

**伊方発電所3号機
新規制基準への適合性確認申請における
原子力安全専門部会の重点審議事項について
(火災に対する考慮)**

**平成25年11月19日
四国電力株式会社**

目次

1. 新規制基準およびその適合状況(火災に対する考慮)
2. 外部火災に対する防護対象と影響評価の考え方
3. 外部火災影響評価の概要
4. 近隣の産業施設の火災・爆発の影響評価
5. 航空機墜落による火災の影響評価

【参考資料】

1. 外部火災に係る国の審査状況
2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答

1. 新規制基準およびその適合状況(火災に対する考慮)1/2

伊方3号機発電用原子炉設置変更許可申請書(平成25年7月)

添付書類八「変更後における発電用原子炉施設の安全設計に関する説明書

1.5.7.7「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備に関する規則」に対する適合(抜粋)

	新規制基準の項目※1	適合状況
3	安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがあること(故意によるものを除く。)に対して安全機能を損なわないものでなければならない。	<p>安全施設は、発電所内又はその周辺において想定される、原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある故意によるものを除く人為による事象に対して、安全機能を損なわないよう設計する。</p> <p>原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある故意によるものを除く人為による事象としては、敷地及び敷地周辺の状況に基づき、航空機落下、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突又は電磁的障害を想定する。</p> <p>(1)航空機落下 平成22年5月19日付け平成21・10・20原第30号をもって、設置変更許可を受けた設計方針に同じ。</p> <p>なお、原子炉施設への航空機の落下確率は、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」(平成21・06・25原院第1号)等に基づき評価した結果、約5.9×10^{-8}回/炉・年であり、10^{-7}回/炉・年を十分下回っていることから、航空機の落下を考慮する必要はない。</p>

※1：「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第六条(外部からの衝撃による損傷の防止)

以下同じ

1. 新規制基準およびその適合状況(火災に対する考慮)2/2

伊方3号機発電用原子炉設置変更許可申請書(平成25年7月)

添付書類八「変更後における発電用原子炉施設の安全設計に関する説明書

1.5.7.7「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備に関する規則」に対する適合(抜粋)

新規制基準の項目※1	適合状況
	<p>(3)爆発 平成22年5月19日付け平成21・10・20原第30号をもって、設置変更許可を受けた設計方針に同じ。</p> <p>(4)近隣工場等の火災 原子炉施設周辺には、石油コンビナート等の石油工業関連施設はないことから、近隣工場等の火災を考慮する必要はない。また、航空機落下に伴う火災については、安全施設を内包する原子炉施設を中心として落下確率が10^{-7}回/炉・年以上になる地点までの距離は約150mと十分に離れており、安全施設に影響を与えることはなく考慮する必要はない。</p>

重点審議事項となっている火災に対する考慮である

- ・近隣の産業施設(工場・コンビナート等)の火災・爆発
- ・航空機墜落による火災

について、以降便宜上「外部火災」と呼ぶ。

2. 外部火災に対する防護対象と影響評価の考え方

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

▶ 外部火災に対する防護対象の考え方

- ✓ 発電所施設に対して外部火災の影響を受けた場合において、原子炉の安全性を確保するため、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1,2,3機器を防護対象とする。
- ✓ 重大事故等対処設備は、外部火災により損傷を受けた場合、炉心損傷防止等の原子炉の安全性にかかる対策に大きな影響を与えるおそれがあることから、機能喪失しないよう当該設備を外部火災の熱影響が及ばない場所に移動または防火帯幅の確保、外部火災に対する消火活動を行うことにより熱影響を受けないよう配慮する。

▶ 各設備の防護対策の考え方

安全施設に係る外部火災の防護の考え方は以下の通りである。

防護対象	防護の考え方	今回の評価
クラス1、クラス2 設備	消火活動による防護はもちろんのこと、原子炉の安全機能確保の観点から、高い信頼性を要求される設備であり、外部火災に対して機能を喪失しないよう、離隔ならびに建屋により防護する。	外部火災の消火活動による防護手段を期待しない条件のもと、熱影響評価等を実施する。
クラス3設備	屋内に設置されている機器については、建屋により防護することとし、屋外機器については、消火活動により防護する。	外部火災に対して、左記の考え方により防護していくため、個別設備の影響評価は行わない。

3. 外部火災影響評価の概要

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

- 考慮すべき外部火災として、森林火災、近隣の産業施設の火災・爆発及び航空機墜落による火災について、影響評価を実施した。
具体的な評価内容等については、以下の通りである。

火災種別	考慮すべき火災	評価内容	評価項目	
森林火災	発電所敷地外10km以内に発火点を設定した発電所に迫る森林火災	<ul style="list-style-type: none"> ・森林火災シミュレーション解析コード(FARSITE)を用いた森林火災評価 ・森林火災評価に基づく防護対象設備の熱影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・防火帯幅評価 ・熱影響評価 ・危険距離評価 	二次的影響(ばい煙等)評価
近隣の産業施設の火災・爆発	発電所敷地外10km以内の石油コンビナート等の火災・爆発	・発電所敷地外の石油コンビナート等について発電所との距離、地形等を考慮した影響評価	・影響評価	同上
	発電所敷地内の危険物貯蔵施設の火災	・発電所敷地内の危険物貯蔵施設火災による熱影響評価	・熱影響評価	
航空機墜落による火災	敷地への航空機墜落時の火災	・墜落を想定する航空機に相当する火災を想定した防護対象設備の熱影響評価	・熱影響評価	同上

4. 近隣の産業施設の火災・爆発の影響評価(評価内容) 1/3

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

▶ 近隣の産業施設の火災・爆発の影響評価について、評価項目及び評価方法を示す。

設置場所	評価項目	評価方法
発電所 敷地外	①石油コンビナートの影響評価	・発電所の敷地外10km以内に設置されている石油コンビナート施設の有無を確認し、当該施設の火災・爆発により発電所の防護対象設備に影響を及ぼさないことを評価
	②危険物貯蔵施設の影響評価	・発電所の敷地外10km以内に設置されている危険物貯蔵施設(石油類及びガス貯蔵設備)の有無を確認し、当該施設の火災・爆発により発電所の防護対象設備に影響を及ぼさないことを評価 ・評価に当たっては、発電所との間の地形等を考慮し、当該施設の火災により、発電所の防護対象設備が熱影響及び爆風圧の影響を受けないことを評価
発電所 敷地内	③危険物貯蔵施設の影響評価	・発電所の敷地内に設置されている危険物貯蔵施設(危険物タンク等)の火災による発電所の防護対象設備への熱影響を評価

4. 近隣の産業施設の火災・爆発の影響評価(評価結果その1) 2/3

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

伊方の地域性

①石油コンビナートの影響評価

- 愛媛県石油コンビナート等防災計画に定められている特別防災区域は計4箇所ある。そのうち伊方発電所に最も近い地区は、北東約50kmの松山地区であり、発電所の敷地外10km以内に石油コンビナート施設はないことを確認した。

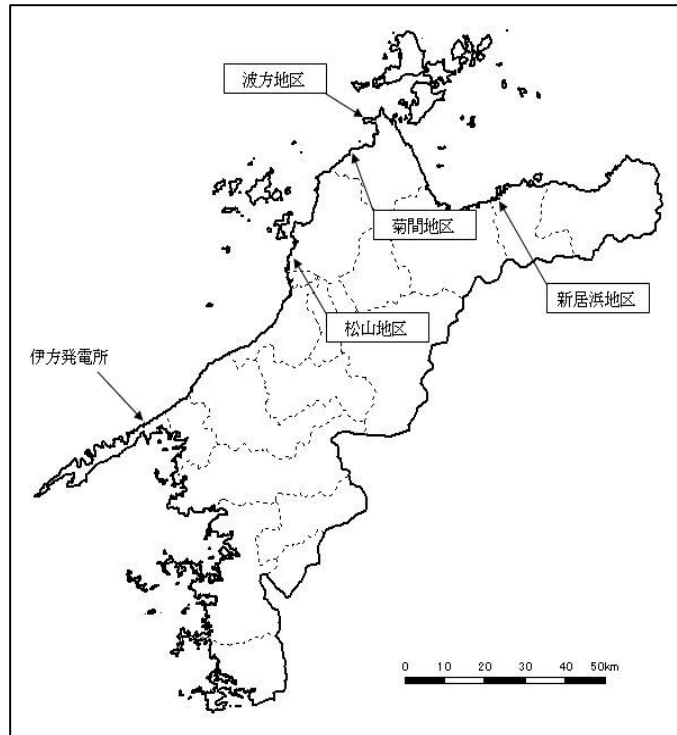


図 石油コンビナート施設

出典：「愛媛県石油コンビナート等防災計画」(平成24年5月 愛媛県石油コンビナート等防災本部)

②敷地外危険物貯蔵施設の影響評価

- 発電所周辺の危険物貯蔵施設と発電所の間には、山林(標高約200m以上)の障壁があることから、危険物貯蔵施設火災時の熱影響およびガス爆発による爆風圧の影響を受けない。
- 危険物貯蔵施設の最も近いものでも発電所から1.5km以上離れており、森林火災を想定した解析にて設定した発火点(発電所から約1.2km~約1.4kmの位置)より遠い。このことから、これらの危険物貯蔵施設の火災の延焼により森林火災に発展した場合においても、森林火災の延焼状況結果に代表される。

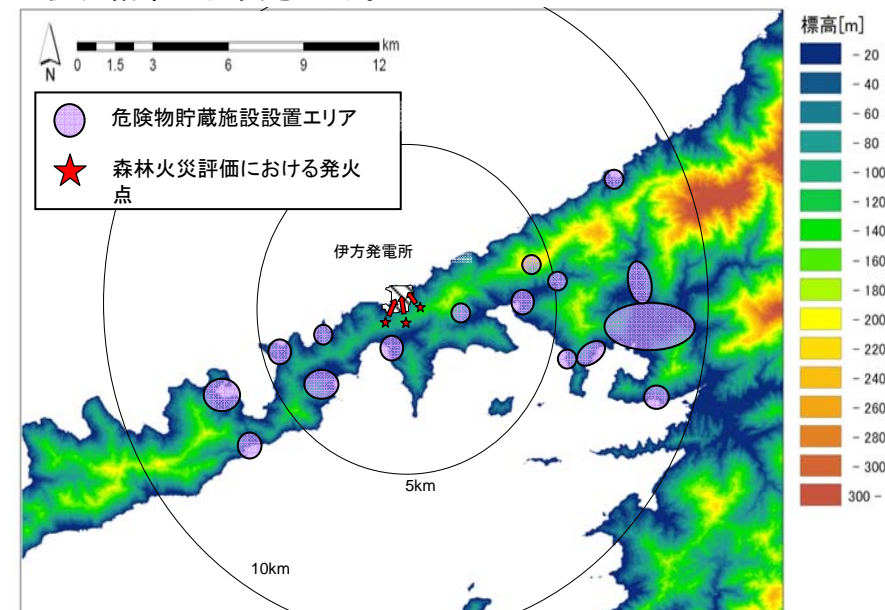


図 敷地外危険物貯蔵施設

4. 近隣の産業施設の火災・爆発の影響評価(評価結果その2) 3/3

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

③敷地内危険物貯蔵施設の影響評価

- 評価方法： 火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、防護対象設備が設定されている建屋外壁が昇温されるものとして、熱影響評価を実施。
- 評価対象： 敷地内の危険物貯蔵施設のうち、下図の屋外貯蔵施設での火災を想定

➤影響評価結果

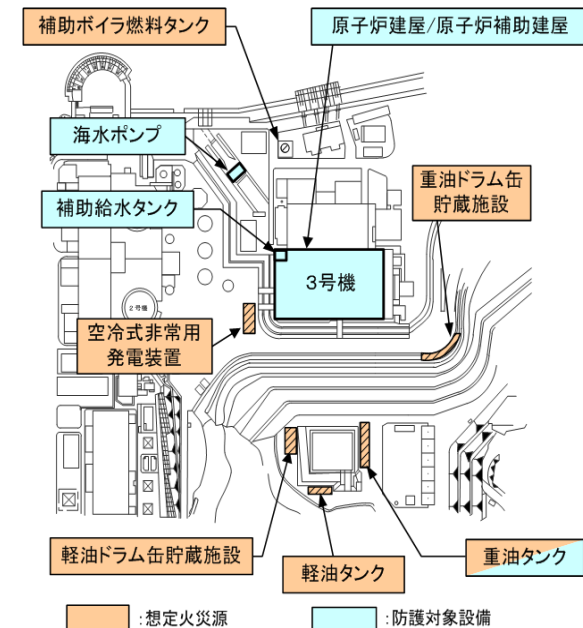
✓屋内の防護対象設備への熱影響評価

→原子炉建屋/原子炉補助建屋外壁の熱影響を評価 (コンクリート許容温度：200℃)

想定火災源	燃料量	建屋までの距離	評価結果 (外壁表面温度)
補助ボイラ燃料タンク (重油)	500 m ³	90 m	118.7 °C
重油タンク	291 m ³	100 m	92.3 °C
軽油タンク	72 m ³	190 m	53.0 °C
重油ドラム缶貯蔵施設	20 m ³	50 m	68.1 °C
軽油ドラム缶貯蔵施設	20 m ³	140 m	54.8 °C
空冷式非常用発電装置 (重油/潤滑油)	4 m ³	20 m	85.3 °C

✓屋外の防護対象設備への熱影響評価

防護対象設備	想定火災源	評価及び評価結果
海水ポンプ	補助ボイラ燃料タンク	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプから最も近い補助ボイラ燃料タンク火災を、火災源と想定。 ・海水ポンプは海水ピット内に設置しており、補助ボイラ燃料タンクから見た場合においても、地上表面(EL.10m)に海水ポンプの上端は飛び出していないことから、熱影響はない。
補助給水タンク	補助ボイラ燃料タンク	<ul style="list-style-type: none"> ・補助給水タンクから最も近い補助ボイラ燃料タンク火災を火災源と想定。 ・熱影響評価の結果、補助給水タンクの内部温度上昇は約2℃であり、設備への熱影響はない。
重油タンク	軽油タンク	<ul style="list-style-type: none"> ・重油タンクから最も近い軽油タンク火災を火災源と想定。 ・熱影響評価の結果、重油タンクの内部温度は約58℃となり、重油の自然発火点温度240℃を十分下回るため、設備への熱影響はない。



5. 航空機墜落による火災の影響評価 1/3

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

➤ 評価方針

- ✓ 発電所敷地への航空機の墜落で発生する火災に対して、より一層の安全性向上の観点から、その火災が発電所の敷地内で起こったとしても原子炉施設に影響を及ぼさないことを確認する。

➤ 評価方法

- ✓ 航空機落下確率評価で考慮している航空機落下事故については、訓練中の事故等、民間航空機と自衛隊機又は米軍機では、発生状況が必ずしも同一ではないと考えられることから、以下の3つのカテゴリに分類する。
 - 計器飛行方式民間航空機の落下事故
 - 有視界飛行方式民間航空機の落下事故
 - 自衛隊機又は米軍機の落下事故
- ✓ 航空機の落下確率が 10^{-7} (回/炉・年)に相当する面積より、航空機落下確率評価で標的面積として考慮している原子炉施設からの離隔距離(墜落地点)を求め、そこで発生する火災による原子炉施設外壁の表面温度を評価し、許容温度を超えないことを確認する。

5. 航空機墜落による火災の影響評価 2/3

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

➤ 航空機の落下地点の想定

- ✓ 「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21・06・25原院第1号)に基づき、落下確率 10^{-7} (回/炉・年)に相当する面積より、3つのカテゴリの離隔距離を算出した。

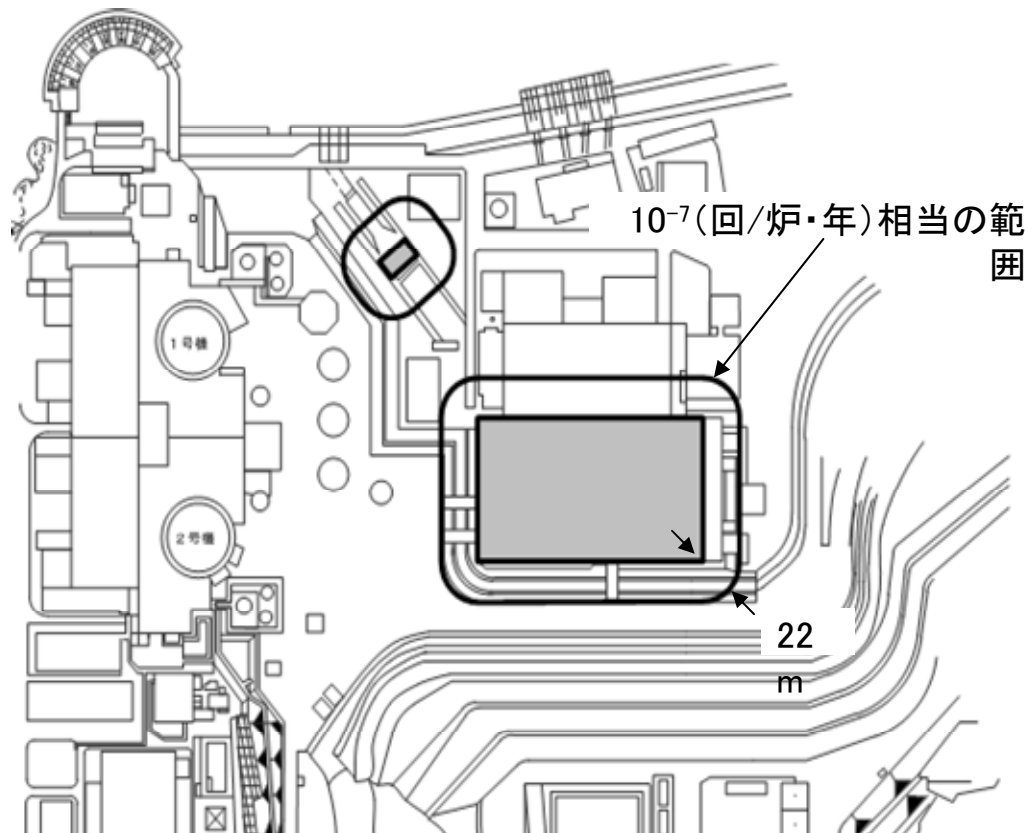


表 算出した離隔距離

カテゴリ	離隔距離
計器飛行方式 民間航空機	500(m)
自衛隊機 又は米軍機	22(m)
有視界飛行方式 民間航空機	70(m)

図 離隔距離の算出イメージ(自衛隊機又は米軍機の例)

5. 航空機墜落による火災の影響評価 3/3

(8月29日 第15回審査会合資料抜粋)

➤ 航空機落下による火災の影響評価

✓ 落下すると想定される機種及び概要

項目	計器飛行方式民間航空機	自衛隊機又は米軍機
対象航空機	落下確率評価で考慮している条件のうち、燃料積載量の最も大きい機種と考えられるB747-400(約71m(全長)×約64m(全幅))	落下確率評価で考慮している落下事故のうち、燃料積載量の最も大きい機種と考えられるA-6(約17m(全長)×約16m(全幅))
燃料量	216.84(m ³)	14.8(m ³)
輻射発散度	50×10 ³ (W/m ²)	50×10 ³ (W/m ²)
燃焼速度	4.64×10 ⁻⁵ (m/s)	6.67×10 ⁻⁵ (m/s)
航空機墜落地点	500(m)離れた地点	22(m)離れた地点

- ・ 有視界飛行方式民間航空機の落下による火災影響評価は、原子炉施設からの距離及び対象航空機の燃料積載量を踏まえると、自衛隊機又は米軍機の落下による火災影響評価に包絡される。

✓ 評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で原子炉施設外壁が昇温されるものとして評価し、許容温度を超えないことを確認した。

項目	計器飛行方式民間航空機	自衛隊機又は米軍機
原子炉建屋外壁表面の温度	約55(°C)	約155(°C)
判断基準	<200(°C) (コンクリート許容温度)	

【参考資料】

1. 外部火災に係る国の審査状況

○7月8日の申請以降、原子力規制委員会にて、森林火災影響評価についてはこれまで2回の審査会合が開催され、10月3日に指摘事項の回答を実施した結果、大きなコメントは残っていない。

審査会合の開催実績および審査内容

審査会合開催日		主な審査内容
平成25年 8月29日	第15回	重大事故等対策の有効性評価に係る成立性確認 設計基準事象（外部火災影響評価）
平成25年10月 3日	第28回	審査会合における指摘事項の回答（外部火災影響評価）

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その1 1/4

(10月3日第28回審査会合抜粋)

1. 指摘事項

- 火炎輻射強度の算出根拠、形態係数の求め方、熱の輻射に関する考え方を整理して説明すること。

[平成25年8月29日 第15回審査会合]

2. 回答

- 形態係数、受熱側輻射強度については、「原子力発電所の外部火災評価ガイド」に従い算出している。
 - ・円筒火炎モデルを用い、受熱面が火災源と同一平面上にある垂直平板として形態係数を算出する。
 - ・火災源となる燃料の種類に応じて、輻射発散度を選択し、受熱側輻射強度を算出する。
- 建屋外壁の表面温度評価については、表面からの対流熱伝導などの熱損失を考慮しないものとし、半無限固体の非定常熱伝導の温度評価式を用いて評価した。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その1 2/4

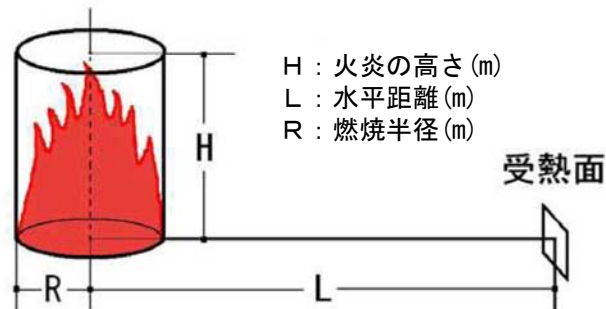
(10月3日第28回審査会合抜粋)

火災源から受熱側外壁への放射強度の算定

- ✓ 「①評価モデル」では、火災源を円筒火炎モデルとして設定し、火災源からの受熱側の外壁が受け取る放射熱量の割合に関連する形態係数 ϕ を算出する。
- ✓ 「②受熱側の放射強度算出」では、火災源の放射発散度 R_f と形態係数 ϕ より受熱側の放射強度を算出する。

①評価モデル

円筒火炎モデルを用い、受熱面が火災源と同一平面上にある垂直平板と仮定する



次式により形態係数 ϕ を算出する

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

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

(出典：原子力発電所の外部火災影響評価ガイド)

②受熱側の放射強度算出

火災源となる燃料の種類に応じて放射発散度 R_f を選択し、受熱側放射強度を算出

◆放射発散度 R_f

カフジ原油	41×10^3 (35×10^3)	メタノール	9.8×10^3 (8.4×10^3)
ガソリン・ナフサ	58×10^3 (50×10^3)	エタノール	12×10^3 (10×10^3)
灯油	50×10^3 (43×10^3)	LNG (メタン)	76×10^3 (65×10^3)
軽油	42×10^3 (36×10^3)	エチレン	134×10^3 (115×10^3)
重油	23×10^3 (20×10^3)	プロパン	74×10^3 (64×10^3)
ベンゼン	62×10^3 (53×10^3)	プロピレン	73×10^3 (53×10^3)
n-ヘキサン	85×10^3 (73×10^3)	n-ブタン	83×10^3 (71×10^3)

(単位は W/m^2 、かつこ内は $kcal/m^2 \cdot h$)

(出典：原子力発電所の外部火災影響評価ガイド)

受熱側放射強度 E (W/m^2)

$$= \text{形態係数 } \phi \times \text{放射発散度 } R_f \text{ (} W/m^2 \text{)}$$

(出典：原子力発電所の外部火災影響評価ガイド)

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その1 3/4

(10月3日第28回審査会合抜粋)

受熱側の輻射強度を用いた外壁温度の算出

✓火災源からの輻射熱による外壁温度の評価にあたっては、一次元非定常熱伝導方程式の解である半無限固体での温度評価式²⁾を用いて、外壁の温度を評価する。

✓条件として、受熱側の輻射強度は一定値で変化しないものと仮定し、外壁表面の対流熱損失は考慮しないものとする。

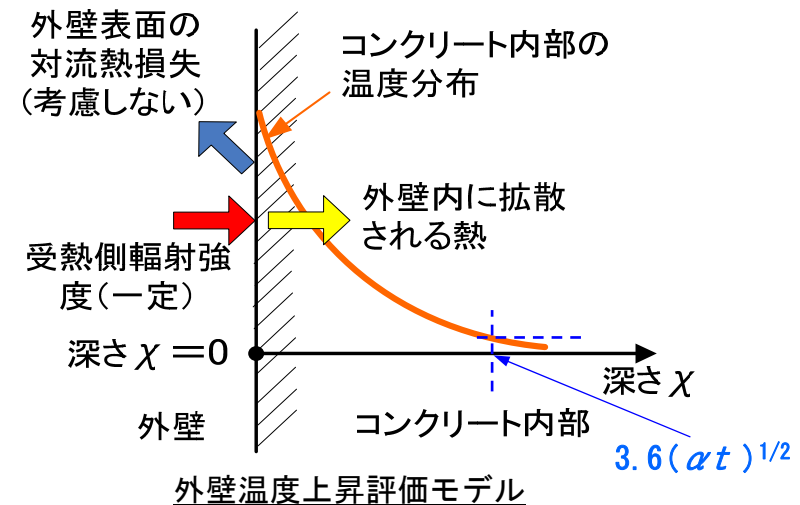
③外壁の温度評価

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

※壁表面として深さ(x)≒0mで、上記部分は1となる

T_0 : 初期温度(50°C)
 α_c : コンクリート温度伝導率($7.53 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$)
 [$\alpha_c = \lambda_c / (\rho \times C_p)$]
 C_p : コンクリート比熱(0.963[kJ/kgK])
 ρ : コンクリート密度(2400[kg/m³])
 λ_c : コンクリート熱伝導率(1.74[W/mK])
 x : コンクリート深さ[m]
 E : 受熱側輻射強度[W/m²]
 t : 燃焼継続時間[sec]

2) 出典: 伝熱工学、東京大学出版会



【外壁への温度評価式の適用】

外壁表面における温度上昇分の1%にあたる温度上昇となる深さ x ($3.6(\alpha t)^{1/2}$)²⁾を算出できる。
 今回、火災継続時間及び受熱側輻射強度が大きい補助ボイラ燃料タンクにて深さ x を求めた結果、「約0.64m」であり、外壁厚さを下回るため、本温度評価式が適用できる。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その1 4/4

(10月3日第28回審査会合抜粋)

温度評価式による外壁温度の変化

半無限固体の非定常熱伝導の温度評価式を用いて評価した、外壁表面の温度及びコンクリート内部の温度分布の時間変化について、代表として、受熱側輻射強度Eを300W/m²、600W/m²の場合について示す。
本評価式は、外表面からの放出はなく、深さ方向に熱が拡散する。

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

T:コンクリート温度(°C) X:コンクリート深さ[m] E:受熱側輻射強度[W/m²] t:燃焼継続時間[sec]

To:初期温度(50°C)
 α_c :コンクリート温度伝導率(7.53 × 10⁻⁷m²/s)
 [$\alpha_c = \lambda_c / (\rho \times C_p)$]
 Cp:コンクリート比熱(0.963[kJ/kgK])
 ρ :コンクリート密度(2400[kg/m³])
 λ_c :コンクリート熱伝導率(1.74[W/mK])

図1 外壁表面の温度上昇

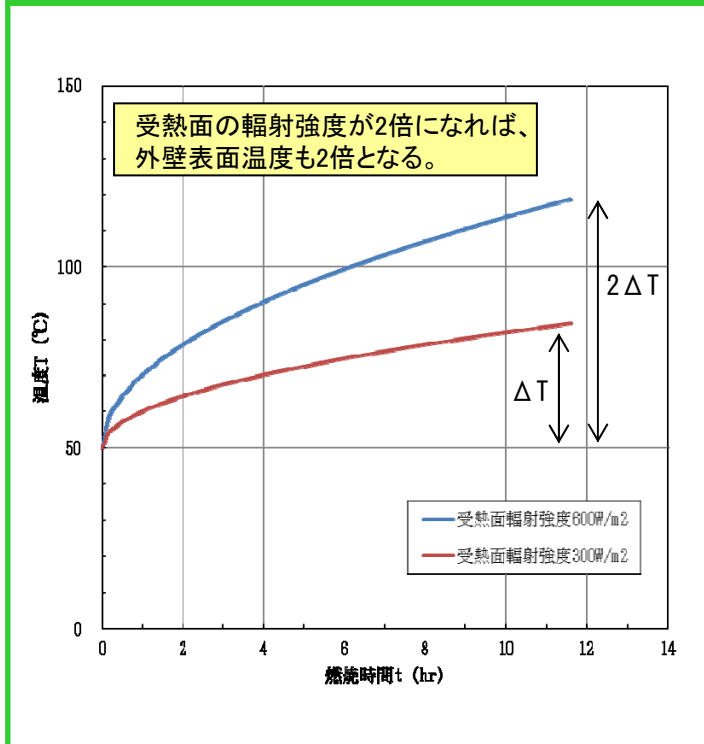
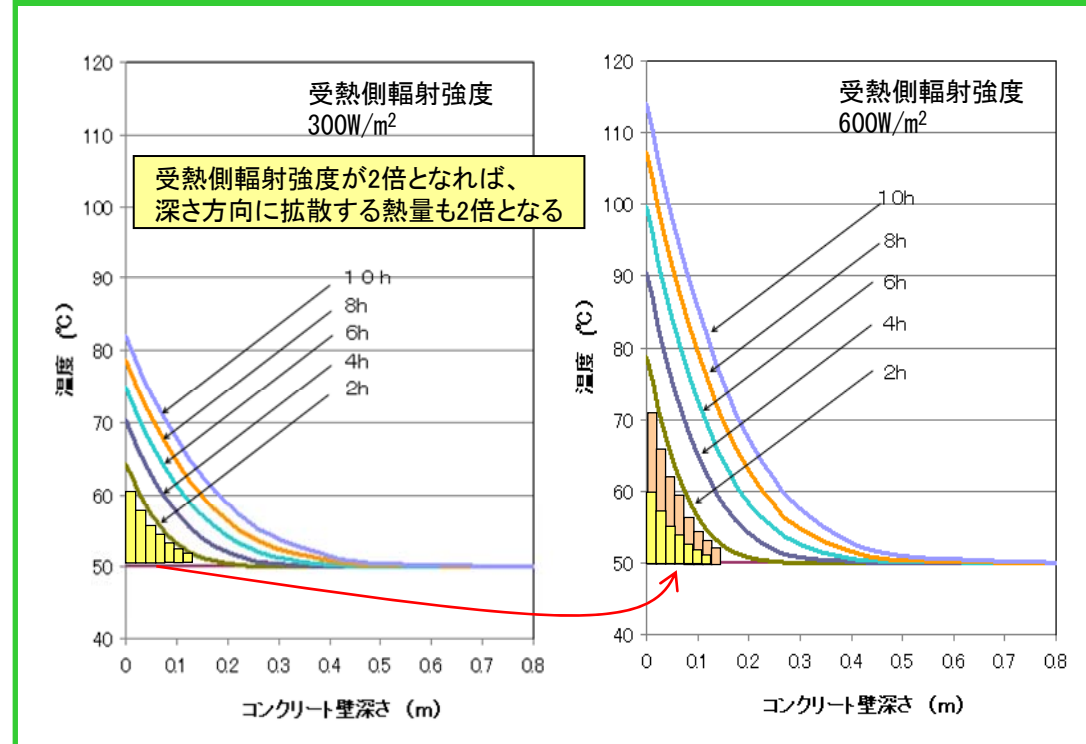


図2 外壁内部の温度分布の時間変化グラフ



2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 1/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

1. 指摘事項

- 自衛隊機又は米軍機の落下確率評価に関し、評価対象とする母集団をはっきりさせること。航空機落下確率評価におけるカテゴリ区分については、論理性を持って区分けすること。
- 重油タンクの取り扱いについて、航空機落下の観点からの防護の考え方について整理すること。

[平成25年8月29日 第15回審査会合]

2. 回答

- 自衛隊機又は米軍機の落下確率評価について、用途による飛行形態を踏まえてカテゴリを整理した。このカテゴリ毎に火災影響評価を実施し、原子炉施設外壁等の温度が許容温度を超えないことを確認した。
- 重油タンクを防護対象として火災影響評価を実施し、原子炉施設外壁等の温度が許容温度を超えないことを確認した。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 2/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

① 評価方針

- 発電所敷地への航空機の墜落で発生する火災に対して、より一層の安全性向上の観点から、その火災が発電所の敷地内で起こったとしても原子炉施設に影響を及ぼさないことを確認する。
- 前回評価(H25.8.29第15回審査会合)では、航空機落下確率評価で考慮している落下事故実績等より、燃料積載量の最も大きい機種を選定し、航空機落下確率評価でのカテゴリ毎に評価していた。今回評価においては、自衛隊機又は米軍機について、用途による飛行形態を踏まえてカテゴリを整理し、自衛隊が保有する全ての機種のうち、燃料積載量の最も大きいと考えられる機種を対象として評価する。

表1 落下事故のカテゴリ分類比較

前回評価(H25.8.29 第15回審査会合)		今回評価	
計器飛行方式	飛行場での離着陸時※	計器飛行方式	飛行場での離着陸時※
民間航空機	航空路を巡航中	民間航空機	航空路を巡航中
有視界飛行方式民間航空機		有視界飛行方式民間航空機	
自衛隊機又は米軍機		自衛隊機 又は 米軍機	訓練空域外を飛行中 空中給油機等、高高度での巡航が想定される大型固定翼機
			その他の大型固定翼機、小型固定翼機及び回転翼機
		基地－訓練空域間往復時	

※ 発電所は、滑走路方向に対して±60° 扇型区域から外れているため対象外。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 3/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

② 用途による分類(1/2)

- 自衛隊機又は米軍機の落下事故には、「訓練空域外を飛行中の落下事故」と「基地－訓練空域間往復時の落下事故」が含まれる。以下のとおり、用途による飛行形態を踏まえてカテゴリを整理した。

表2 自衛隊機（大型固定翼機）の用途等

- ✓ 訓練空域外を飛行中の落下事故

高高度での巡航が想定される機種及び目的地での低高度での飛行が考えられるものの目的地が海上、基地或いは空港であり原子力発電所付近で低高度での飛行を行うことがない機種については、「空中給油機等、高高度での巡航が想定される大型固定翼機」に整理した。対象航空機としては、燃料積載量が最大のKC-767とした。

その他の機種については、「その他の大型固定翼機、小型固定翼機及び回転翼機」に整理した。対象航空機としては、燃料積載量が最大のF-15とした。

なお、回転翼機は、燃料積載量の観点から大型固定翼機の評価に包絡される。

所属	機種	用途	寸法(m)		燃料量(kL)
			全長	全幅	
陸上自衛隊	LR-2	連絡偵察	14	18	約2
海上自衛隊	P-3C	哨戒	36	30	約35
	P-1	哨戒	38	35	—
航空自衛隊	F-15J/DJ	戦闘	19	13	約15
	F-4EJ	戦闘	19	12	約12
	F-2A/B	戦闘	16	11	約11
	RF-4E/EJ	偵察	19	12	約12
	C-1	輸送	29	31	約11
	C-130H	輸送	30	40	約37
	KC-767	空中給油・輸送	49	48	約145
	KC-130H	空中給油機能付加	30	40	約37
	E-2C	早期警戒	18	25	約6
E-767	早期警戒管制	49	48	≤KC-767	

※ 平成25年度版防衛白書等より作成。ただし、燃料量については、最大離陸重量等からの推定を含む。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 4/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

② 用途による分類(2/2)

- ✓ 基地－訓練空域間往復時の落下事故

伊方発電所において、基地－訓練空域間を往復中の落下事故として考慮している基地である岩国航空基地に所属する自衛隊機を表3に示す。対象航空機としては、本カテゴリで整理される機種のうち、燃料積載量が最大のUP-3Dとした。

なお、回転翼機は、燃料積載量の観点から大型固定翼機の評価に包絡される。

表3 岩国航空基地に所属する自衛隊機（大型固定翼機）の用途等

所属	機種	用途		寸法(m)		燃料量(kL)
				全長	全幅	
航空自衛隊	US-1A	救難		33	33	約23
	US-2	救難		33	33	US-1Aと同程度と推定
	U-36A	多用途	電子戦訓練等	15	12	約4
	UP-3D		電子戦訓練支援	33	30	原型機P-3Cと同程度(約35)と推定
	EP-3		電子戦データ収集	33	30	UP-3Dと同型
	OP-3C		画像情報収集	33	30	UP-3Dと同型

※ 航空自衛隊HP等より作成。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 5/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

③ 落下確率評価

- 航空機落下確率については、「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」(平成21・06・25原院第1号)に従い評価した。以下に「訓練空域外を飛行中の落下事故」(空中給油機等、高高度での巡航が想定される大型固定翼機)の例を示す。
- 以下の式より、 $P_{so}=10^{-7}$ となる A を求めると $0.46(\text{km}^2)$ となった。

$$P_{so}=(f_{so}/S_o)\cdot A$$

P_{so} : 訓練空域外での対象施設への航空機落下確率(回/年)

f_{so} : 単位年当たりの訓練空域外落下事故率(回/年)

S_o : 全国土面積から全国の陸上の訓練空域の面積を除いた面積(km^2)

A : 原子炉施設の標的面積(km^2)

パラメータ	伊方発電所3号炉
f_{so} ^{注1}	自衛隊機 0.5/20=0.025 米軍機 1/20=0.050
S_o ^{注1}	自衛隊機 295,000 米軍機 372,000

注1: 「平成23年度 航空機落下事故に関するデータの整備」(平成24年9月 独立行政法人 原子力安全基盤機構)より。
事故実績は直近20年間の航空機落下事故データである。
自衛隊機の事故は、0件のため0.5件と仮定する。米軍機の事故は、S-3バイキング(哨戒機)の実績である。

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 6/10

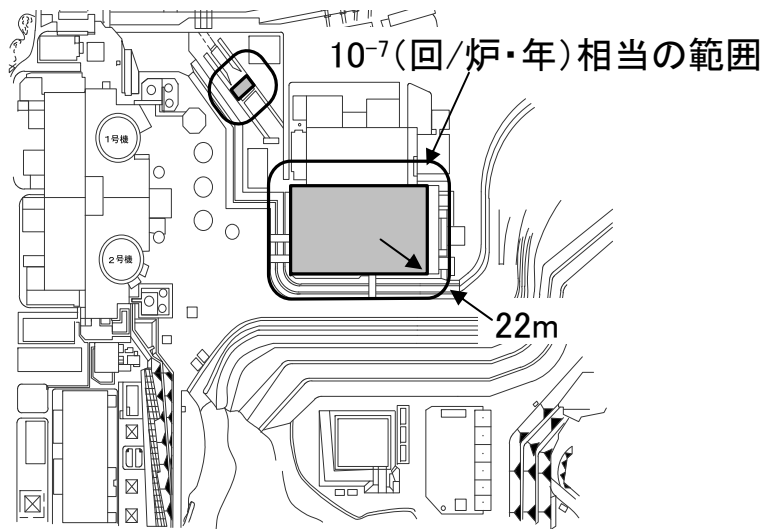
(10月3日第28回審査会合抜粋)

④ 離隔距離の算出

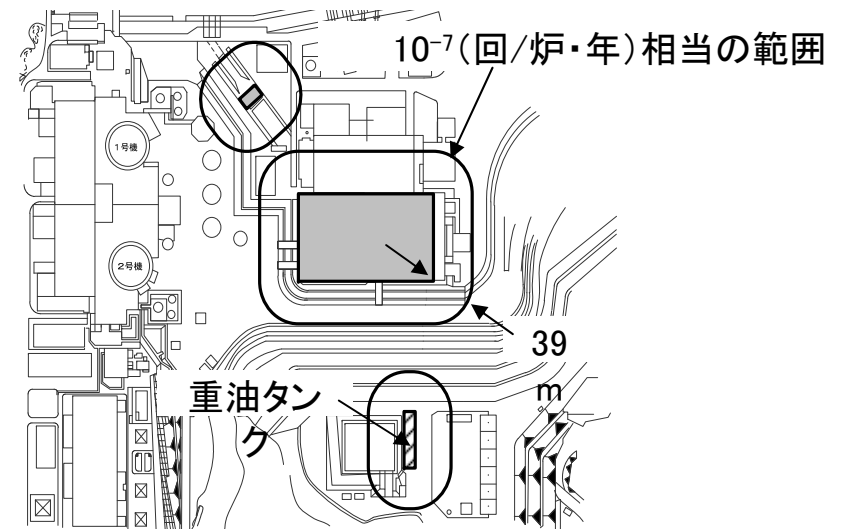
- 防護対象として従来の原子炉建屋、原子炉補助建屋、海水ポンプエリアに重油タンクを新たに考慮し、落下確率 10^{-7} (回/炉・年)に相当する面積より、カテゴリ毎の離隔距離を算出した。

表4 算出した離隔距離

カテゴリ			離隔距離
計器飛行方式民間航空機			約500m
有視界飛行方式民間航空機			約70m
自衛隊機 又は米軍機	訓練空域外 を飛行中	空中給油機等、高高度での巡航が想定される大型固定翼機	約250m
		その他の大型固定翼機、小型固定翼機及び回転翼機	約42m
	基地－訓練空域間往復時		約39m



[H25.8.29 第15回審査会合]
自衛隊機又は米軍機の離隔距離(22m)算出イメージ



[今回] 自衛隊機又は米軍機(基地-訓練空域間往復時)
の離隔距離(39m)算出イメージ

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 7/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

⑤ 火災影響評価(1/3)

➤ 必要データ

✓ 評価に用いるデータは以下のとおりとした。

カテゴリ		対象航空機	燃料量 (m ³)※1	放射発散度 (W/m ²)	燃焼速度 (m/s)	航空機墜落地点	
計器飛行方式民間航空機		B747-400	216.84	50 × 10 ³	4.64 × 10 ⁻⁵	500m	
有視界飛行方式民間航空機		(評価は自衛隊機又は米軍機 <small>※2</small> の落下に包絡される)				70m	
自衛隊機 又は 米軍機	訓練空域外 を飛行中	空中給油機等、高高度での巡航 が想定される大型固定翼機	KC-767	145.03	58 × 10 ³	6.71 × 10 ⁻⁵	250m
		その他の大型固定翼機、小型固 定翼機及び回転翼機	F-15	14.87	58 × 10 ³	6.71 × 10 ⁻⁵	42m
	基地－訓練空域間往復時	UP-3D	34.84	58 × 10 ³	6.71 × 10 ⁻⁵	39m	

※1 軍用機関係の図書等の記載値から算出した推定値。

※2 落下確率評価において考慮している航空機は、小型固定翼機、大型回転翼機及び小型回転翼機である。評価条件は、原子炉施設からの距離が70(m)、燃料積載量が大型回転翼機で3(m³)程度であることから、自衛隊機又は米軍機において原子炉施設からの距離が39(m)、燃料積載量が35(m³)程度で評価していることを踏まえると、本評価は自衛隊機又は米軍機の落下による火災影響評価に包絡される。

➤ 燃焼半径の算出

✓ 円筒火炎モデルとして評価を実施するため、燃焼半径Rは航空機の燃料タンクの投影面積を円筒の底面と仮定して算出した。

$$R = (\text{燃料タンクの投影面積} / \pi)^{1/2}$$

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 8/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

⑤ 火災影響評価(2/3)

➤ 形態係数の算出

✓ 次の式から形態係数を算出した。

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

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

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)

➤ 輻射強度の算出

✓ 火災の火炎から任意の位置にある点(受熱点)の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値となる。

$$E = R_f \times \phi$$

ここで、E: 輻射強度(W/m²)、R_f: 輻射発散度(W/m²)、 ϕ : 形態係数

➤ 燃焼時間の算出

✓ 燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値となる。

$$t = V / (\pi R^2 \times v)$$

ここで、t: 燃焼継続時間(s)、V: 燃料量(m³)、v: 燃焼速度(m/s) = M/ρ、M: 質量低下速度(kg/m²·s)、ρ: 燃料密度(kg/m³)

※「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」より

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 9/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

⑤ 火災影響評価(3/3)

➤ 建屋外壁の耐火性能評価

- ✓ 火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で原子炉施設外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の一般解の式よりコンクリート表面及び裏面の温度上昇を求めた。

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

ここで、 T_0 : 初期温度(50[°C]: 建屋内気温として保守的に設定した値)、 q : 輻射強度[kW/m²]、 α : コンクリート温度伝導率(= $\lambda / (\rho \times C_p)$ [m²/s])、 C_p : コンクリート比熱(0.963[kJ/kgK])、 ρ : コンクリート密度(2,400[kg/m³])、 λ : コンクリート熱伝導率(1.74[W/mK])、 χ : コンクリート深さ[m]、 t : 燃焼継続時間[sec]

➤ 重油タンクの内部温度評価

- ✓ 近隣の産業施設の火災・爆発の影響評価と同様の手法を用いて、下記の式より重油タンク内部の平均温度上昇を求めた。なお、今回の評価での最大輻射強度と大気への放熱とのバランスより求めた重油タンク表面の最高温度が、重油の自然発火点温度より十分低いことを確認している。

$$T = T_0 + \frac{E \cdot t \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_0 \cdot h}{2} + \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \right)}{\rho_p \cdot C_{pp} \cdot V + \rho_s \cdot C_{ps} \cdot \left\{ \frac{(D_0^2 - D_i^2) \cdot \pi \cdot h}{4} + 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \cdot e \right\}}$$

ここで、 T_0 : 初期温度(34.3[°C]: 気象庁HPにおける瀬戸観測所の過去10年間の最高気温)、 E : 輻射強度[W/m²]、 ρ_p : 重油密度(1,000[kg/m³])、 C_{pp} : 重油比熱(1,700[J/kg·K])、 V : 重油体積(97[m³])、 ρ_s : タンク壁材密度(7,860[kg/m³])、 C_{ps} : タンク壁材比熱(473[J/kg·K])、 D_i : タンク内径(3.2[m])、 D_0 : タンク外径(= $D_i + 2e$)、 e : タンク最小板厚(0.021[m])、 h : タンク円筒長さ(13.538[m])、 t : 燃焼継続時間[sec]

2. 国の審査会合における指摘事項およびその回答 その2 10/10

(10月3日第28回審査会合抜粋)

⑥ 評価結果

- 航空機落下により発電所の敷地内で火災が発生した場合を想定したとしても、原子炉施設外壁及び重油タンク内部の温度が許容温度(コンクリートは200℃(保守的にコンクリートの圧縮強度が変化しない温度を想定)、重油は自然発火温度である240℃)を超えないことを確認した。

表5 評価結果のまとめ

カテゴリ		対象航空機	燃料タンク投影面積(m ²)※1	輻射強度(W/m ²)	燃焼継続時間(h)	評価結果(°C)※2	許容温度(°C)※2	
計器飛行方式民間航空機		747-400	700	9.0 × 10 ¹	1.85	約55	<200	
						約36	<240	
有視界飛行方式民間航空機		(評価は自衛隊機又は米軍機の落下に包絡される)						
自衛隊機又は米軍機	訓練空域外を飛行中	空中給油機等、高高度での巡航が想定される大型固定翼機	KC-767	405.2	2.4 × 10 ²	1.48	約60	<200
						約35	<240	
	基地－訓練空域間往復時	その他の大型固定翼機、小型固定翼機及び回転翼機	F-15	44.6	9.3 × 10 ²	1.38	約87	<200
						約37	<240	
		UP-3D	86.5	2.1 × 10 ³	1.67	約139	<200	
						約40	<240	

※1 軍用機関係図書等に記載の機体図面から算出した推定値。

※2 評価結果及び許容温度の欄の上段が原子炉施設外壁、下段が重油タンクを示す。