

女川原子力発電所2号炉 外部火災について (審査会合コメント回答)

平成31年4月16日
東北電力株式会社

1. 審査会合での指摘事項
2. 指摘事項に対する回答

1. 審査会合での指摘事項

番号	審査 会合日	指摘事項の内容	回答頁
81	H31.3.5	森林火災による熱影響評価について、火災輻射発散度や危険輻射強度など評価に必要なデータを明示するとともに、円筒火災モデルの考え方、各評価値の算出過程や考え方を整理して提示すること。	3
82	H31.3.5	防護対象施設について、防護する安全機能、防護の考え方、防護方法とその妥当性を網羅的に整理して提示すること。	8
83	H31.3.5	航空機落下による火災影響評価の標的面積や離隔距離の考え方について、導出プロセスも含めて整理して提示すること。	11
84	H31.3.5	火災による有毒ガス影響評価について、有毒ガス濃度に対する風速の影響を整理し、保守的な評価となっていることを提示すること。	16
85	H31.3.5	火災による熱影響評価について、評価結果の算出過程における不確かさや、許容値に対する裕度など、設計余裕の考え方を整理して提示すること。	20
86	H31.4.2	熱影響評価式において、コンクリート深さxの扱いについて整理して示すこと。	24

2. 指摘事項に対する回答(No.81) (1/5)

指摘事項

○森林火災による熱影響評価について、火災放射発散度や危険放射強度など評価に必要なデータを明示するとともに、円筒火災モデルの考え方、各評価値の算出過程や考え方を整理して提示すること。

回答

1. 火災放射発散度及び危険放射強度など評価に必要なデータについて

森林火災による熱影響評価について、評価に必要なデータの算出方法は外部火災影響評価ガイドに基づき以下のとおりである。

表 評価に必要なデータの算出方法

データ種類	整備要領 (ガイド記載)	女川2号炉における 算出方法
火災放射発散度 [W/m ²]	森林火災で算出された火災放射強度の値を火災放射発散度の値に変換したもの	火災放射強度の値に受熱面の吸収率をかけて変換したもの
火炎長 [m]	森林火災で算出された火炎長の値	火炎長は、FARSITEより出力
火炎到達幅 [m]	森林火災で算出された到達火炎の横幅	火炎到達幅は、FARSITE出力より算出
危険放射強度 [W/m ²]	原子炉施設の外壁、天井スラブの放射熱に対する耐熱性を放射強度で示したもの	評価対象施設の外壁、天井スラブの健全性が維持される温度より算出

2. 指摘事項に対する回答(No.81) (2/5)

外部火災影響評価ガイドに基づき算出した主な森林火災の熱影響評価に必要なデータを以下に示す。

表 主な森林火災の熱影響評価に必要なデータ

評価対象	データ種類	発火点1	発火点2-1	発火点2-2	発火点3
建屋外壁 (原子炉建屋)	火炎輻射発散度[kW/m ²]	477	408	413	421
	火炎長[m]	0.5	1.4	0.9	1.2
	火炎到達幅[m]	2300	2300	2300	2300
	危険輻射強度[kW/m ²]	3.88	12.17	7.04	9.39
	火炎継続時間[h]	0.79	0.08	0.24	0.14
復水貯蔵タンク	火炎輻射発散度[kW/m ²]	477	408	413	421
	火炎長[m]	0.5	1.4	0.9	1.2
	火炎到達幅[m]	2300	2300	2300	2300
	危険輻射強度[kW/m ²]	8.55	183.99	45.52	90.84
	火炎継続時間[h]	0.79	0.08	0.24	0.14
排気筒	火炎輻射発散度[kW/m ²]	430	367	372	389
	火炎長[m]	0.5	1.4	0.9	1.2
	火炎到達幅[m]	2300	2300	2300	2300
	危険輻射強度 [※] [kW/m ²]	10.39	10.39	10.39	10.39
	火炎継続時間[h]	0.79	0.08	0.24	0.14

※排気筒は定常状態での評価のため、危険輻射強度は火炎継続時間に関わらず一定となる。

2. 指摘事項に対する回答(No.81) (3/5)

2. 円筒火炎モデルの考え方について

火災放射強度は各々の位置で強度の違いがあるが本評価では最大の火炎放射発散度 R_f の円筒火炎モデルが一様に火炎到達幅に存在するものとして評価した。

最大の火炎放射発散度の円筒火炎モデルは、地形データの最小単位である10mメッシュ単位で算出した。

円筒火炎モデル数 F 及び10mメッシュ内の円筒火炎モデル数 \hat{F} は、火炎到達幅 W 、燃焼半径 R から算出している。

$$F = \frac{W}{2R} \quad \hat{F} = \frac{10}{2R}$$

F : 円筒火炎モデル数

W : 火炎到達幅[m]

\hat{F} : 円筒火炎モデル数 (10mメッシュ)

R : 燃焼半径 [m]

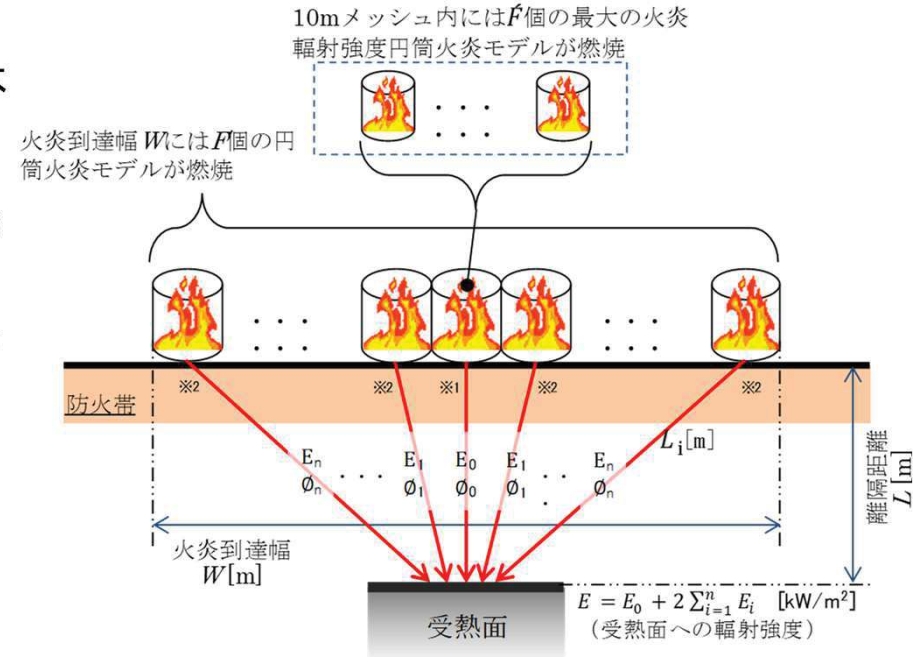
\hat{F} は火炎到達幅 W を10m幅に分割したメッシュ内の円筒火炎モデル数であるため、 F と \hat{F} の関係は以下の通りである。

$$F = \frac{W}{2R} = \frac{W}{10} \cdot \frac{10}{2R} = \frac{W}{10} \cdot \hat{F}$$

よって、受熱面への放射強度 E は、10mメッシュの中に円筒火炎モデルを \hat{F} 個並べて放射強度 E_i を計算し10mメッシュの放射強度 E_i を火炎到達幅の長さになるよう積算したものである。

$$E = E_0 + 2 \sum_{i=1}^n E_i$$

$E_0 = \phi_0 \times \hat{F} \times R_f$ (中心火炎の場合) [kW/m²]
 $E_i = \phi_i \times \hat{F} \times R_f$ (中心以外の火炎の場合) [kW/m²]
 ϕ_i : 形態係数[-]
 R_f : 最大火炎放射発散度[kW/m²]
 \hat{F} : 円筒火炎モデル数[-](10mメッシュ)



※1 \hat{F} 個分の円筒火炎モデルから放射

※2 \hat{F} 個分の円筒火炎モデルを2箇所から放射

- ・受熱面への放射強度 E は、受熱面に対して中心の火炎からの放射強度 E_0 と中心以外の火炎からの放射強度 E_i を積算したものである。なお、中心以外の円筒火炎モデルは左右対称であることから、片側を2倍して算出している。
- ・形態係数 ϕ_i は、受熱面と火炎の距離に依存するため、円筒火炎モデルごとにそれぞれ算出する。
- ・火炎放射発散度は、保守的に最大火炎放射発散度 R_f を用いる。

図 温度影響評価概念

2. 指摘事項に対する回答(No.81) (4/5)

3. 温度評価体系についての算出過程と考え方

- 温度評価体系について、計算の過程及び評価の考え方を整理し、以下に示す。

復水貯蔵タンクの温度評価について

- 復水貯蔵タンクは、高圧炉心スプレイ系及び原子炉隔離時冷却系の水源としての機能を確保するため、内部に貯蔵している水の対流等の不確かさを考慮して、保守的に定常状態における復水貯蔵タンクの系統水について温度評価する。
- 表面での輻射による復水貯蔵タンクの温度上昇を表した比熱と熱容量の関係式である下式のように表せる。

$$Q = C \frac{dT}{dt}$$

Q: 熱量(= $ES - hS(T - T_0)$)[W], E: 輻射強度[W/m²]

S: タンク受熱面積(= $\frac{\pi D_0 H}{2} + \frac{\pi D_0^2}{4}$)[m²], h: 熱伝達率[W/m²/K]

t: 火災継続時間[s], D₀: タンク外径(20.012[m]), H: タンク円筒高さ(11.8[m]),

C: 熱容量(= $\rho_w C_{pw} V + \rho_s C_{ps} \left\{ \frac{(D_o^2 - D_i^2)\pi H}{4} + 2\pi \frac{D_o^2}{4} e \right\}$)[J/K]

D_i: タンク内径(20.0[m]), e: タンク最小板厚(0.006[m])

ρ_w : 水の密度(979.9 [kg/m³]) *¹, C_{pw}: 水の比熱(4186 [J/kg/K]) *¹, V: 水の体積[m³]

ρ_s : タンク壁材の密度(7860[kg/m³])*², C_{ps}: タンク壁材の比熱(473[J/kg/K]) *²

ΔT : 温度変化(= $T - T_0$)[°C], T₀: 初期温度(50[°C])

*¹伝熱工学資料第5版記載値(軽水)を復水貯蔵タンクの貯蔵水を使用する復水補給水系の系統最高使用温度66°Cとなるように線形補間した値

*²伝熱工学資料第5版記載値(キルド鋼)

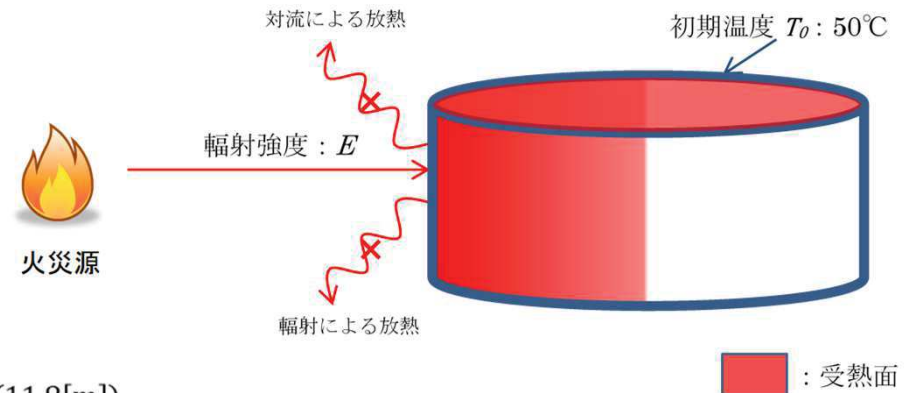
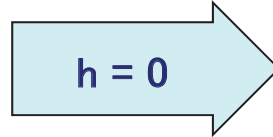


図 復水貯蔵タンクの温度評価概念図

- ここで、対流による熱伝達を考慮しない($h=0$)ため、熱量 Q は以下のように表せる。

$$Q = ES - hS(T - T_0)$$



$$Q = ES$$

- 以上より、比熱と熱容量の関係式の両辺を整理、積分することで以下の温度評価式を得る。

$$T = T_0 + \frac{Et \left(\frac{\pi D_o H}{2} + \frac{\pi D_o^2}{4} \right)}{\rho_w C_{pw} V + \rho_s C_{ps} \left\{ \frac{(D_o^2 - D_i^2)\pi H}{4} + 2\pi \frac{D_o^2}{4} e \right\}}$$

- 復水貯蔵タンクの温度評価においては下表の通り保守性を考慮している。

表 復水貯蔵タンクの温度評価における保守性

項目	保守性
熱伝達率 h [W/m ² /K]	・タンク表面の外気の対流による放熱を考慮せず、受熱面に対する輻射熱は全て蓄熱されるものとして評価している。
輻射強度 E [W/m ²]	・火災の発生から燃焼終了まで最大の輻射強度による一定の輻射を受けるものとして評価している。 ・タンクを覆う遮蔽壁、天井鋼板がなく、タンクが直接輻射を受けると仮定して評価している。

2. 指摘事項に対する回答(No.82) (1/3)

指摘事項

○防護対象施設について、防護する安全機能、防護の考え方、防護方法とその妥当性を網羅的に整理して提示すること。

回答

防護対象施設抽出の考え方

「**实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**(以下「**設置許可基準規則**」という。)」**第六条**においては、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象(地震及び津波を除く。)又は人為事象(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とされている。

外部火災の影響を受けた場合、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な設計上の要求事項を喪失し、安全性の確保が困難となるおそれがあることから、防護対象は「**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**」において安全機能を有する安全重要度分類のクラス1,クラス2及びクラス3に属する構築物, 系統及び機器を防護対象とする。

防護する安全機能

- ・発電用原子炉を停止するために必要な, 異常発生防止の機能, 又は異常の影響緩和の機能
- ・停止状態を維持するために必要な, 異常発生防止の機能, 又は異常の影響緩和の機能
- ・使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な, 異常の発生防止の機能, 又は異常の影響緩和の機能

外部事象防護対象施設

上述の機能を達成するために必要な構築物, 系統及び機器(クラス1, クラス2及び安全評価上その機能に期待するクラス3に属する構築物, 系統及び機器), 及びそれらを内包する建屋を「外部事象防護対象施設」とする。なお, 外部事象防護対象施設以外の安全施設を「その他の施設」とする。

防護の考え方

外部事象防護対象施設に対し、消火活動の防護手段を期待しない条件のもと、火元からの離隔で防護するため、想定される外部火災に対して熱影響評価、ばい煙等による影響評価を実施する。

その他の施設に対しては、原則として、防火帯により防護し、外部火災で損傷した場合であっても、代替手段等により、その安全機能を損なわない設計とする。

防護方法とその妥当性

外部火災からの防護方法

- 建屋に内包されている外部事象防護対象施設は、その安全機能を確保するため、建屋外壁により防護する。防護方法の妥当性を確認するため、建屋外壁の熱影響に対する耐性の評価及び危険距離等の評価により健全性を確認する。
- 屋外設置の外部事象防護対象施設は、その安全機能を確保するため、想定される火災源からの離隔距離を確保することにより防護する。防護方法の妥当性を確認するため、設備の熱影響に対する耐性の評価及び危険距離等の評価により健全性を確認する。

外部火災による二次的影響

- 外部事象防護対象施設のうち、外気を直接取り込む設備及び屋外に開口を有する設備に対して、ばい煙に対する安全機能への影響評価により健全性を確認する。
- 外部火災発生時に空調系を隔離する中央制御室等の居住性への影響評価により健全性を確認する。

外部事象防護対象施設の抽出結果

➤ 安全重要度分類から抽出した防護対象施設の抽出結果及び防護方法を下表に示す。

表 外部事象防護対象施設及び外部火災に対する防護方法

防護対象		対象施設	防護方法
外部事象防護対象施設	建屋内の外部事象防護対象機器	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉停止系 残留熱除去系ポンプ 高圧炉心スプレイポンプ 非常用ディーゼル発電機 原子炉補機冷却ポンプ等 	<ul style="list-style-type: none"> 防火帯内側に設置 原子炉建屋, 制御建屋, タービン建屋の建屋外壁による防護
	屋外設置の外部事象防護対象機器	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉補機冷却海水ポンプ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ, 排気筒, 復水貯蔵タンク, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水系ストレナ 	<ul style="list-style-type: none"> 防火帯内側に設置 離隔距離による防護
その他の施設		<ul style="list-style-type: none"> 発電機, 開閉所, 放射線監視設備(モニタリングポスト)等 	<ul style="list-style-type: none"> 防火帯内側に原則設置 屋内設備は建屋による防護 屋外設備は代替手段で機能を確認

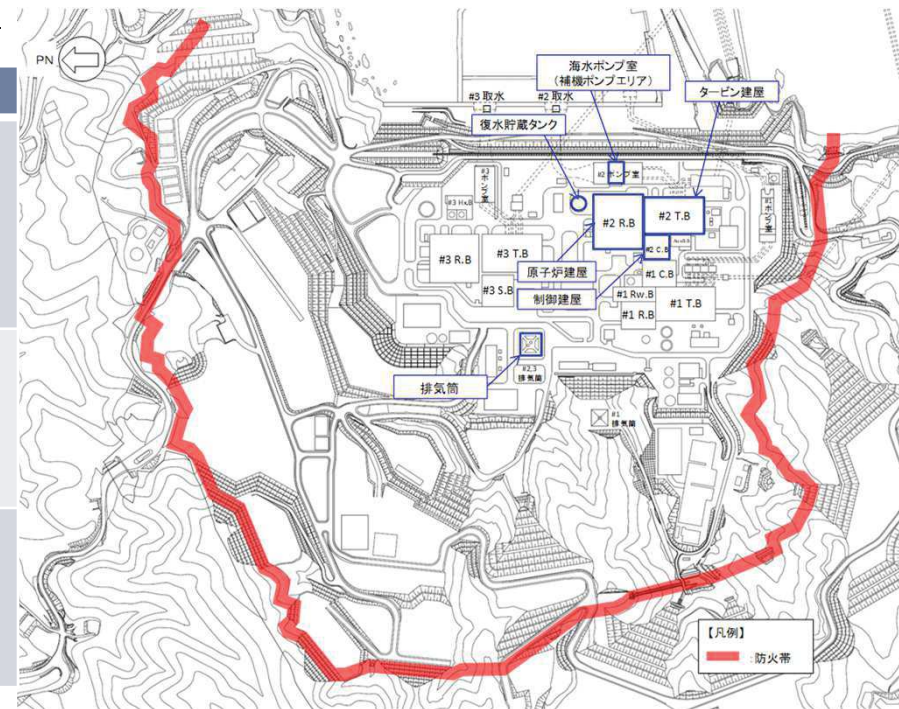


図 外部火災に対する評価対象施設配置

2. 指摘事項に対する回答(No.83) (1/5)

指摘事項

○航空機落下による火災影響評価の標的面積や離隔距離の考え方について、導出プロセスも含めて整理して提示すること。

回答

- ▶ 原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成25年6月19日原子力規制委員会決定)に従い、評価対象とする発電用原子炉施設を対象とし、航空機墜落による火災の評価に使用する離隔距離として、航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]以上になる範囲のうち発電用原子炉施設への影響が最も厳しくなる地点までの距離を導出している。(表1)
- ▶ 具体的には、「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(内規)」(平成21・06・25原院第1号)の航空機落下確率評価式に基づき、落下事故のカテゴリごとに航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する面積を求めることで離隔距離を導出している。

表1 落下事故のカテゴリごとの離隔距離

分類	民間航空機		自衛隊機又は米軍機		
	大型民間航空機	小型民間航空機	訓練空域外を飛行中		基地 - 訓練空域間往復時
			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	
対象航空機	B747-400	Do228-200	KC-767	F-15	F-2
離隔距離L[m]	85	44	111	21	25

離隔距離の導出の考え方

➤ 離隔距離は、以下の i. ~ ii. により導出する。

i. 航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積A'の算出

① 離隔距離の評価対象施設の標的面積Aの算出

- 離隔距離の導出過程で算出する航空機落下確率の評価のための標的面積Aを算出する。
- 標的面積Aは、評価対象施設の面積の合計値とする。(表2)

表2 標的面積

[単位:km²]

号炉	評価対象施設						合計 (標的面積A)
	原子炉建屋	制御建屋	タービン建屋	海水ポンプ室	復水貯蔵タンク	排気筒	
2号炉	0.00647	0.00164	0.00554	0.000370	0.000316	0.00123	0.0156

② 落下事故のカテゴリ分け

- 離隔距離の導出に当たり、評価対象とする航空機落下事故を、対象となる航空機の種類及び飛行形態を考慮し、以下のとおりカテゴリ分け(①~④)して落下確率を求めている。(表3)

表3 落下事故のカテゴリ

1) 計器飛行方式民間航空機	飛行場での離着陸時	—※1
	航空路を巡航中	①大型民間航空機
2) 有視界飛行方式民間航空機		②小型民間航空機
	3) 自衛隊機又は米軍機	③訓練空域内で訓練中 及び訓練空域外を飛行中
		③-2 その他の大型固定翼機, 小型固定翼機及び回転翼機※2
	④基地—訓練空域間往復時※3	

※1:女川原子力発電所は、仙台空港からの最大離着陸地点以遠に位置するため対象外。

※2:女川原子力発電所の上空には自衛隊機又は米軍機の訓練空域がないため、訓練空域外を飛行中の落下事故を評価対象とする。

※3:女川原子力発電所の近傍に、基地—訓練空域間の移動経路が存在することから評価対象とする。

③ 航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積 A' の算出

- 落下事故のカテゴリごとに標的面積 A に対する航空機落下確率 P_i を算出し、以下に示す(1)式により航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積 A' を算出する。

$$A' = \frac{10^{-7}}{P_i} \times A \cdots (1)$$

A' : 航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積[km²]

P_i : 落下事故のカテゴリごとの航空機落下確率[回/炉・年]

A : 標的面積[km²]

ii. 離隔距離の算出

- 各評価対象施設の外壁面から等距離の離隔をとった場合の、各評価対象施設に対する航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する面積の合計値が、落下事故のカテゴリごとに求めた標的面積 A' と等しくなる距離を離隔距離としている。
- 各評価対象施設の離隔距離 L は、対象となる施設の形状に応じ、以下に示す(2)式又は(3)式により算出する。
- すべての評価対象施設に対して求めた S_i 及び S_j の合計値が標的面積 A' となる L について解くことで離隔距離が得られる。(4)式)
- S_i 及び S_j の合計値の算出に当たっては、評価の保守性の観点から、面積が重複する部分については、それぞれの面積を積算している。

$$S_i = \pi L^2 + 2L(a_i + b_i) + a_i b_i \cdots (2)$$

$$S_j = \pi(R_j + L)^2 \cdots (3)$$

$$A' = \sum S_i + \sum S_j$$

$$= \sum \{ \pi L^2 + 2L(a_i + b_i) + a_i b_i \} + \sum \{ \pi (R_j + L)^2 \} \cdots (4)$$

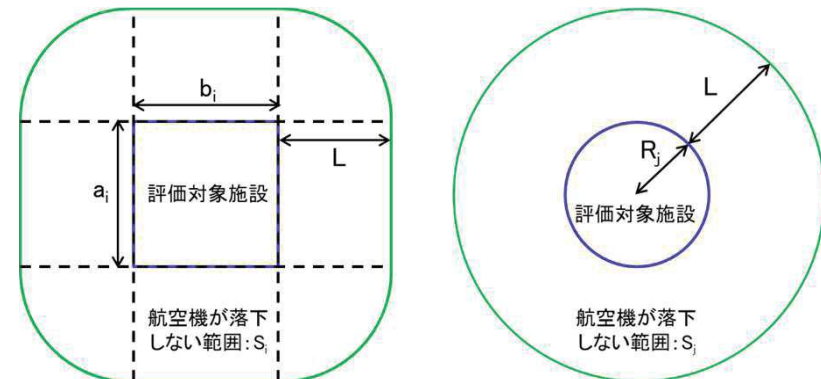


図1 離隔距離の概念図

2. 指摘事項に対する回答(No.83) (4/5)

航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積 A' の算出(大型民間航空機)

- ▶ 大型民間航空機の落下事故に係る評価を例として示す。
- ▶ 大型民間航空機の落下確率($P_c + P_v$)の算出結果(表4及び表5)より, 航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積 A' は, 以下のとおり $A' = 0.297393$ [km^2]となる。

$$A' = \frac{10^{-7}}{P_c + P_v} \times A = \frac{10^{-7}}{5.59 \times 10^{-12} + 5.24 \times 10^{-9}} \times 0.0156 = 0.297393$$

計器飛行方式民間航空機(航空路を巡航中)の落下確率(P_c)

$$P_c = \frac{f_c \cdot N_c \cdot A}{W}$$

- P_c : 対象施設への巡航中の航空機落下確率[回/年]
- N_c : 評価対象とする航空路等の年間飛行回数[飛行回/年]
- A : 発電用原子炉施設の標的面積 [km^2]
- W : 航空路幅 [km]
- $f_c = G_c / H_c$: 単位飛行時間当たりの巡航中の落下事故確率 [回 / (飛行回・km)]
- G_c : 巡航中事故件数 [回]
- H_c : のべ飛行距離 [飛行回・km]

有視界飛行方式民間航空機の落下確率(P_v)

$$P_v = \frac{f_v}{S_v} (A \cdot \alpha)$$

- P_v : 対象施設への航空機落下確率[回/年]
- f_v : 単位年あたりの落下事故率[回/年]
- S_v : 全国土面積 (=37.2万 [km^2])
- A : 発電用原子炉施設の標的面積 [km^2]
- α : 対象航空機の種類による係数

表4 落下確率の算出結果(計器飛行方式民間航空機)

	女川原子力発電所2号炉
対象航空路	直行経路 MIYAKO(MQE)-IWAKI(IXE)
N_c	182.5
A	0.0156
W	27
f_c	$0.5 / 9,439,243,077 = 5.30 \times 10^{-11}$
P_c	5.59×10^{-12}

表5 落下確率の算出結果(有視界飛行方式民間航空機)

	女川原子力発電所2号炉
f_v	大型固定翼機 0.5/20=0.025 大型回転翼機 2/20=0.1
S_v	372,000
α	大型固定翼機, 大型回転翼機:1
A	0.0156
P_v	5.24×10^{-9}

離隔距離の算出(大型民間航空機)

- ▶ 大型民間航空機については、航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]に相当する標的面積 $A' = 0.297393$ [km²]及び評価対象施設の寸法(表6)より、以下の式をLについて解くことにより、離隔距離Lは $L = 85$ [m]と求められる。(図2)
- ▶ なお、熱影響評価に当たっては、評価の保守性の観点から、評価対象施設全体に対する離隔距離が以下の式より求めた各評価対象施設に対する離隔距離より大きくなる場合であっても、以下の式より求めた各評価対象施設に対する離隔距離を用いている。

$$A' = \sum S_i + \sum S_j = \sum \{\pi L^2 + 2L(a_i + b_i) + a_i b_i\} + \sum \{\pi(R_j + L)^2\}$$

表6 評価対象施設ごとの寸法及び標的面積

評価対象施設	寸法[m]			標的面積 S _i , S _j [km ²]
	東西方向 (a _i)	南北方向 (b _i)	半径 (R _j)	
制御建屋	40	41		0.0386296
タービン建屋	57.7	96		0.0549964
原子炉建屋	84	77		0.0571771
海水ポンプ室	原子炉補機冷却海水ポンプA系	8.35	21.2	0.0283433
	原子炉補機冷却海水ポンプB系	7.95	21.2	0.0282662
	高圧炉心スプレィ補機冷却海水ポンプ	5.45	4.55	0.0248384
排気筒	35	35		0.0288137
復水貯蔵タンク			10.022	0.0363282
合計値				0.297393

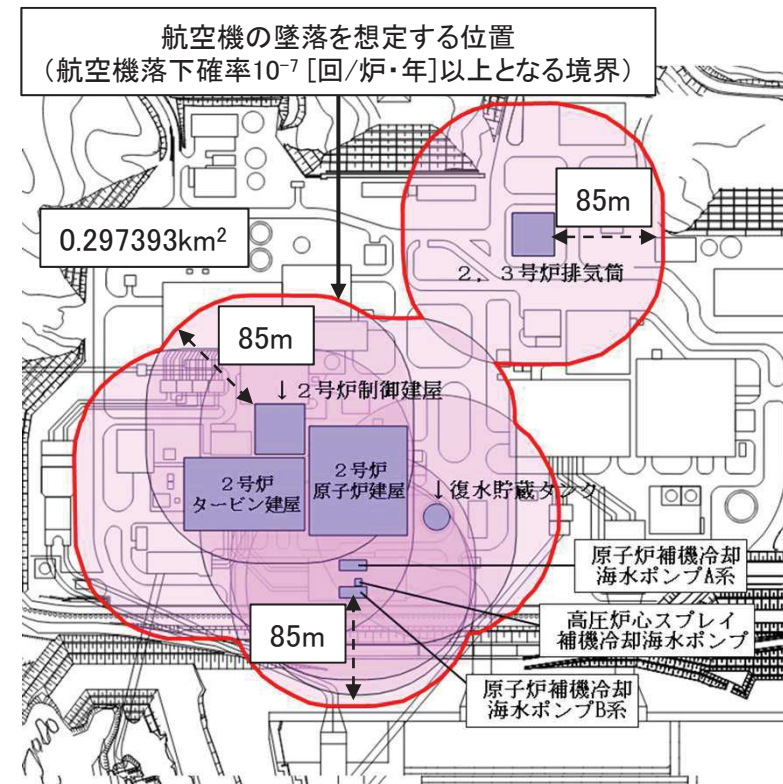


図2 評価対象施設全体の離隔距離及び標的面積(大型民間航空機)

指摘事項

○火災による有毒ガス影響評価について、有毒ガス濃度に対する風速の影響を整理し、保守的な評価となっていることを提示すること。

回答

- ・火災による二次的影響評価のうち、中央制御室に対する有毒ガス影響評価には有風時プルーム式を用いて有毒ガス濃度を算出する。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left(\exp\left\{-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right)$$

C_{xyz} : 濃度[ppm] σ_y : 拡散パラメータ(水平方向)[m] z : 発生源と給気口との鉛直方向離隔距離[m]
 u : 風速[m/s] σ_z : 拡散パラメータ(鉛直方向)[m] H_e : 排煙上昇高度[m]
 Q : 有毒ガス発生量[Nm³/s] y : プルーム軸からの距離[m]

(出典：窒素酸化物総量規制マニュアル，公害研究対策センター)

- ・評価にあたって、火災により発生する有毒ガスを給気口に当たるようにするため、火災による排煙上昇高度 H_e が、給気口高さと同様にするための風速をBriggsの排煙上昇過程式から設定する。

$$H_e = 1.6F^{1/3} \cdot x^{2/3} \cdot u^{-1} \quad \rightarrow \quad u = 1.6F^{1/3} \cdot x^{2/3} \cdot H_e^{-1}$$

H_e : 排煙上昇高度[m] F : 排熱フラックス[m⁴/s³]
 u : 風速[m/s] x : 発生源と給気口との離隔距離[m]

- ・有毒ガス濃度が最大となる航空機(F-15)の墜落による火災において、有風時プルーム式を用いて設定風速を変動させた場合の有毒ガス濃度への影響について評価した。

2. 指摘事項に対する回答(No.84) (2/4)

有毒ガス濃度評価方法

- ・以下式に基づき有毒ガス濃度評価を実施
- ・大気安定度は風速によって変動するため、安定度が変更となった場合には拡散パラメータを変更

有風時プルーム式の主軸項と指数関数項の算出

- ・風速による濃度への影響を確認するため、有風時プルーム式の項目(主軸項と指数関数項)の風速による変化を確認する

$$C_{xyz} = \underbrace{\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}}_{\text{主軸項}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \underbrace{\left(\exp\left\{-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right)}_{\text{指数関数項}}$$

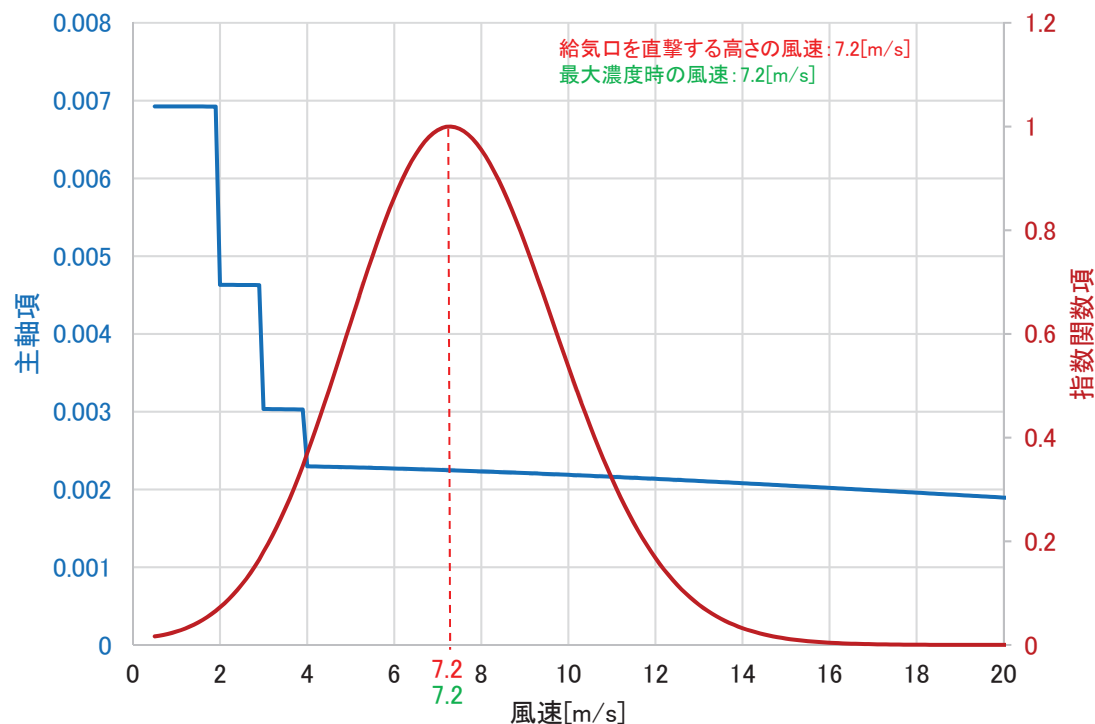
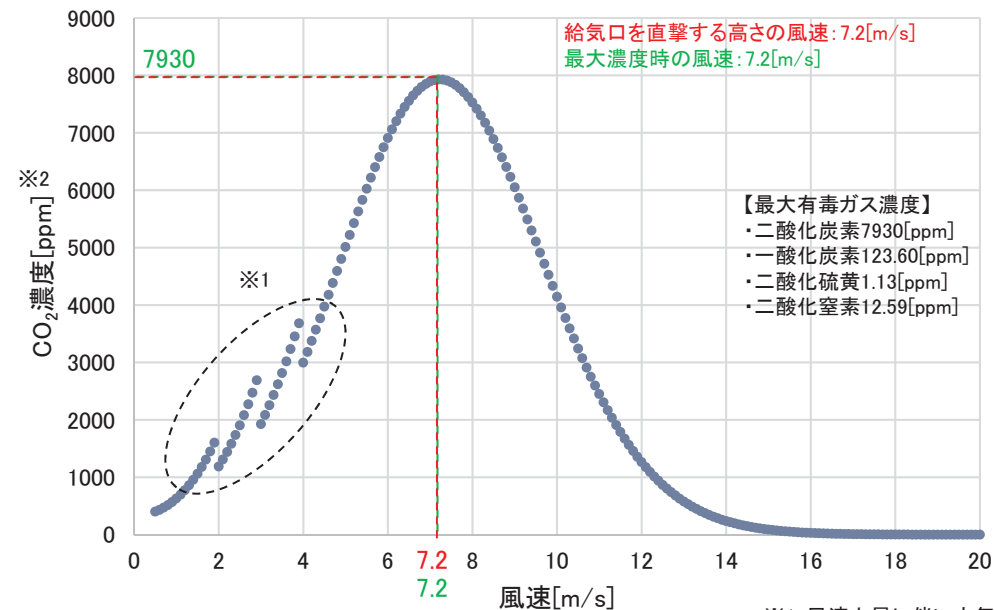


図 プルーム式の主軸と指数関数項風速の関係

有毒ガス濃度評価結果

- ・有毒ガス濃度が最大となる航空機(F-15)の墜落による火災において、風速を変動させて評価した結果、給気口と排煙上昇高度が同じ高さとなる風速7.2[m/s]が最大の濃度となることを確認した。



※1: 風速上昇に伴い大気安定度を変更したことによる変動

※2: CO₂以外の有毒ガス濃度も同様の傾向である。

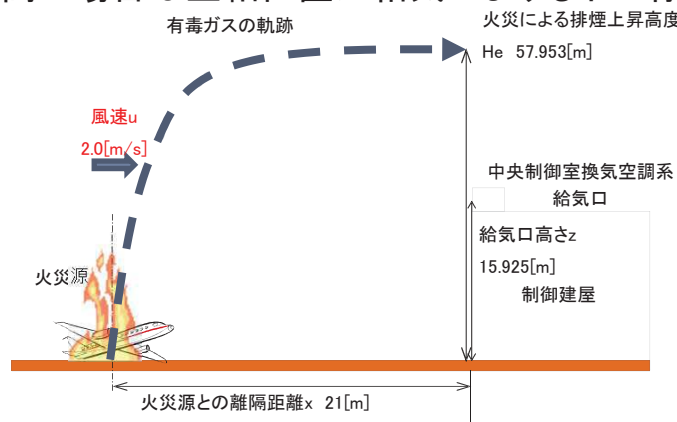
図 有毒ガス濃度の確認結果(CO₂)

- ・なお、航空機(F-15)以外の火災源において同様に評価した結果、設定風速が著しく高い場合には、給気口を直撃する風速よりも低い風速にて、最大濃度が算出されたが、いずれの場合においても、判定基準であるIDLH値以下であることを確認した。

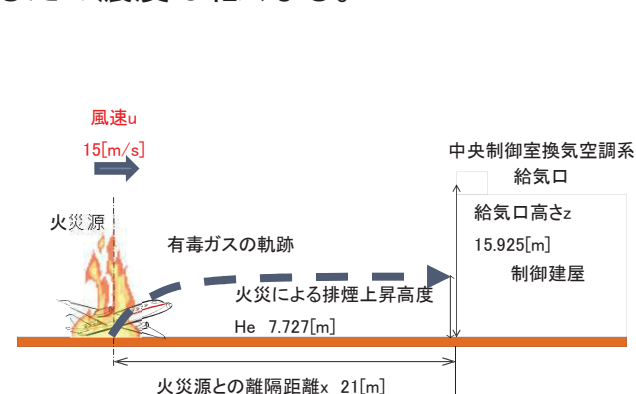
2. 指摘事項に対する回答(No.84) (4/4)

風速による影響について

拡散評価はガウス分布により、主軸となるところで最大濃度となる。給気口に直撃となる風速よりも風速が低い場合は、主軸位置が給気口よりも上空となるため濃度が低くなり、直撃する風速よりも風速が高い場合は主軸位置が給気口よりも下に存在することとなるため濃度は低くなる。



風速が低い場合の評価概念図



風速が高い場合の評価概念図

有風時プルーム式に対する考察

- 評価式の赤枠箇所は指数関数となっており、排煙上昇高度 H_e と給気口との鉛直離隔距離 z が一致する付近において最大となり、緑枠箇所(主軸)との積を求めることにより有毒ガス濃度が最大となる。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left(\exp\left\{-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right)$$

表 風速変動による評価結果

風速 u [m/s]	排煙上昇高度 H_e [m]	有毒ガス濃度(CO ₂) [ppm]
2.0	57.953	1,188
7.2	16.098	7,930
15	7.727	89

風速が高い条件に対する適用性について

- 有風時プルーム式は石油コンビナート施設からの拡散評価や大気汚染の予測シミュレーションに用いられる一般的な評価方法である。
- 女川2号炉の評価では、一部の火災源では風速の高い条件を設定しているが、評価式には高風速条件への制限はなく、給気口において最大濃度となる風速 u を設定することで、保守性をもたせた評価としている。また、Briggsの式より算出した風速が著しく高い風速となる場合には拡散状況が変化するため、感度解析により最大濃度を算出する。

指摘事項

○火災による熱影響評価について、評価結果の算出過程における不確かさや、許容値に対する裕度など、設計余裕の考え方を整理して提示すること。
 (許容値に対して裕度の小さい評価結果となった、DG(A)制御盤室の内気温度評価及び2号炉PLR-VVVF変圧器火災の熱影響評価結果に対する指摘事項)

回答

DG(A)制御盤室内気温度評価について

- 室内初期温度は、火災が起こる前の室内熱負荷と空調による除熱の熱容量がバランスする温度を初期温度として設定している。
- DG(A)制御盤室内気温度評価では、評価にあたって、換気風量、吹出温度に評価上の保守性を見込んでいる。(表1)

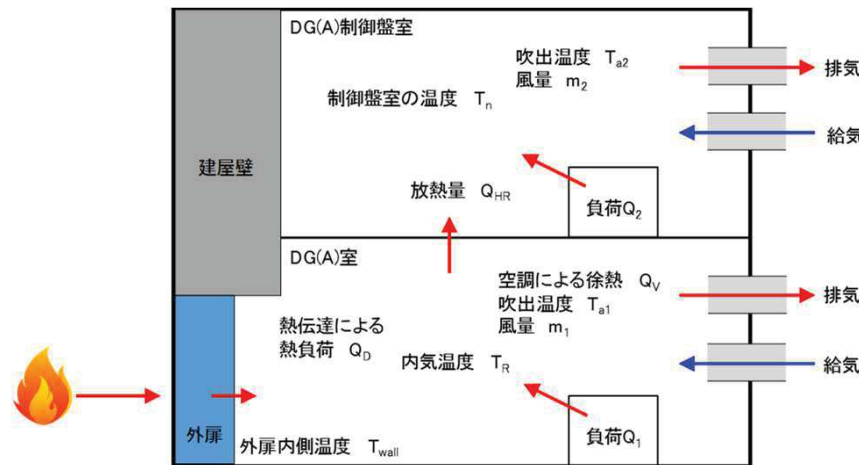


図1 DG(A)制御盤室内気温度評価概念図

《DG(A)制御盤室の内気温度の算出式》

$$T_n = T_2 + \frac{Q_{HR}}{m_2 \cdot C_{p2}}$$

《室内初期温度の算出式》

$$T_2 = \frac{Q_2}{m_2 \cdot C_{p2}} + T_{a2}$$

評価上、保守性を見込んでいるパラメータ

T_n : DG(A)制御盤室温度[°C]

T_2 : 初期温度[°C]

Q_{HR} : DG(A)室から DG(A)制御盤室への放熱量[W]

Q_2 : 室内熱負荷(= 3256.4[W])

m_2 : 換気風量[kg/s]

C_{p2} : 空気の比熱(= 1007[J/kg/K])

T_{a2} : 吹出温度(換気給気温度)(= 20[°C])

表1 DG(A)制御盤室初期温度設定における保守性

項目	保守性
換気風量 m_2 [kg/s]	・保守的に換気風量として設計風量(設計上必要となる最低限の換気風量の設定値)を用いている。
吹出温度 T_{a2} [°C]	・空調機の給気温度を管理する制御範囲のうち、最高温度としている。

- ここで、最も温度評価結果に影響が出る換気風量について、保守的に設計風量(設計上必要となる最低限の換気風量の設定値)から求めた初期温度を用いた温度評価結果と実際のDG(A)制御盤室の換気風量から求めた初期温度を用いた温度評価結果とを比較し、保守性を確認する。確認結果を表2に示す。

表2 DG(A)制御盤室の換気風量の設定による温度評価結果の比較

パラメータ	換気風量 m_2 [kg/s]	室内初期温度 T_0 [°C]	温度評価結果 T_n [°C]	許容温度 [°C]
設計風量を用いた場合	0.178	38.1	39.9	40
実際の換気風量を用いた場合	0.99	23.3	24.6	40

- 以上より、DG(A)制御盤室の内気温度評価は、不確かさを考慮しても十分に保守性を有していることを確認した。

2号炉PLR-VVVF変圧器火災の熱影響評価について

- 2号炉PLR-VVVF変圧器火災の建屋に対する熱影響評価では、温度評価にあたって、建屋外壁の建材であるコンクリートの熱吸収率及び外壁の初期温度の設定に保守性を見込んでいる。(表3)
- 一次元の非定常熱伝導方程式の放熱を考慮した境界条件により、建屋外壁の表面温度は下式より求められる。

<一次元非定常熱伝導方程式>

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

T: 建屋温度[°C], x: コンクリート深さ, t: 時間

λ: コンクリート熱伝導率 (1.74 [W/m/K])

<上式が満たす放熱を考慮した境界条件>

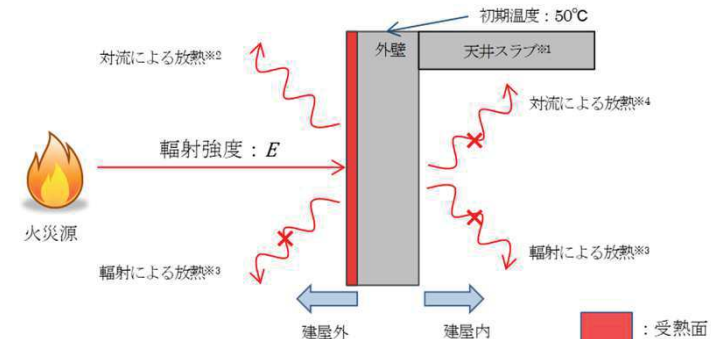
$$h(T - T_0) - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = E \quad (x = 0) \quad \begin{array}{l} E: \text{輻射強度}[W/m^2] \\ T_0: \text{初期温度}[°C] \end{array}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = L) \quad \begin{array}{l} h: \text{熱伝達率}[W/m^2/K] \\ L: \text{コンクリート厚さ}[m] \end{array}$$

<境界条件における熱伝導方程式の一般解>

$$T = T_0 + \left(\frac{\varepsilon E}{h} \right) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - \exp \left(\frac{h}{\lambda} x + \frac{h^2}{\lambda^2} at \right) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h}{\lambda} \sqrt{at} \right) \right\} \right]$$

T: 外壁表面温度(°C), T_0 : 初期温度(50°C), E: 輻射強度(W/m²), h: コンクリート熱伝達率(17 W/m²/K)
 α : コンクリート温度伝導率(= $\lambda / \rho C_p$)(m²/s), ρ : コンクリート密度(2,400 kg/m³), C_p : コンクリート比熱(963 J/kg/K)
 λ : コンクリート熱伝導率(1.74 W/m/K), x: コンクリート深さ(外表面のため0mで算出)
t: 燃焼継続時間(s), ε : コンクリートの熱吸収率[-]
(出典: 伝熱工学, 東京大学出版会)



※1: 天井スラブは外壁よりも火災源からの距離が遠いことから、天井スラブの評価は外壁の評価に包絡されるものとしている。
 ※2: 変圧器火災におけるコンクリート表面温度評価にあたっては、外壁表面における対流による放熱を考慮するものとしている。
 ※3: 変圧器火災におけるコンクリート表面温度評価にあたっては、外壁表面及び外壁内表面における輻射による放熱を考慮しないものとしている。
 ※4: 変圧器火災におけるコンクリート表面温度評価にあたっては、外壁内表面における対流による放熱を考慮しないものとしている。

図2 対流による放熱を考慮した建屋外壁温度評価概念図

評価上、保守性を見込んでいるパラメータ

表3 2号炉PLR-VVVF変圧器火災の熱影響評価における保守性

項目	保守性
熱吸収率 ε [-]	・熱吸収率を考慮せず，受熱面に対する輻射熱は全て蓄熱されるものとしている。
初期温度 T_0 [°C]	・発電所周辺の気象台における過去10年間の最高気温36.0°Cにおける建屋外壁面の日射の影響を考慮した温度44°Cを切り上げた値である50°Cを初期温度としている。
建屋外壁内表面(x=L)の境界条件	・建屋外壁内表面から建屋内への対流及び輻射による放熱を考慮しない条件にて評価している。

➤ここで，建屋外壁はコンクリートの熱吸収率を考慮しない評価をしていることから，コンクリートの熱吸収率を考慮した評価結果と比較し，保守性を確認する。確認結果を表4に示す。

表4 コンクリートの熱吸収率の設定による原子炉建屋外壁の温度評価結果の比較

パラメータ	熱吸収率 [-] ε	温度評価結果[°C] T	許容温度[°C]
コンクリートの熱吸収率を考慮しない場合	1.0	198	200
コンクリートの熱吸収率を考慮する場合	0.94	189	200

➤ 以上に加えて，初期温度及び境界条件についても裕度を見込んでおり，2号炉PLR-VVVF変圧器火災の評価は，不確かさを考慮しても十分に保守性を有していることを確認した。

2. 指摘事項に対する回答(No.86) (1/3)

指摘事項

○熱影響評価式において、コンクリート深さ x の扱いについて整理して示すこと。
(4条耐震設計方針の審査会合における鉄筋コンクリート躯体に対する乾燥収縮ひび割れの外部火災評価への影響についての指摘事項)

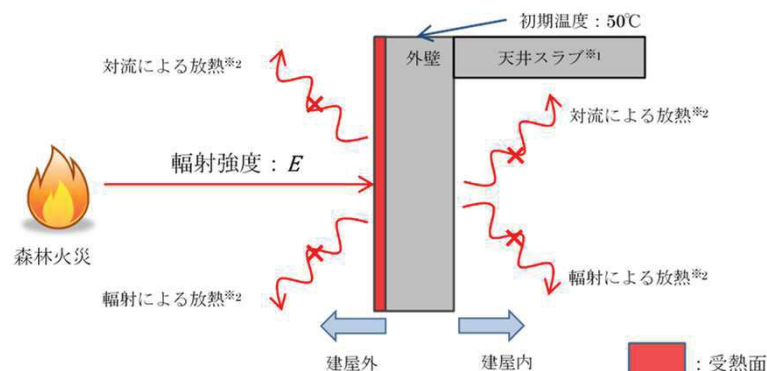
回答

- 外部火災の熱影響評価では、火災の輻射熱により評価対象施設の外壁、天井スラブの健全性が維持される温度より危険輻射強度を算出し、火災時の短期温度上昇を考慮した場合において、想定する火災の輻射強度が危険輻射強度を越えないことを、危険距離及び離隔距離から確認している。
- 危険輻射強度を用いる熱影響評価には森林火災、敷地外危険物貯蔵施設、燃料輸送車両及び漂流船舶の火災の影響評価があるが、漂流船舶の火災の評価が判定基準に対して最も厳しい評価となるため、漂流船舶の火災について危険輻射強度への影響を確認する。
- 建屋外壁コンクリートの評価はコンクリート躯体の構造的な形状の担保を目的としていることから、非定常状態におけるコンクリート表面について評価しており、十分に厚い固体の表面が放射熱で加熱される場合の温度分布は以下の一次元の熱伝導方程式により表すことができる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

なお、本評価においては、温度算出概念図に示すとおり保守的に放熱を考慮しないことから、外表面($x=0$)及び内表面($x=L$)における境界条件は次のとおりとしてコンクリートの厚みを考慮している。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = E \quad (x = 0), \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = L)$$



※1: 天井スラブは外壁よりも火災源からの距離が遠いことから、天井スラブの評価は外壁の評価に包絡される
※2: コンクリート表面温度評価にあたっては、対流及び輻射による放熱は考慮しないものとした

一次元非定常熱伝導方程式による温度算出概念図

2. 指摘事項に対する回答(No.86) (2/3)

- 火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度で外壁が昇温されると、漂流船舶の火災の影響評価では以下の温度評価式により、外壁表面の温度 T が 200°C となる輻射強度 E を危険輻射強度として算出できる。
- このうち、コンクリート躯体が関係する物性パラメータは、赤字で示すものであることから、これらのパラメータに対する乾燥収縮ひび割れの影響を確認する。
- ここでコンクリート深さについては、外壁表面($x=0$)が輻射熱による温度上昇が最大となるため外壁表面($x=0$)における乾燥収縮ひび割れの影響を評価する。
- また、コンクリート温度伝導率 α は、熱伝導率 λ 、比熱 c_p および密度 ρ と関連するため、その影響を試算により確認する。

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

T : 外壁表面温度(200°C), T_0 : 初期温度($50[^{\circ}\text{C}]$),

E : 危険輻射強度 $[\text{W}/\text{m}^2]$, t : 火災継続時間 $[\text{s}]$,

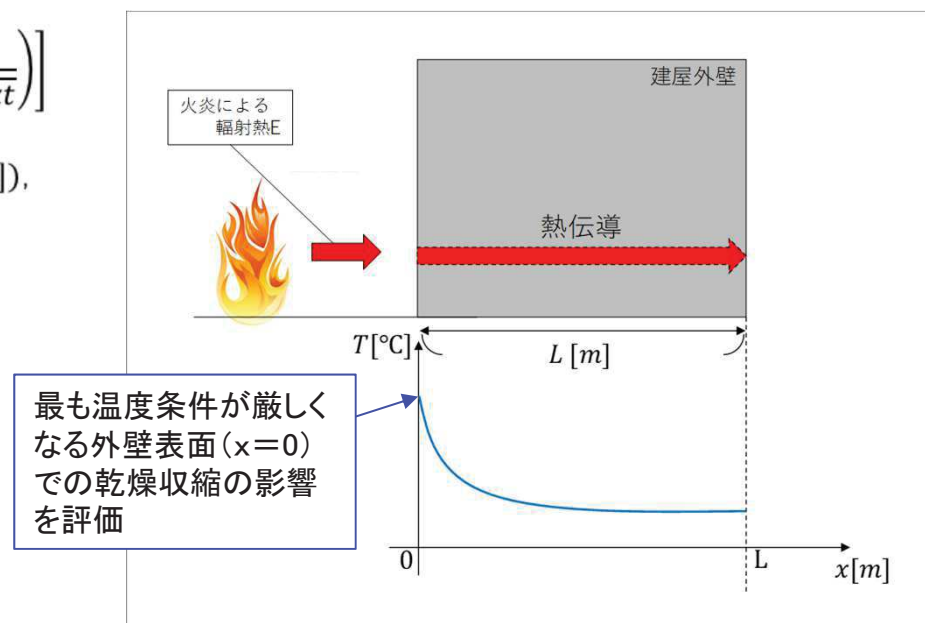
x : コンクリート深さ $[\text{m}]$

α : コンクリート温度伝導率 $\left[\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \right] [\text{m}^2/\text{s}]$,

λ : コンクリート熱伝導率 ($1.74 [\text{W}/\text{m}/\text{K}]$),

c_p : コンクリート比熱 ($963 [\text{J}/\text{kg}/\text{K}]$),

ρ : コンクリート密度 ($2,400 [\text{kg}/\text{m}^3]$)



建屋外壁の熱伝導と温度分布の概念図

乾燥収縮ひび割れが建屋外壁の熱影響評価に与える影響について

【試算条件】

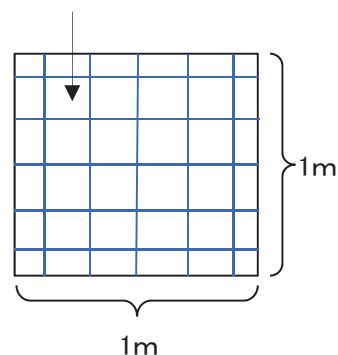
女川2号原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果では、ひび割れ密度(1m当たりのひび割れ本数)は4~5程度、乾燥収縮ひび割れの平均ひび割れ幅は0.05~0.07mm程度であり、ひび割れ幅0.2mm以下のひび割れが99.3%であったため、試算条件として保守的に乾燥収縮ひび割れは、0.2mmのひび割れが1m当たり5本、縦にも横にも貫通して入ると仮定する。

上記の仮定に基づき、密度を体積比で算定すると0.2%低下する。熱伝導率および比熱は、0.2%程度の密度の低下では変動量は極めて小さいと考えられることから変化しないと仮定する。

【影響検討結果】

最も評価が厳しい漂流船舶の火災による原子炉建屋の危険輻射強度への影響について検討を行ったところ、危険輻射強度 $1086.9\text{W}/\text{m}^2$ に対して密度低下を考慮すると $1085.8\text{W}/\text{m}^2$ であり、 $1.1\text{W}/\text{m}^2$ の変動であることから、保守的な条件を仮定しても、乾燥収縮ひび割れによる影響が僅かであることから、評価結果に影響を与えないことを確認した。

0.2mmのひび割れが1m当たり5本、
縦にも横にも貫通して入ると仮定



単位面積当たりのひび割れによる欠損面積 = 0.002m^2
[(幅) $0.0002\text{m} \times$ (長さ) $1\text{m} \times 5\text{本} \times 2\text{方向}$]

単位体積当たりのひび割れによる欠損体積 = 0.002m^3
[(面積) $0.002\text{m}^2 \times$ (壁厚) 1m]

建屋外壁にひび割れが入った場合の試算条件