ϕ ：形態係数

L：離隔距離(m)

H：火炎の高さ(m)

R：燃焼半径(m)



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 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(伝熱工学資料改訂第5版, p.40, 式(131))により算出する。

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

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)

ρ : 冷却水密度 (kg/m^3)

C_p : 冷却水比熱 ($J/kg \cdot K$)

4. 2 ファン駆動部, 管束・配管の評価方針

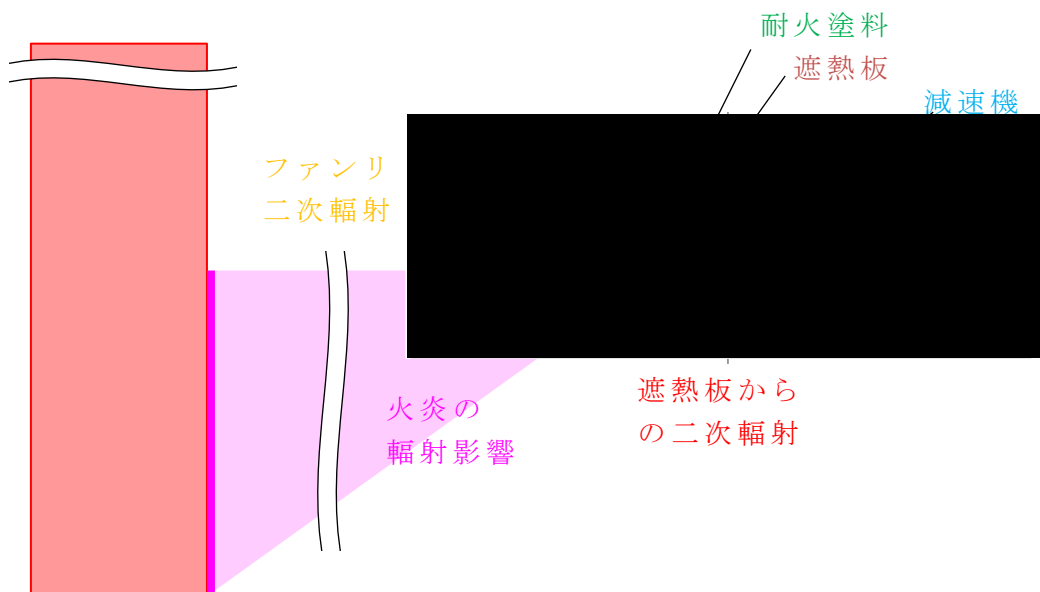
4. 2. 1 減速機の評価方針

(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, 遮熱板からの間接的な熱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 減速機が受ける輻射熱

それぞれの輻射熱について, 以下の通り形態係数を算出する。

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。

② ファンリングからの二次輻射

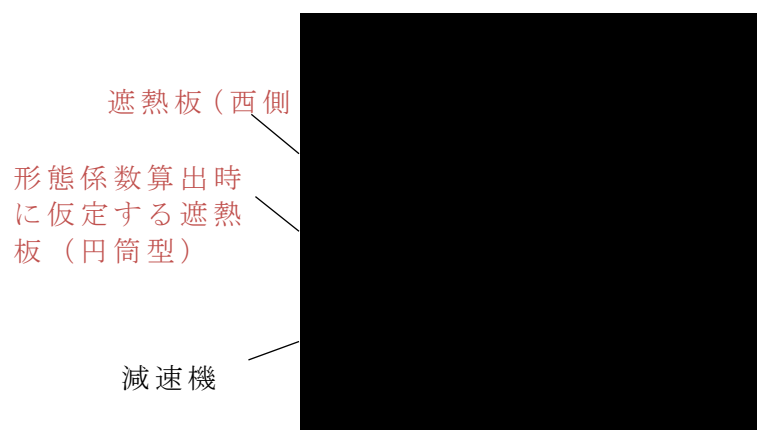
ファンリングの昇温は火炎側だけで生じるが, 本評価では保守的に全周からの二次輻射を考慮するものとする。さらに, 第4-3図

■ については商業機密の観点から公開できません。

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。

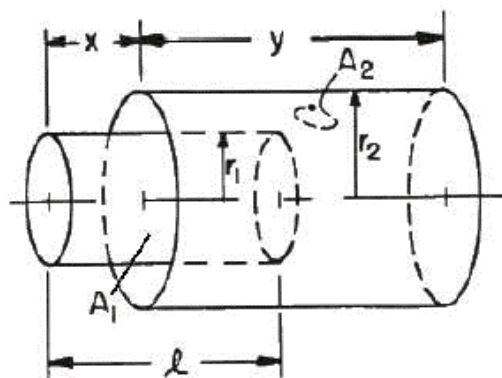
③ 遮熱板－減速機

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]

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

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

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

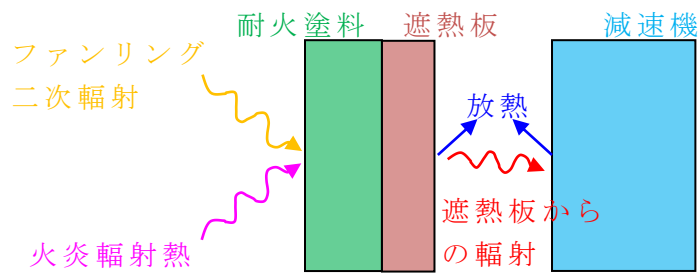
$$F_{1-2} = \frac{X}{L} F_X + \frac{L-X}{L} (1 - F_{L-X}) + \frac{Y+X-L}{L} F_{Y+X-L} - \frac{X+Y}{L} F_{X+Y}$$

第4-4図 二重円筒の形態係数 (John R. Howell, A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors, 3rd Edition より)

(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4-5図 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 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]

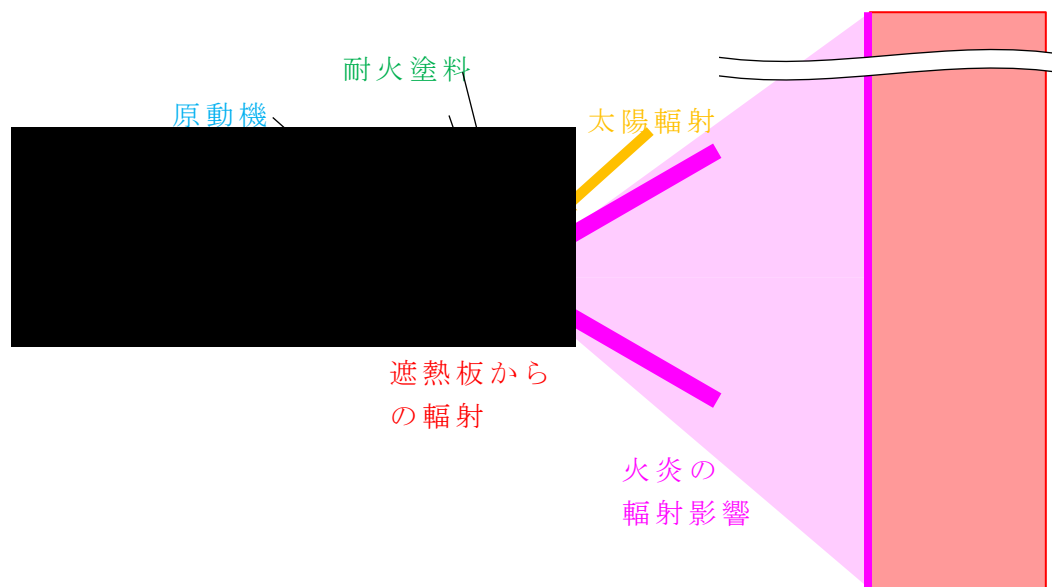
4. 2. 2 原動機の評価方針

(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，遮熱板からの間接的な熱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

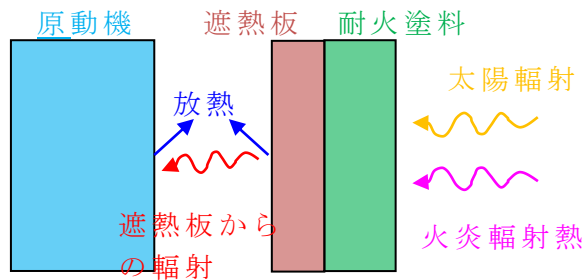
入熱が大きくなるよう形態係数は $F_p = 1$ とする。

(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（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 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]

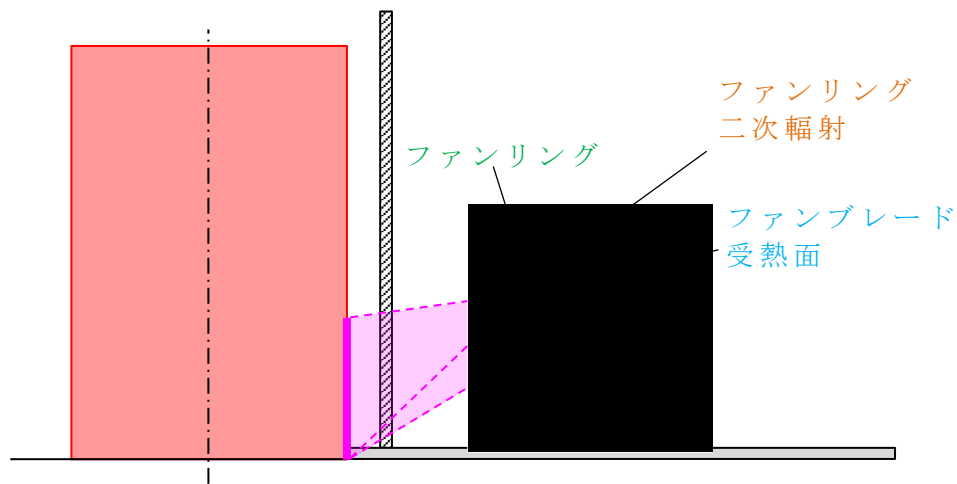
4. 2. 3 ファンの評価方針

(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被覆を施工したファンリングがあり，その効果によりファンブレードは下方から火炎の輻射熱のみを受ける。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

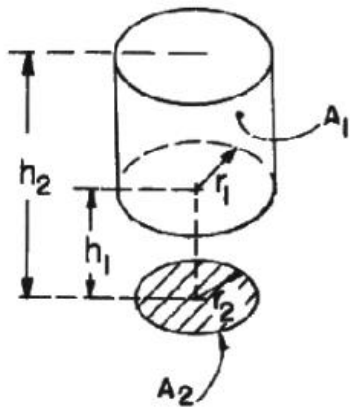
ファンリングの昇温は火炎側だけで生じるが、本評価では保守的に全周からの二次輻射を考慮するものとする。この場合、第4-9図に示す円筒内面と円盤面の計算モデルにおいて、円筒をファンリング、円盤をファンブレードと考え、形態係数を算出する。

(3) 温度評価

評価モデルを第4-10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■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。



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

$$H_2 = h_2/r_2$$

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

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]

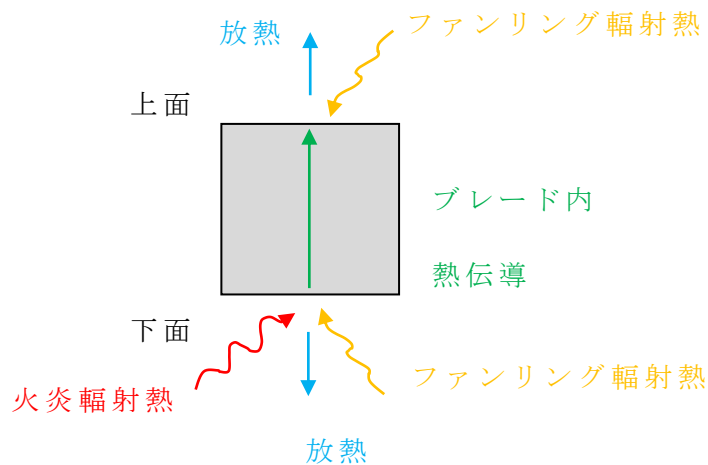
$$F_{1-2} = \frac{1}{4R(H_2 - H_1)} \left[(X_1 - X_2) - (X_1^2 - 4R^2)^{1/2} + (X_2^2 - 4R^2)^{1/2} \right]$$

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 - 9 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 - 10 図 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 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]

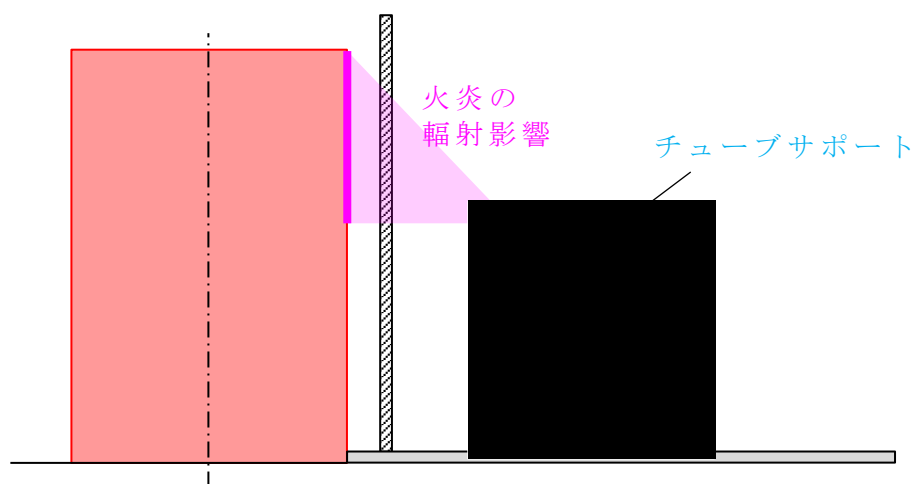
4. 2. 4 チューブサポートの評価方針

(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(伝熱工学資料改訂第5版, p.23, 式(1))により算出する。

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

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, ファン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
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、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。

■については商業機密の観点から公開できません。

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以下に示す。

第6-1表 対象航空機，燃焼面積及び燃焼半径

対象航空機	燃焼面積 (m^2)	燃焼半径 (m)
F-16	約 90	5.4

第6-2表 形態係数及び輻射強度の算出結果

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

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 (kg/m^3)	1,040
冷却水比熱 ($J/(kg \cdot K)$)	3,700

6. 2 ファン駆動部，管束・配管の評価条件

減速機の評価条件を第6-4表，原動機の評価条件を第6-5表，ファンの評価条件を第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 減速機の評価条件

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 ^{※1}		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 ^{※2}	kg/m ³	7850
	比熱 ^{※2}	J/(kg-K)	465
	熱伝導率 ^{※2}	W/(m-K)	43
	厚み	m	0.006
減速機	重量	kg	■■■■
	比熱 ^{※2}	J/(kg-K)	
	入・放熱面積	m ²	

※ 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.284, S35C 300K の値

■■■■ については商業機密の観点から公開できません。

表 6 - 5 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 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) ※ ¹		W/(m ² -K)	12
放熱の熱伝達率 (運転中)		W/(m ² -K)	14(遮蔽板)※ ² 21(原動機)※ ³
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	

※ 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 : 伝熱工学資料改訂第 5 版, p.34, 式(55), から, 風速 7.16m/s, 代表径 d=0.5m を用いて算出。

■■■■ については商業機密の観点から公開できません。

表 6 - 6 ファンの評価条件

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※ ¹		W/(m ² -K)	17
初期・雰囲気温度		°C	29
ファンブレード ■	密度※ ²	kg/m ³	■
	比熱※ ²	J/(kg-K)	
	熱伝導率※ ²	W/(m-K)	
	厚み	m	

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

表 6 - 7 チューブサポートの評価条件

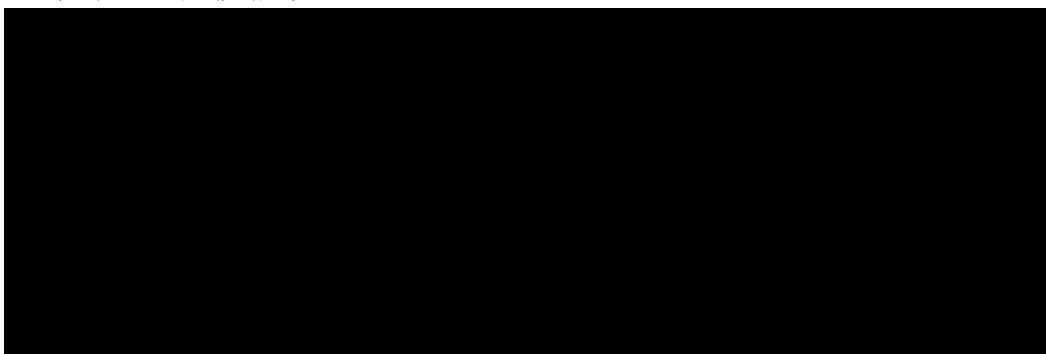
パラメータ	単位	値
火炎の輻射発散度	W/m ²	58000
太陽の輻射熱	W/m ²	400
形態係数	-	0.086
放熱の熱伝達率※ ¹	W/(m ² -K)	17
雰囲気温度	°C	29

※ 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

■ 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

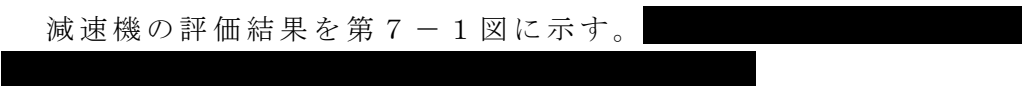
7. 1 冷却水の評価結果



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

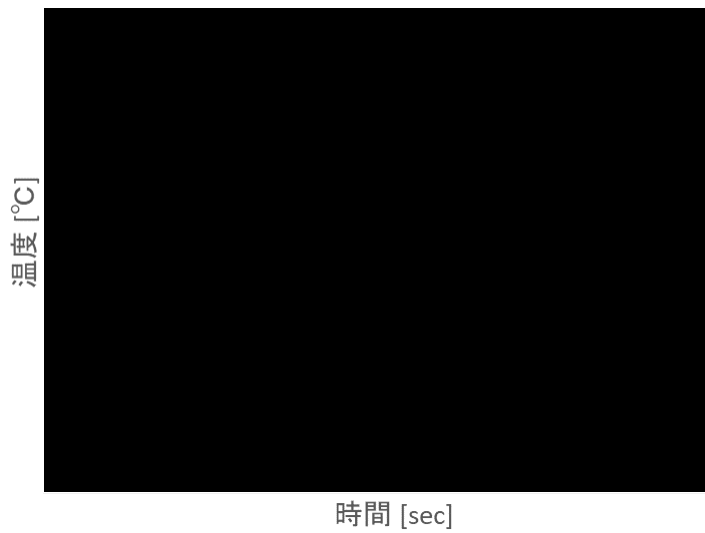
原動機の評価結果を第7-2図，第7-3図に示す。



■ 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)

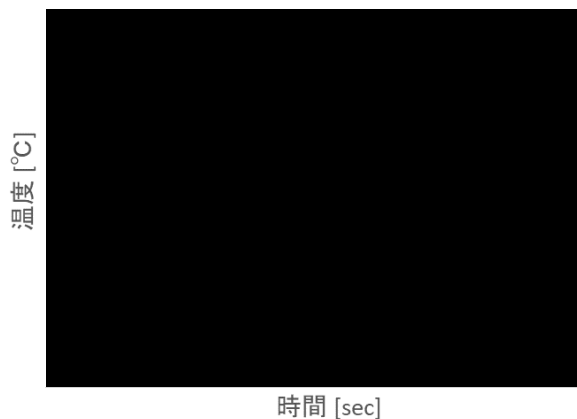


第 7 - 3 図 原動機の評価結果 (運転中)

■ については商業機密の観点から公開できません。

7. 2. 3 ファンの評価結果

ファンの評価結果を第7-4図に示す。



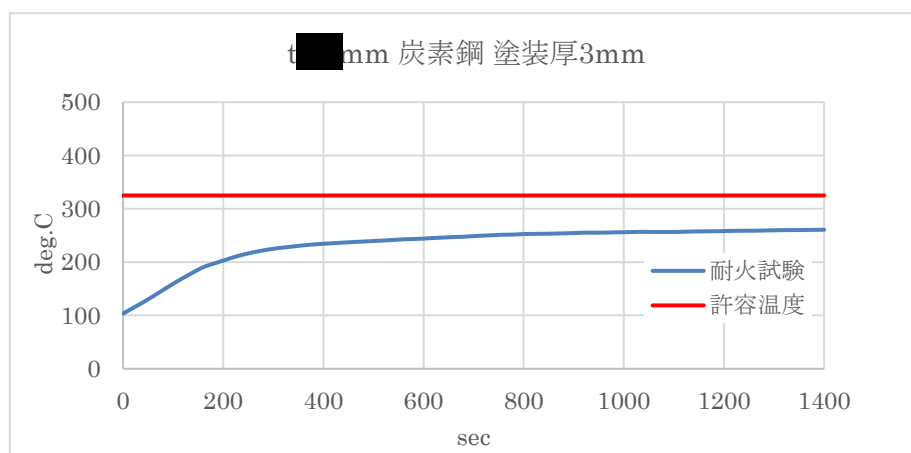
第7-4図 ファンの評価結果

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

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。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。



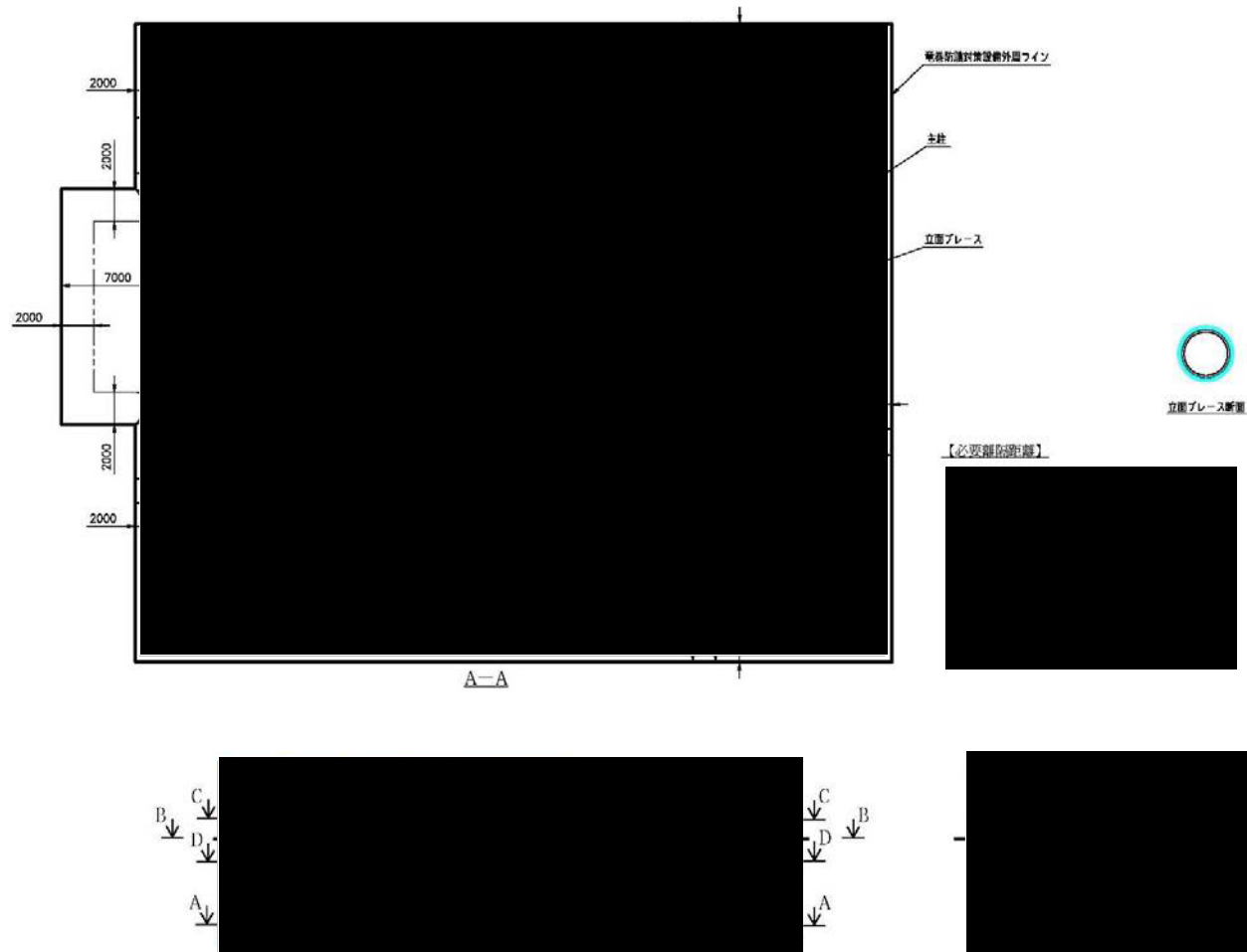
第7-5図 t mm 炭素鋼 耐火塗装厚 3 mm の耐火試験結果

については商業機密の観点から公開できません。

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。



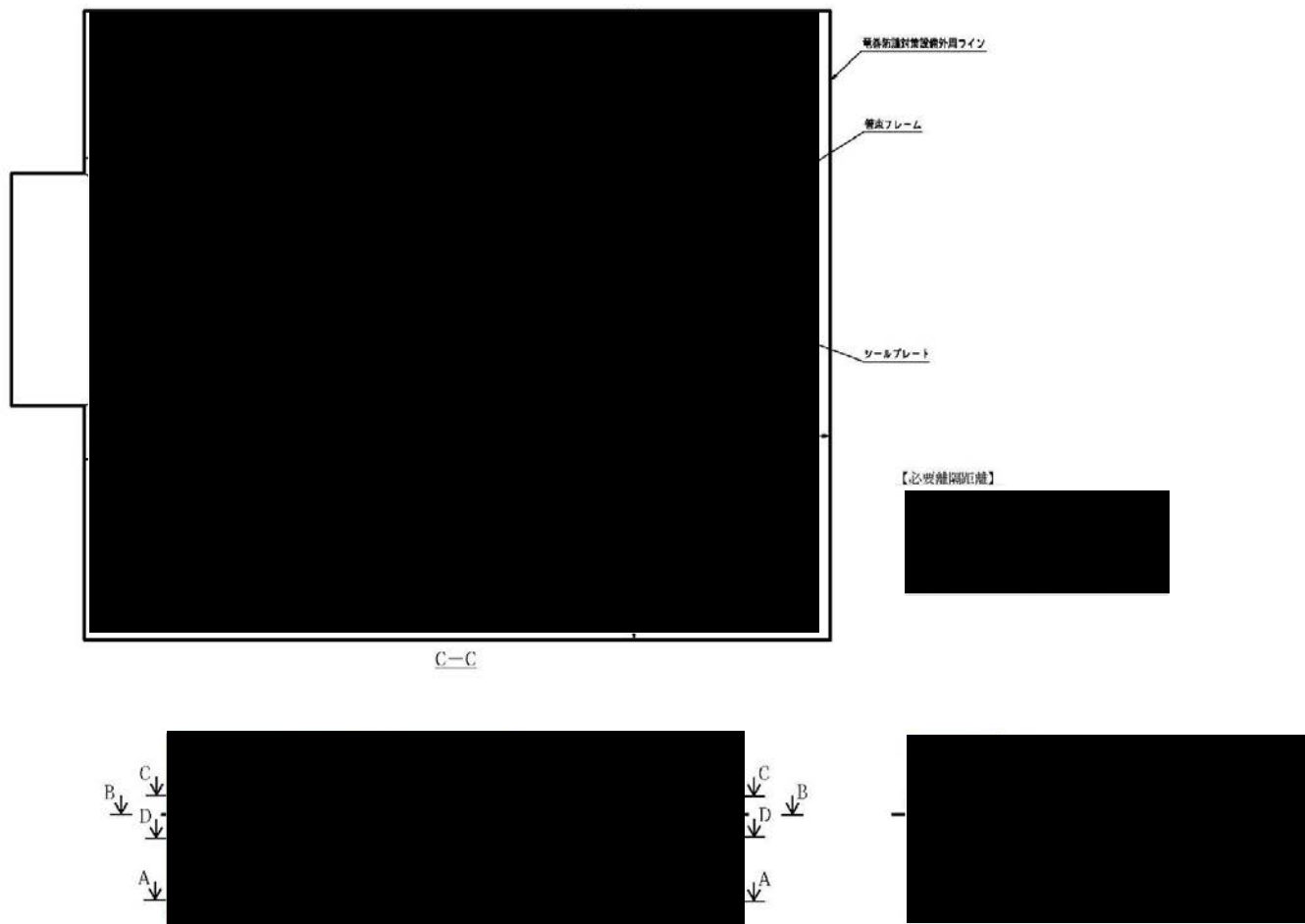
第 7 - 6 図 冷却塔の耐火被覆範囲図 (1 / 2)

■ については商業機密の観点から公開できません。



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7月30日 R4

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

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。

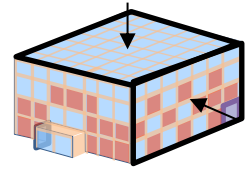
また、本資料は、第1回申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・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

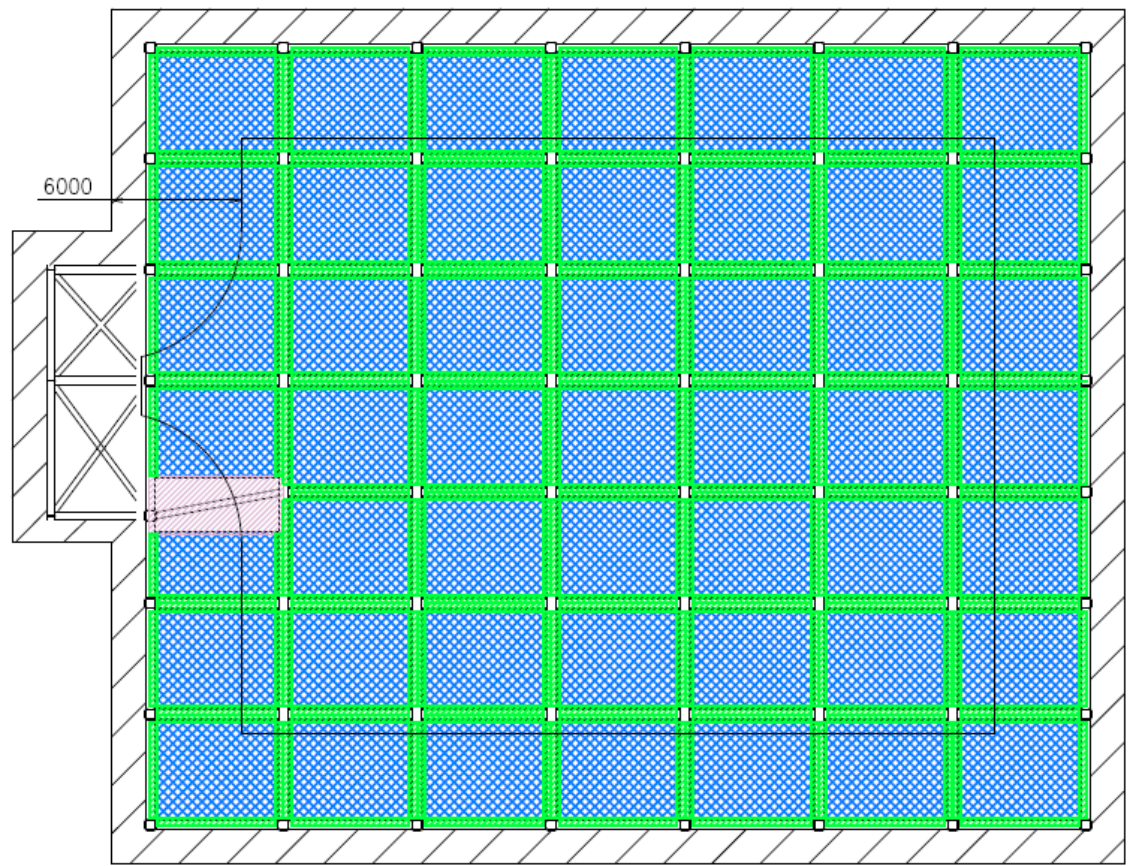
飛来物防護ネットは、竜巻襲来時に安全冷却水B冷却塔に飛来物が衝突することを防止するための設備であり、竜巻襲来時にその機能を求められることとなる。そのため、航空機墜落火災においては、飛来物の衝突を考慮する必要がないことから、安全冷却水B冷却塔へ波及的影響を及ぼさないことが求められる。安全冷却水B冷却塔へ波及的影響を及ぼさないために必要な部位と評価対象部位を抽出する。

飛来物防護ネットの概要図を第2-1図に示す。

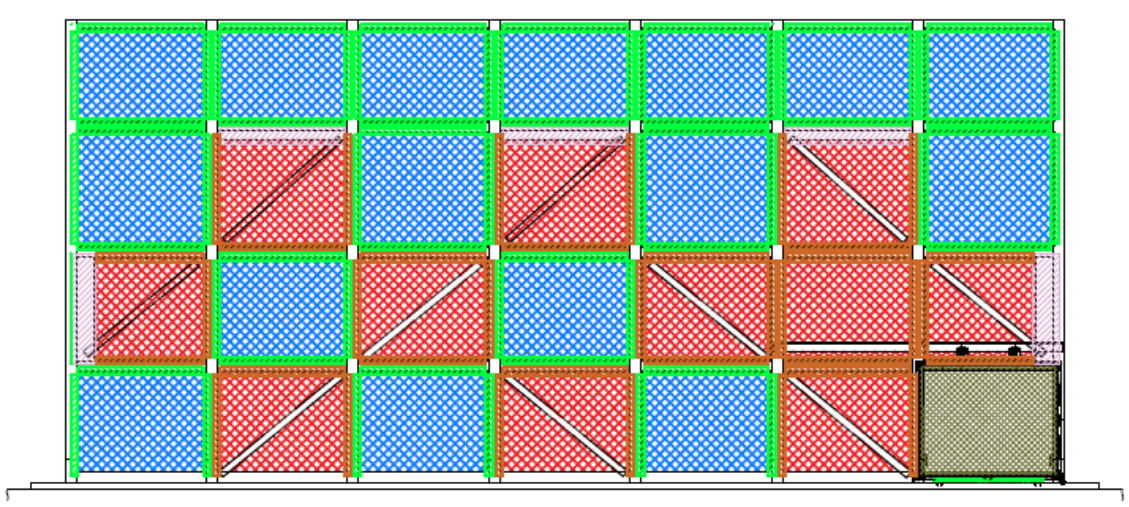


【凡例】

- : 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)

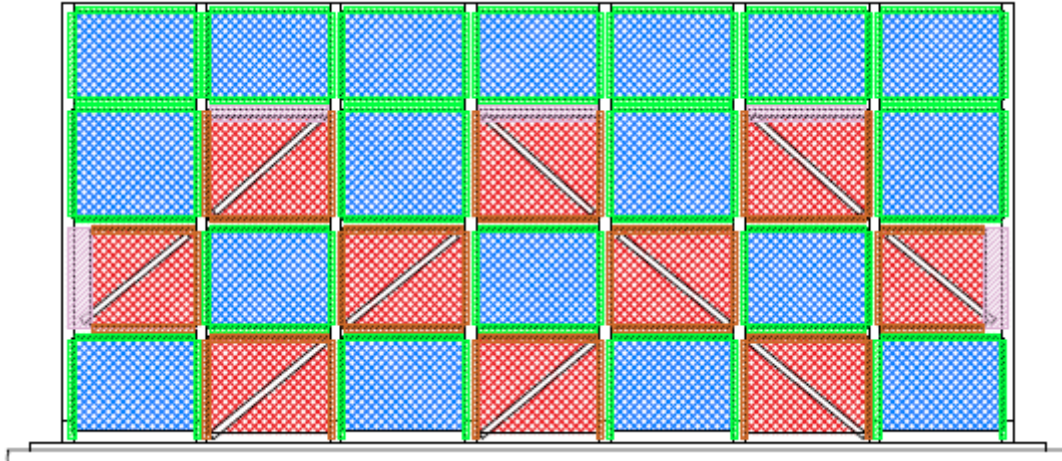
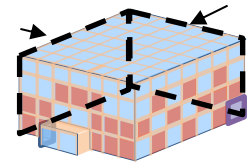


(南面)

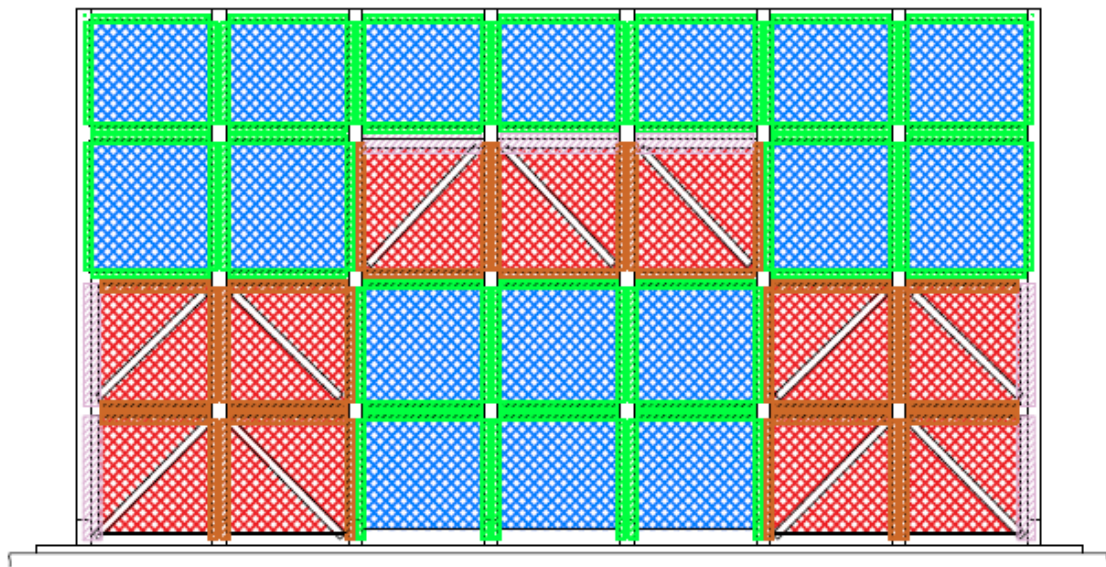
第 2 - 1 図 飛来物防護ネットの概要図 (1 / 3)

【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)

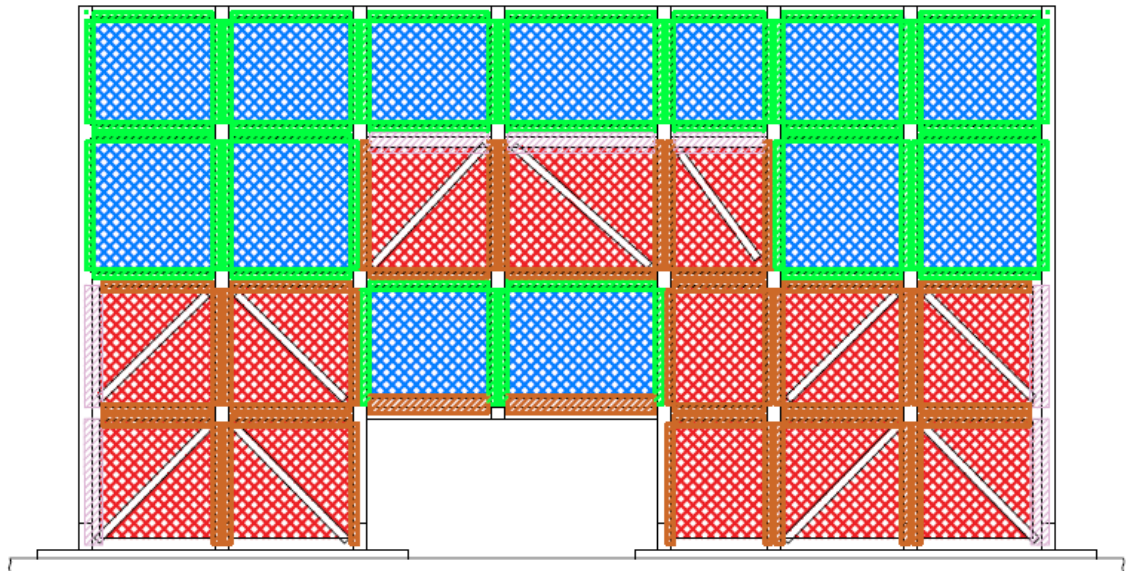
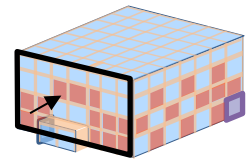


(東面)

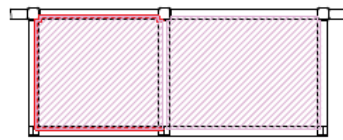
第 2 - 1 図 飛来物防護ネットの概要図 (2 / 3)

【凡例】

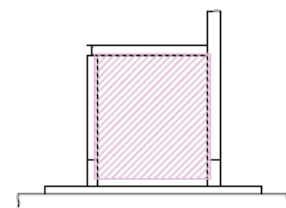
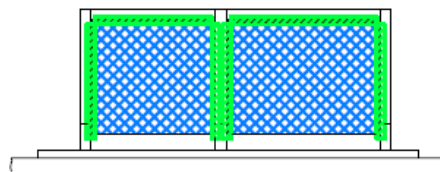
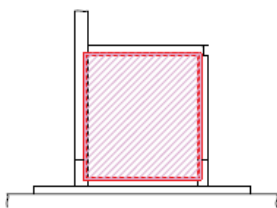
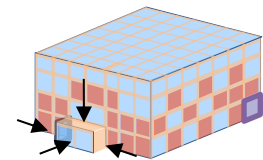
- : 外張りネット
- : 内張りネット
- : 防護板
- : 補助防護板（外取付）
- : 補助防護板（内取付）



(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。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。 また、 <u> </u> 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枠防護ネットを吊り下げて、 <u> </u> 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、 <u> </u> 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冷却塔のへ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、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。

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	○	飛来物防護ネットは、 <u>至近</u> で航空機墜落火災が生じることから、 <u>耐火被覆</u> を施工する。 塗装範囲は離隔距離表を用いて設定する。 塗装後の支持架構が許容温度内であることを、 <u>離隔距離表</u> および <u>温度評価</u> にて確認する。
	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	○	飛来物防護ネットは、 <u>至近</u> で航空機墜落火災が生じることから、 <u>耐火被覆</u> を施工する。 塗装範囲は離隔距離表を用いて設定する。 塗装後の <u>鋼板</u> が許容温度内であることを、 <u>温度評価</u> 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

火炎から生じる輻射を受け、支持架構を構成する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、直近の部材は耐火被覆 2 mm 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を構成する部材が許容温度内であることを、耐火試験にて確認する。

飛来物防護ネットの支持架構を構成する部材のうち、最小板厚は、プレス材（板厚 8 mm）であり、本部材については、代表部材より薄いため、耐火被覆 2 mm を施工し、許容温度を満足していることを確認する。

(2) 構造健全性評価

外部火災防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設である飛来物防護ネットは、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、支持架構は構造健全性を確保していることを評価する。

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

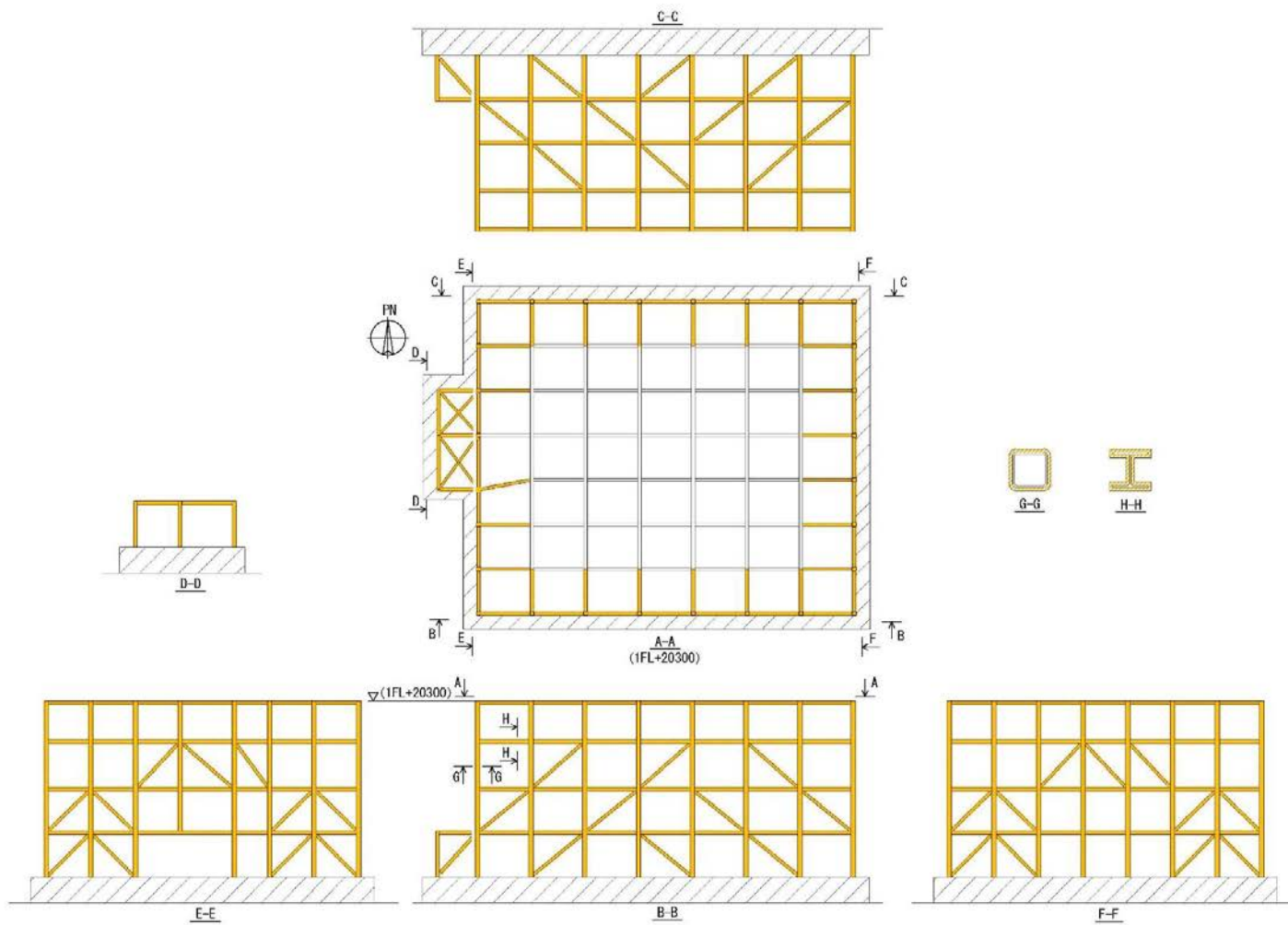
(1) 温度評価

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。また、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、機能に影響する部材は耐火被覆を施工しないことから、施工外となる防護ネット取付金物周辺の塗装範囲および防護ネット（車両用扉）周辺の塗装範囲を第 4-3 図、第 4-4 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。

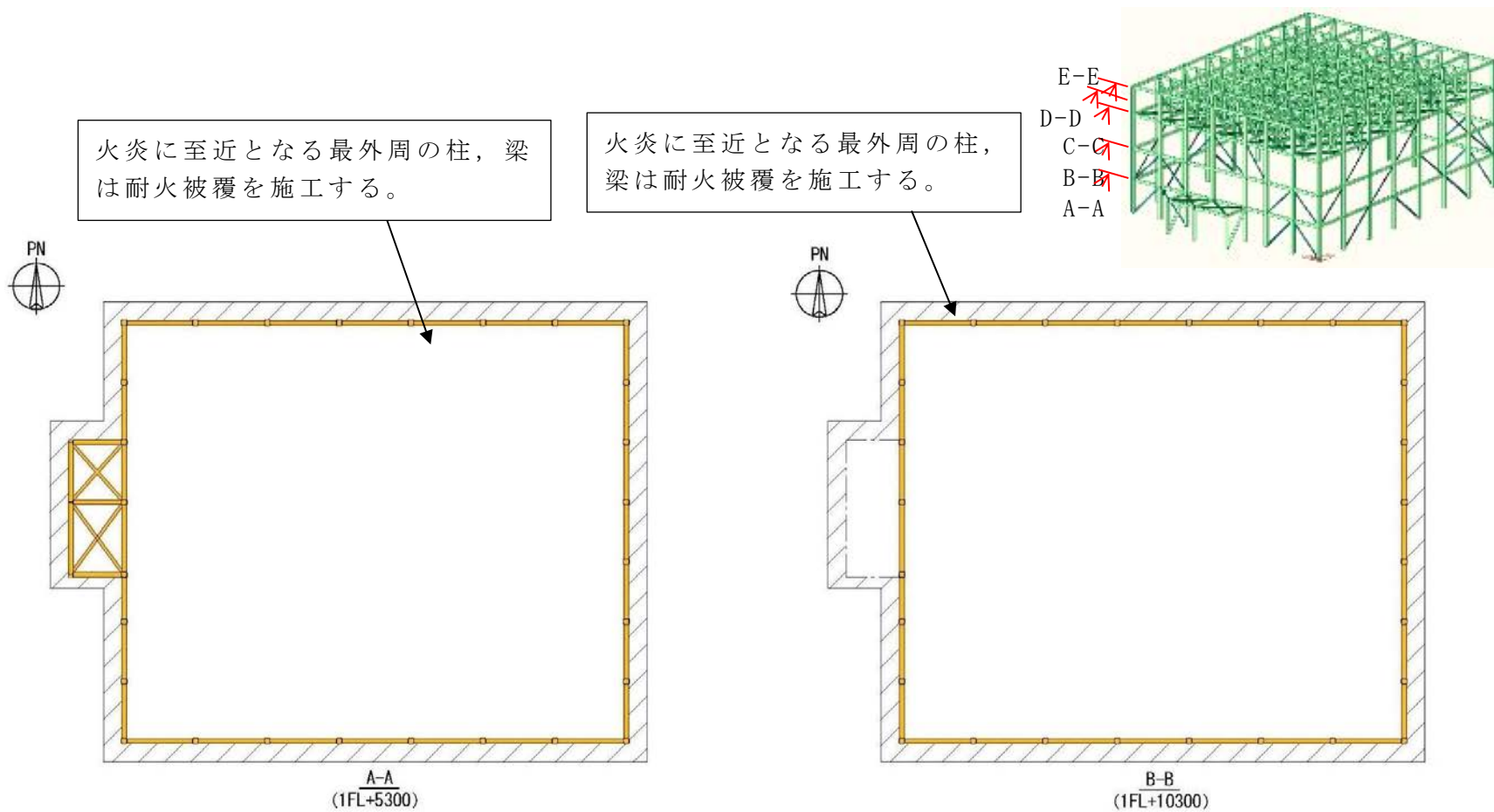
耐火被覆を施工する部材のうち、最小板厚はプレス材の板厚 8 mm（H鋼）である。そのため、本部材を包絡する耐火試験結果を第 4-5 図に示す。試験結果より、許容温度内であることを確認した。

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る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。



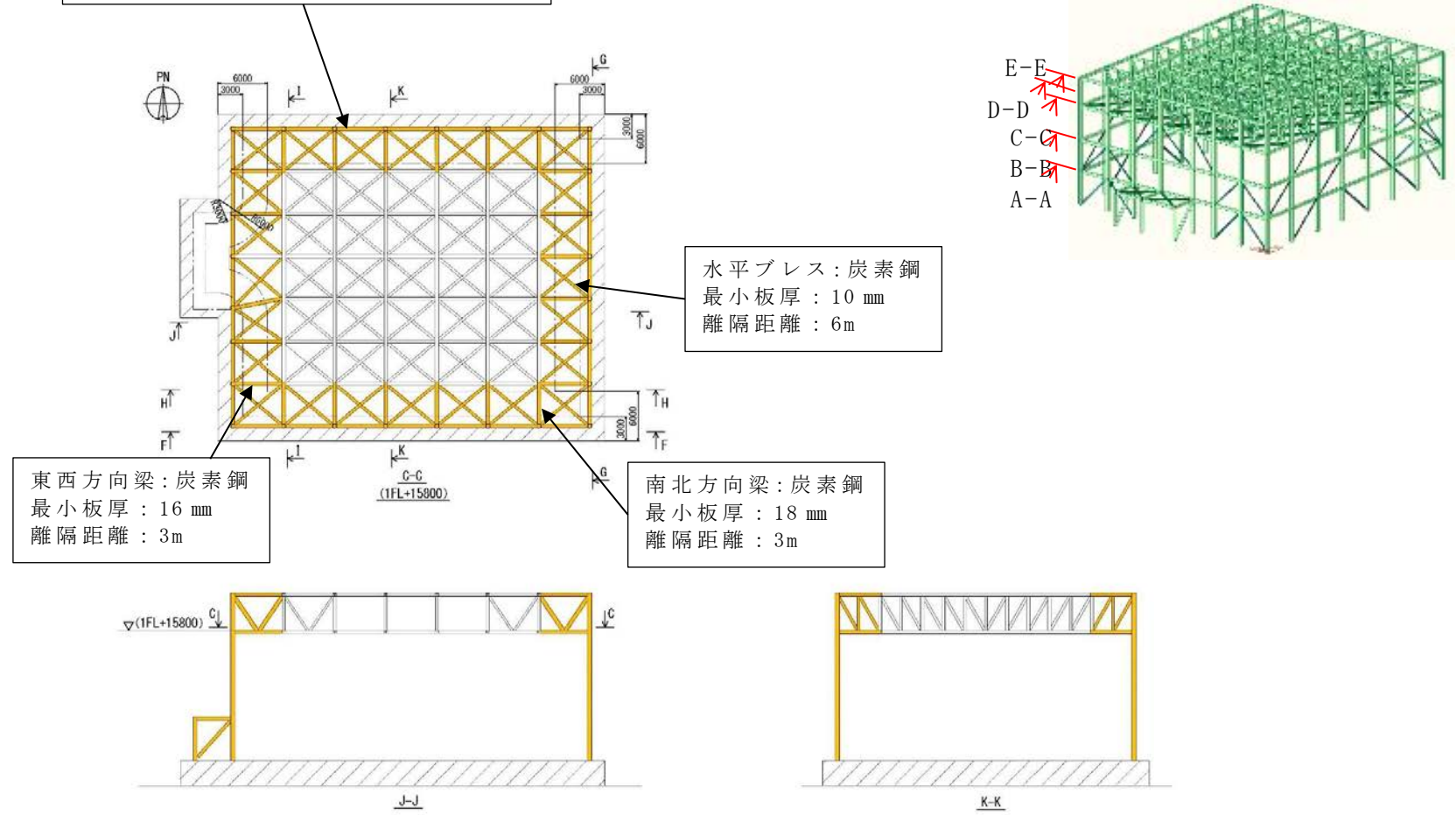
第 4 - 1 図 飛来物防護ネットの耐火被覆施工範囲図 (1 / 4)

外外火 04-別紙 3-8

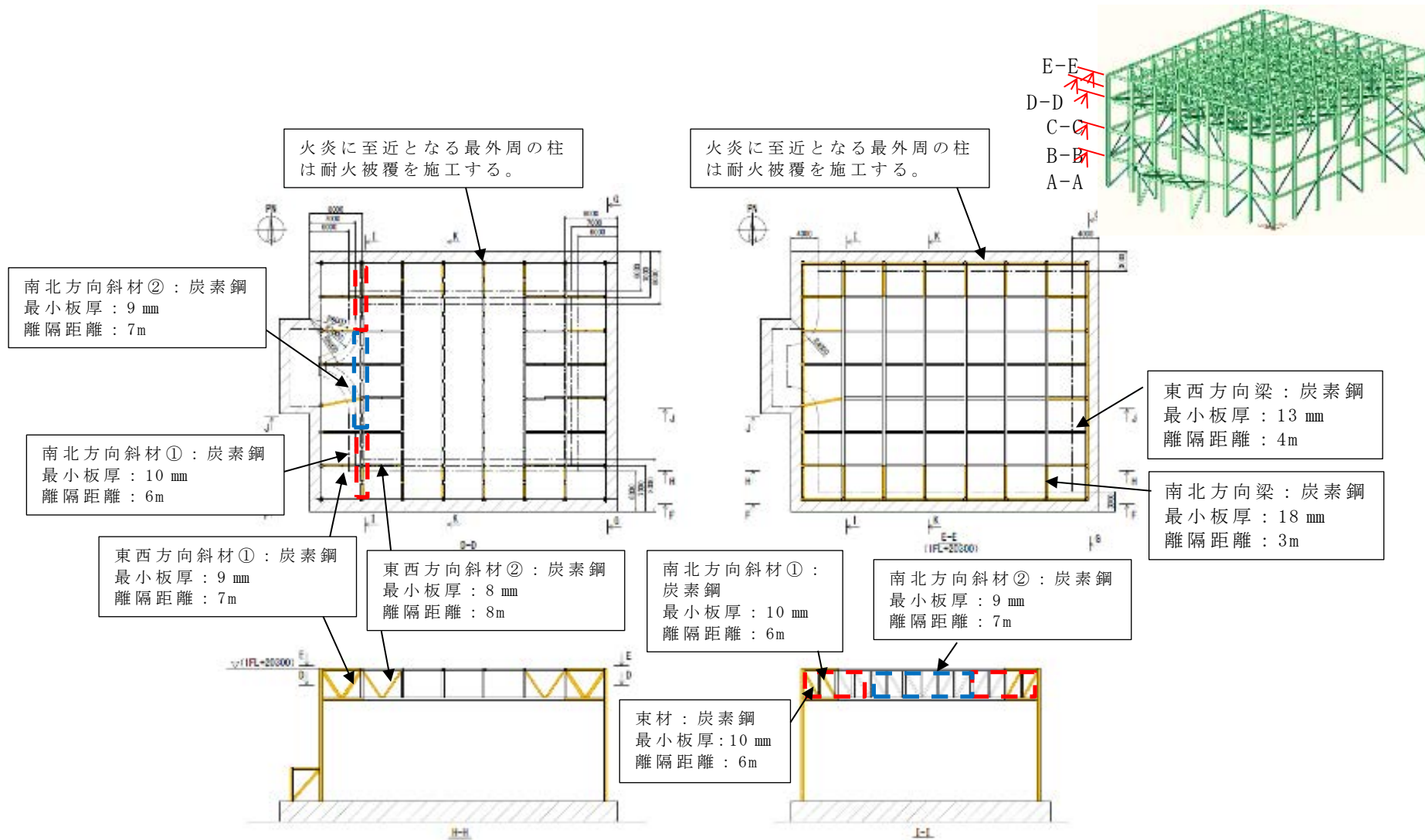


第 4 - 1 図 飛来物防護ネットの耐火被覆施工範囲図 (2 / 4)

火炎に至近となる最外周の柱, 梁は
耐火被覆を施工する。










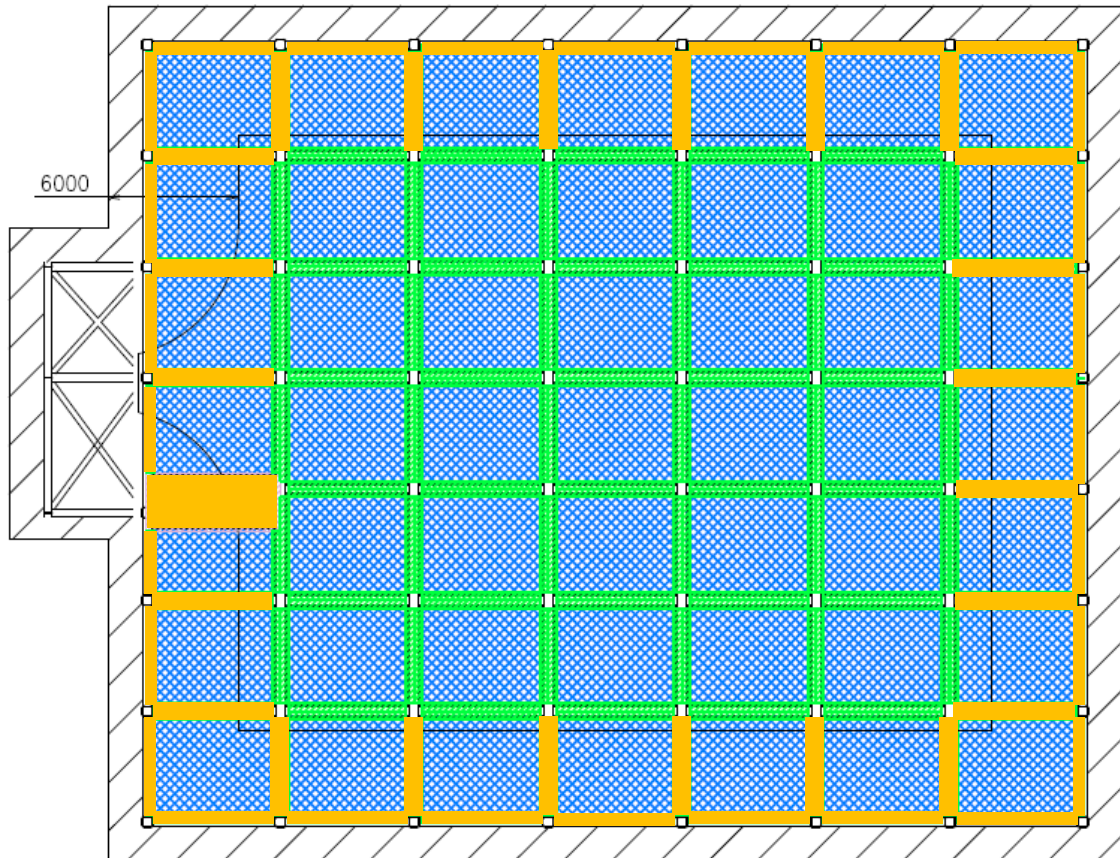
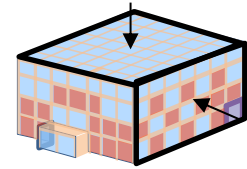
第 4 - 1 図 飛来物防護ネットの耐火被覆施工範囲図 (3 / 4)



第4-1図 飛来物防護ネットの耐火被覆施工範囲図 (4 / 4)

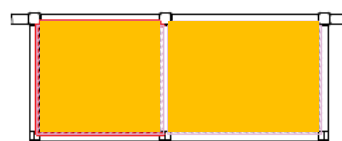
【凡例】

-  : 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

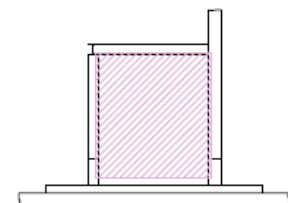
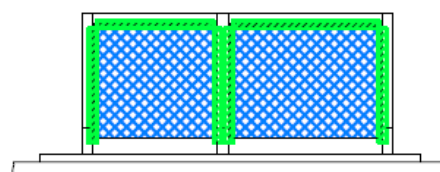
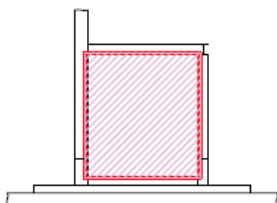
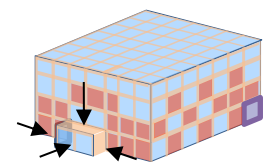


(天面)

(西面)

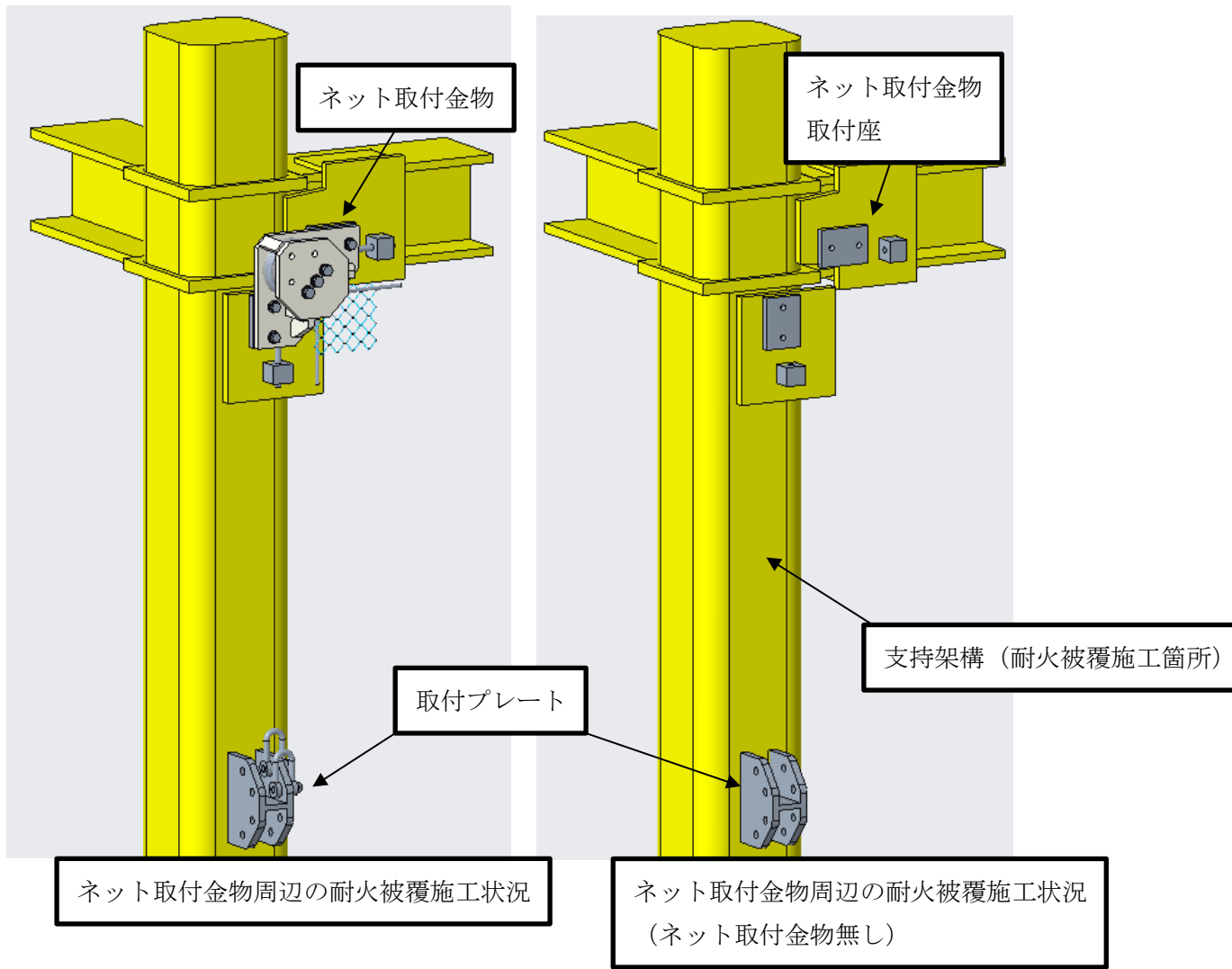


(張出し部天面)

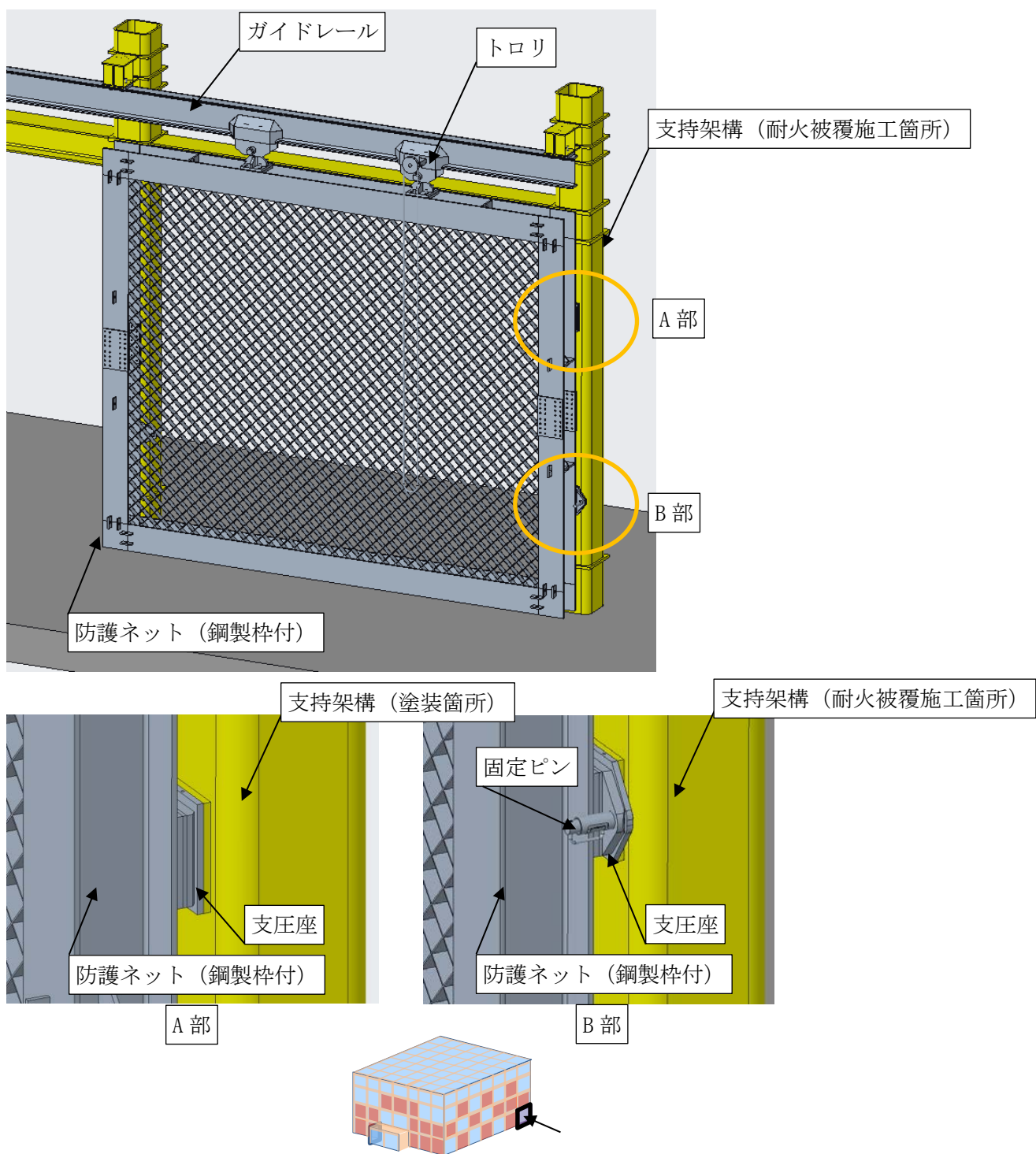


(張出し部南面, 北面及び西面)

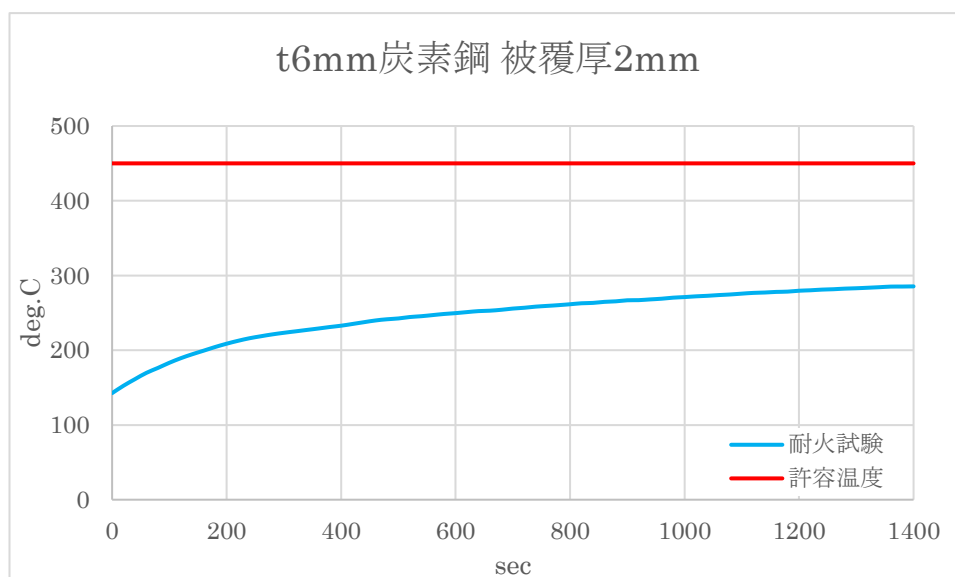
第4-2図 飛来物防護ネット 防護板の耐火被覆施工範囲図



第4-3図 防護ネット取付金物周辺の耐火被覆施工範囲図



第4-4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



第4-5図 t 6mm炭素鋼 耐火塗装厚2mmの耐火試験結果

※ 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。

(2) 構造健全性評価

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