

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外外火 21 R1
提出年月日	令和4年6月30日

設工認に係る補足説明資料

外部火災の影響評価における
放熱量の設定の考え方について

目 次

1. 概要	1
2. 外部火災の影響評価について	1
2.1 外部火災による影響評価における放熱の考え方について	1
2.2 放熱量を設定し評価する外部火災について	2
2.2.1 評価対象毎の放熱量の設定について	3

別添－1 熱伝達率の設定の考え方について

■については商業機密の観点から公開できません。

1. 概要

本資料は、再処理施設及び MOX 燃料加工施設に対する第 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外部火災の影響を考慮する施設に対する外部火災防護における評価方針及び評価結果を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「IV-1-1-1-4-3 外部火災への配慮が必要な施設の評価方針」
- ・再処理施設 添付書類「IV-1-1-1-4-4 外部火災防護における評価結果」
- ・MOX 燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-3 外部火災への配慮が必要な施設の評価方針」
- ・MOX 燃料加工施設 添付書類「V-1-1-1-4-4 外部火災防護における評価結果」

外部火災としては、外部火災ガイドを参考として、森林火災、石油備蓄基地火災、石油備蓄基地火災と森林火災の重畳、敷地内の危険物貯蔵施設等の火災、敷地内の危険物貯蔵施設等の爆発、航空機墜落による火災及び航空機墜落による火災と敷地内の危険物貯蔵施設等の爆発の重畳を対象として熱影響評価を行い、外部火災防護対象施設等が、安全機能を損なわないことを評価により確認することとしている。

この際、放熱による効果は考慮しない評価と放熱による効果を考慮した評価があることから、本資料では、この設定の考え方について補足説明する。

本資料で示す外部火災の評価に用いる放熱量の設定については、再処理施設及び MOX 燃料加工施設の後次回の設工認申請並びに廃棄物管理施設の設工認申請において対象とする施設に対しても適用するものである。

2. 外部火災の影響評価について

外部火災の影響評価においては、基本的に放熱による効果は考慮せず評価する。ただし、厳しい火災条件を想定しており放熱を見込まないと評価結果の現実との乖離が大きくなる火災又はその評価方法から放熱を考慮する必要のある火災については、放熱量を考慮して評価を行う。

放熱量を考慮した評価を行う場合には、評価対象となる施設の設置環境及び火災源からの熱影響を考慮するとともに、評価対象となる施設の違いを踏まえ、放熱量を適切に設定する。

2.1 外部火災による影響評価における放熱の考え方について

外部火災の影響評価において考慮可能な放熱としては、大きく「輻射による放熱」及び「対流による放熱」に分類される。

設置環境に応じて、「輻射による放熱」及び「対流による放熱」を適切に組み合わせ、放熱量を設定する。

2.2 放熱量を設定し評価する外部火災について

外部火災としては、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド(平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会)」(以下「外部火災ガイド」という。)を参考として、以下の事象を対象として影響評価を実施する。

- (1) 森林火災
- (2) 近隣の産業施設の火災
- (3) 近隣の産業施設の火災及び森林火災の重畳
- (4) 敷地内の危険物貯蔵施設等の火災
- (5) 航空機墜落による火災

上記の外部火災のうち、「(5) 航空機墜落による火災」の一部の屋外の外部火災防護対象施設の評価においては、建屋等の直近において航空機墜落による火災が発生した場合を想定する厳しい火災条件としており、放熱を見込まない評価とすると、現実との乖離が大きくなる。

「(2) 近隣の産業施設の火災」及び「(3) 近隣の産業施設の火災及び森林火災の重畳」の石油備蓄基地火災の影響評価においては、燃焼継続時間を設定することが困難なため、建屋外壁の表面における入熱量と放熱量の釣り合いから熱影響を算出する定常計算を行うこととしているが、この評価において、火災源からの輻射による受熱のみでは、評価対象の温度が定常状態に至らず評価ができないことから、放熱量を設定し評価する。

第 2.2-1 表 影響評価を実施する事象と放熱の設定

影響評価を実施する事象	放熱の設定
(1) 森林火災	放熱を考慮しない
(2) 近隣の産業施設の火災(石油備蓄基地火災)	定常計算を行うことから放熱を考慮する
(3) 近隣の産業施設の火災(石油備蓄基地火災)及び森林火災の重畳	定常計算を行うことから放熱を考慮する
(4) 近隣の産業施設の火災(敷地内の危険物貯蔵施設等の火災)	放熱を考慮しない
(5) 航空機墜落による火災	現実との乖離が大きくなることから放熱を考慮する ※一部の屋外に設置する外部火災防護対象施設が対象

2.2.1 評価対象毎の放熱量の設定について

前項 2.2 にて放熱を設定するとした事象毎に評価対象の組合せによる放熱量の設定の考え方を、以下に示す。

放熱量については、文献の熱伝達率を参照した上で、評価対象と周囲環境との温度差を考慮し放熱量を設定することを基本とするが、評価対象の違い、火災源等の特徴を踏まえ、火災及び評価対象の組合せごとに放熱量を設定する。

火災及び評価対象の組合せ毎の放熱の効果、熱伝達率等の設定を、第 2.2.2-1 表に示す。

(1) 「(2) 近隣の産業施設の火災(石油備蓄基地火災)」の放熱量

a. 建屋

石油備蓄基地火災の建屋の評価については、屋外環境に設置され、「輻射による放熱」及び「対流による放熱」が期待できることから、これらの放熱を考慮する。

放熱量については、「日本機械学会・伝熱工学資料 改訂第 5 版・2009.」(以下「伝熱工学資料」という。)の鉛直平板周りの自然対流熱伝達の式を用い熱伝達率を求め、評価対象と周囲環境との温度差を考慮し算出する放熱量を設定する。

b. 危険物貯蔵施設等

屋外に設置される危険物貯蔵施設等は、屋外環境に設置され、「輻射による放熱」及び「対流による放熱」が期待できることから、これらの放熱を考慮する。

これら放熱については、「空気調和・衛生工学便覧 第 14 版 3 空気調和設備編」(以下「便覧」という。)から、当該文献の中で最も保守的な夏場の熱伝達率 $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を参照し、放熱量を設定し評価する。熱伝達率 $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ の設定の考え方を、別添 - 1 に示す。

(2) 「(3) 近隣の産業施設の火災(石油備蓄基地火災)及び森林火災の重畳」の放熱量

前述の(1) 「(2) 近隣の産業施設の火災(石油備蓄基地火災)」の放熱量」と同じ放熱量を考慮する。

(3) 「(5) 航空機墜落火による火災」の放熱量

a. 一部の屋外の外部火災防護対象施設

屋外に設置される外部火災防護対象施設は、屋外環境に設置され、「輻射による放熱」及び「対流による放熱」が期待できることから、これらの放熱を考慮する。

これら放熱については、「空気調和・衛生工学便覧 第 14 版 3 空気調和設備編」(以下「便覧」という。)から、当該文献の中で最も

保守的な夏場の熱伝達率 $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を参照し、放熱量を設定し評価する。熱伝達率 $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ の設定の考え方を、別添-1 に示す。

また、当該施設を構成する設備において、原動機等の冷却ファンを有する設備及び遮熱板内等に囲われ周囲設備との温度差を見込めない設備は、当該設備の冷却機能及び設置環境を考慮した熱伝達率を考慮する。

b. 必要離隔距離の評価により防護する設備

必要離隔距離の評価により防護する設備については、前項 a. と同様、熱伝達率の $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ が期待できるが、必要離隔距離を保守的に広く取るため、設計裕度を考慮して、 $12.5\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮する。

熱伝達率 $12.5\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ の設定の考え方を、別添-1 に示す。

第 2.2.2-1 表 火災及び評価対象の組合せ毎の放熱の効果，熱伝達率等の設定

外部火災	評価対象	考慮する放熱の効果	適用する熱伝達率，評価式
石油備蓄基地火災	建屋	・「輻射による放熱」	輻射伝熱計算の式 (放熱量の評価式)
		・「対流による放熱」	鉛直平板周りの自然対流熱伝達の式 (熱伝達率の評価式)
	危険物貯蔵施設	・「輻射による放熱」 ・「対流による放熱」	$17 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$
航空機墜落火災	一部の屋外の外部火災防護対象施設	・「輻射による放熱」 ・「対流による放熱」	$17 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}^{*1}$
	必要離隔距離の評価により防護する設備	・「輻射による放熱」 ・「対流による放熱」	$12.5 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$

注記 *1：当該施設の冷却機能及び設置環境の考慮が必要な場合は考慮する。

以上

令和4年6月30日 R1

別添－1

熱伝達率の設定の考え方について

目 次

1.	熱伝達率の設定の考え方について……………	1
1.1	屋外施設で考慮する熱伝達率……………	1
1.2	離隔距離表の設計に用いる熱伝達率について……………	5

1. 熱伝達率の設定の考え方について

石油備蓄基地火災及び航空機墜落火災の発生時における建屋及び屋外設備の柱・梁面、タンク表面等への熱影響の評価において、放熱量を設定するために熱伝達率を考慮する必要がある。

これらの熱伝達率については、空気調和・衛生工学便覧を参考に、屋外設備の一般的な輻射及び対流の熱伝達率の値 $23\text{W}/\text{m}^2/\text{K} \sim 17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ のうち厳しい値となる $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ とし、 $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ のうち、輻射成分は $6\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ 、対流成分は $12\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ とした。これらの値の火災時で想定される高温条件への適用性について以下に示す。

なお、輻射成分又は対流成分は、当該設備の冷却機能や設置環境に応じて適切に組み合わせる。

また、離隔距離表に用いる熱伝達率については、離隔距離の設計裕度として $12.5\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を用いることとした。この妥当性についても以下に示す。

第1図 空気調和衛生工学便覧*1の抜粋

表 17・19 外表面熱伝達率の設計負荷計算用数値¹⁾
[W/(m²・K)]

	期別	放射 α_r	対流 α_c	総合 α_o
垂直外壁面	冬	5	19	23
	夏	6	12	17
屋根面	冬	12	23	35
	夏	6	17	23
上げ裏面	冬	5	13	17
	夏	6	12	17

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

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

1.1 屋外施設で考慮する熱伝達率

(1) 輻射放熱について

輻射放熱は、一般的に以下の式に基づき算出される。

$$Q = \sigma \varepsilon A (T_i^4 - T_a^4) \cdots \text{(式 1-1)}$$

A : 受熱面 [m²]

T_a : 雰囲気温度 [K] (= 37°C)

T_i : 鋼材の温度 [K]

ε : 鋼材の輻射率 [-]

σ : ステファン・ボルツマン定数 [W/(m²・K⁴)] (= 5.67×10^{-8})

(伝熱工学資料 改訂第5版 p. 139)

熱伝達率は、以下の式により求められる。

$$h = Q / [A (T_i - T_a)] \dots (式 1-2)$$

h : 熱伝達率[W/m²/K]

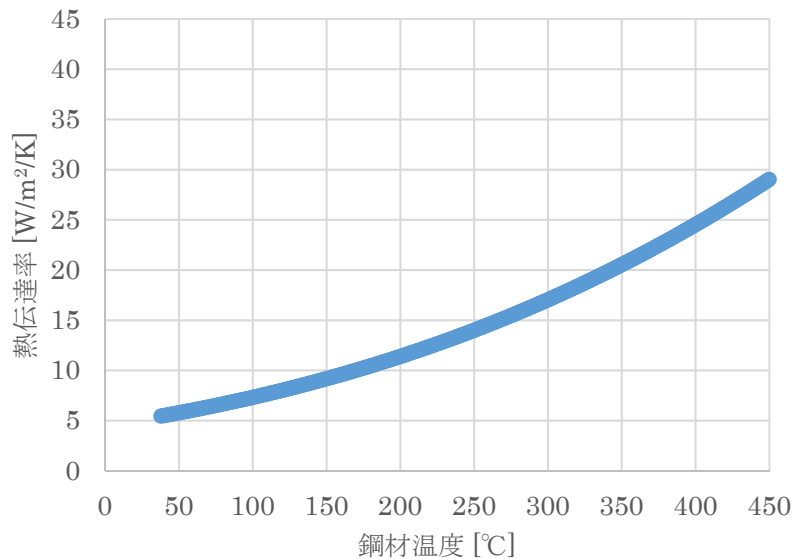
(伝熱工学資料 改訂第5版 p.23)

式 1-1 及び 1-2 から、熱伝達率は以下の通り求められる。

$$h = \frac{\sigma \varepsilon (T_i^4 - T_a^4)}{T_i - T_a} \dots (式 1-3)$$

屋外施設において、熱伝達率を用い評価する鋼材の輻射率は0.8~1 (出典：伝熱工学資料改訂第5版, p.162) である。輻射率は0.8として見込み、式 1-3 から熱伝達率を求めた結果を第 1-1 図 鋼材温度に対する熱伝達率に示す。

第 1-1 図 鋼材温度に対する熱伝達率



熱伝達率は、37°Cから450°Cでは、5.4 W/m²/K から 29W/m²/K の熱伝達率となり、熱伝達率 17W/m²/K の輻射放熱で見込む 6W/m²/K よりも大きな値となることから、次項(2)の 12W/m²/K の適用性と合わせて考えると、17W/m²/K を高温条件に適用することは妥当である。

(2) 対流放熱について

対流の熱伝達率は，一般的に以下の式に基づき算出される。

$$h = Nu \times \lambda / L \dots (式 1-4)$$

Nu : ヌセルト数 [-]

λ : 熱伝導率 (空気) [W/m/K]

L : 評価対象長さ [m]

(伝熱工学資料 改訂第 5 版 p. 26)

$$Nu = 2 C (Pr) Re^{1/2} \dots (式 1-5)$$

Re : レイノルズ数 [-]

$C(Pr)$ はプラントル数の関数で， $Pr > 0.5$ の場合以下の式で求められる。

$$C(Pr) = 0.332 Pr^{1/3} \dots (式 1-6)$$

Pr : プラントル数

(伝熱工学資料改訂第 5 版, p. 28)

上記式から，熱伝達率の温度依存性は物性値の関数として次式により表される。

$$h = f(Pr^{1/3}, Re^{1/2}, \lambda) = f(\eta^{-1/6}, Cp^{1/3}, \lambda^{2/3}, \rho^{1/2}) \dots (式 1-7)$$

η : 粘性係数 [Pa-s]

Cp : 比熱 [J/kg/K]

λ : 熱伝導率 [W/m/K]

ρ : 密度 [kg/m³]

測定によって求められた空気調和・衛生工学便覧の 12W/m²/K に対し，第 1-1 表常圧下の空気の熱物性値から，上式で得られる熱伝達率の温度影響について確認した結果，100℃で約-0.8%，450℃で約-3.5%程度であり，12W/m²/K を高温条件に適用することは妥当である。

第 1-1 表 常圧下の空気の熱物性値*2

K	°C	kg/m ³	kJ/(kg-K)	μ Pa-s	mW/(m-K)
280	6.85	1.2606	1.007	17.6	24.61
300	26.85	1.1763	1.007	18.62	26.14
320	46.85	1.1026	1.008	19.69	27.59
340	66.85	1.0376	1.009	20.63	29
360	86.85	0.9799	1.011	21.54	30.39
380	106.85	0.9282	1.012	22.42	31.73
400	126.85	0.8818	1.015	23.27	33.05
420	146.85	0.8398	1.017	24.1	34.37
440	166.85	0.8016	1.02	24.9	35.68
460	186.85	0.7667	1.023	25.69	36.97
480	206.85	0.7347	1.027	26.46	38.25
500	226.85	0.7053	1.031	27.21	39.51
550	276.85	0.6412	1.041	29.03	42.6
600	326.85	0.5878	1.052	30.78	45.6
650	376.85	0.5425	1.064	32.47	48.4
700	426.85	0.5038	1.076	34.1	51.3
800	526.85	0.4408	1.099	37.23	56.9

注釈 *2 : 伝熱工学資料改訂第 4 版, p. 329 の抜粋

以上から、温度上昇に対して輻射による熱伝達率は増え、対流による熱伝達率は同等であることから、空気調和・衛生工学便覧の中で保守側の値として選定し、それぞれの熱伝達率を高温条件に適用することは妥当である。

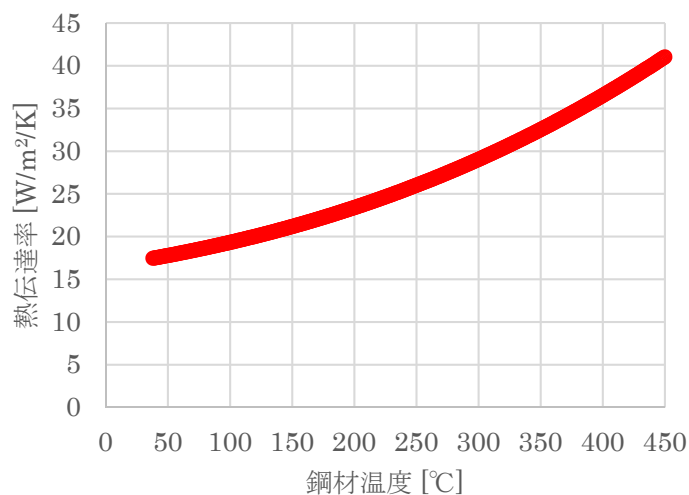
1.2 離隔距離表の設計に用いる熱伝達率について

輻射及び対流による放熱が期待できる場合は、熱伝達率は $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を適用できるが、離隔距離表については、必要離隔距離を保守的に広く取るため、設計裕度を設ける観点で以下のとおり考慮した。

屋外施設において、「1.1 (1) 輻射放熱について」に基づき、鋼材の輻射率 0.8 による輻射の熱伝達率と対流の熱伝達率 $12\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ の合計を第 1-2 図に示す。

外部火災防護対象施設と外部火災防護対象施設等に波及的破損を及ぼし得る施設のそれぞれの許容温度は 325°C 、 450°C である。第 1-2 図から得られる 37°C から 325°C 、 37°C から 450°C における輻射と対流の熱伝達率の合計の平均値は、それぞれ $23\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ 、 $27\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ であり、その平均値は $25\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ である。

第 1-2 図 輻射及び対流による熱伝達率の合計



ここで、離隔距離の設計裕度として、実際の設備材料とは異なるものの、酸化鉄を考えた場合、その輻射率は最小で 0.4（出典：伝熱工学資料改訂第 3 版，p. 149）であり、鋼材の輻射率の 0.8 に対して 1/2 である。そのため、保守的に $25\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を半分とした $12.5\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を離隔距離表の設計に用いることとした。

なお、酸化鉄の輻射率 0.4 により第 1-2 図を再評価した場合、平均の熱伝達率は鋼材の $25\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ に対して $18\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ となり、 $12.5\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ はこの観点からも妥当である。

以上

別紙

令和4年6月30日 RO

別紙－1

屋外の外部火災防護対象施設の熱伝達率について

目 次

1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2. 屋外の外部火災防護対象施設の熱伝達率について・・・・・・・・ 1

1. はじめに

本資料は、補足説明資料「外外火 21 外部火災の影響評価における放熱量の設定の考え方についてについて」における冷却塔の熱伝達率について説明する。

2. 屋外の外部火災防護対象施設の許容温度について

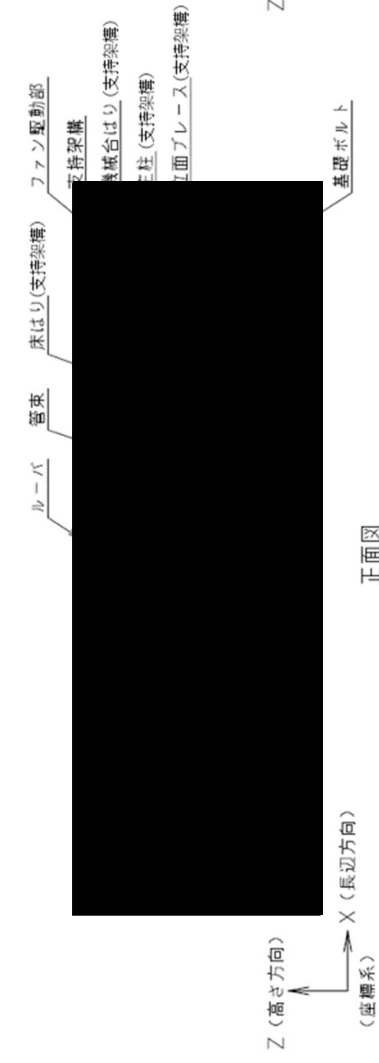
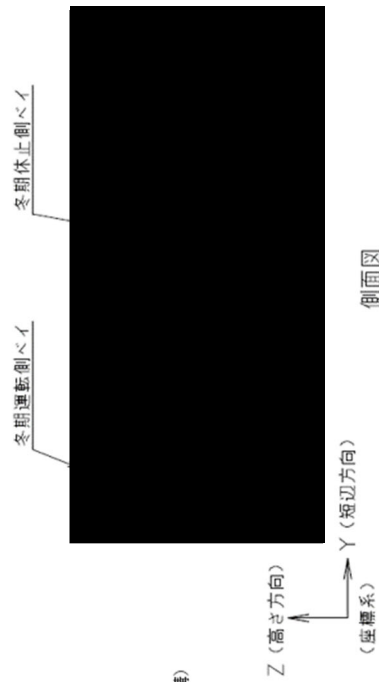
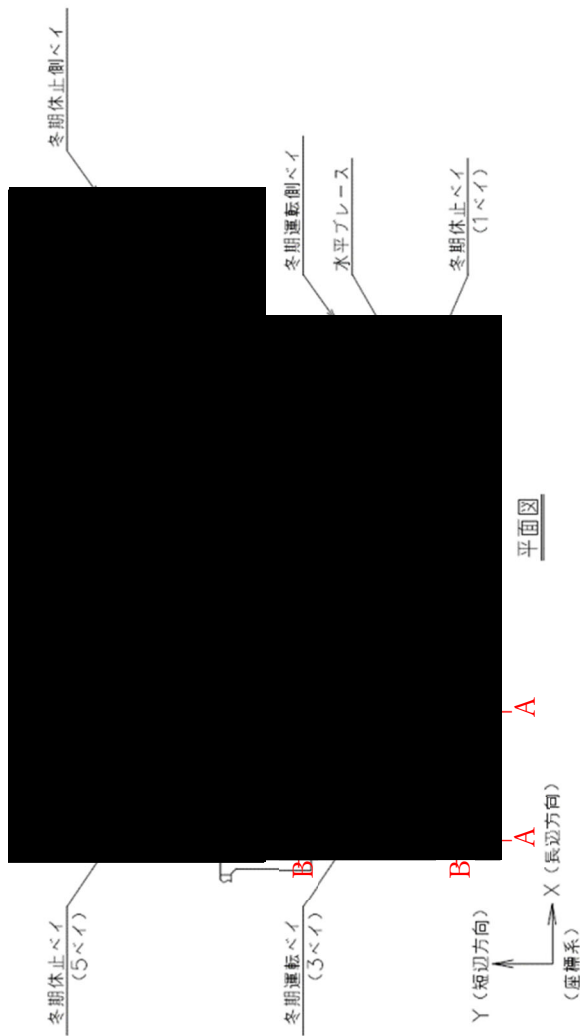
(1) 安全冷却水系(再処理設備本体用)

安全冷却水系(再処理設備本体用)に対し、外部火災の影響評価が必要な対象と放熱の考慮の要否を第 2-1 表に示す。また、安全冷却水 B 冷却塔の概要図を第 2-1 図に、安全冷却水 B 冷却塔の断面概要図を第 2-2 図に示す。詳細な整理については、補足説明資料「外外火 04 航空機墜落による火災の防護設計について」に示す。

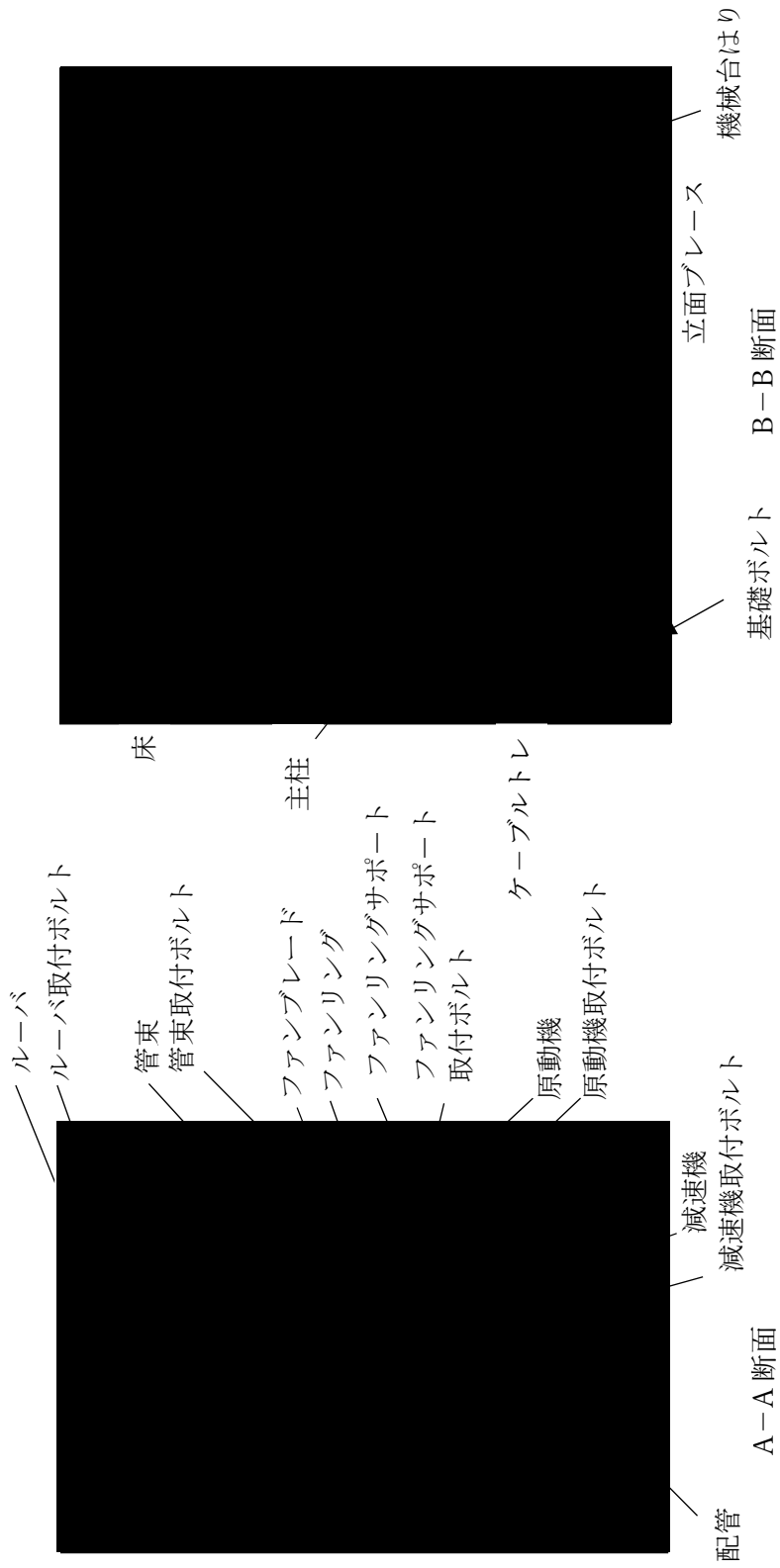
第 2-1 表 安全冷却水系(再処理設備本体用)の 評価対象と評価における放熱の考慮

機器	部位	外部火災の影響	評価方法	放熱の考慮
冷却水 (配管の内部流体)		配管出口温度の冷却水温度上昇により、冷却機能の低下が想定される。	評価	×
管束・配管	チューブサポート	チューブサポートの温度上昇による強度低下により変形した場合、伝熱管の損傷が想定される。	評価	○
	管束フレーム	管束フレームの温度上昇による強度低下により変形した場合、伝熱管の損傷が想定される。	試験	/
	ボルト類	ボルト強度低下による破損により、管束・配管の損傷が想定される。	試験	/
ファン駆動部	ファンリング	ファンリングの変形により、ファンブレードの故障が想定される。	評価	○
	ファンブレード	ファンブレードの損傷による冷却機能への影響が想定される。	評価	○
	減速機	減速機の損傷による冷却機能への影響が想定される。	評価	○
	原動機	原動機の損傷による冷却機能への影響が想定される。	評価	○
	ファンリングサポート	ファンリングサポートの強度低下により、ファンリングの変形及びファンブレードの破損が想定される。	試験	/
	ボルト類	ボルト強度低下による破損により、ファンリングの変形及びファンブレードの破損が想定される。	試験	/
	コモンベッド	コモンベッドの変形により、減速機及び原動機の故障が想定される。	試験	/
ケーブルトレイ	ケーブルトレイの破損により、ケーブルの断線等の故障が想定される。	試験	/	
支持架構	主柱	支持架構の強度低下により、冷却塔の倒壊等の影響が想定される。	評価	○
	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> ○：当該設備の冷却能力及び設置環境から放熱を考慮， ×：放熱は考慮しない



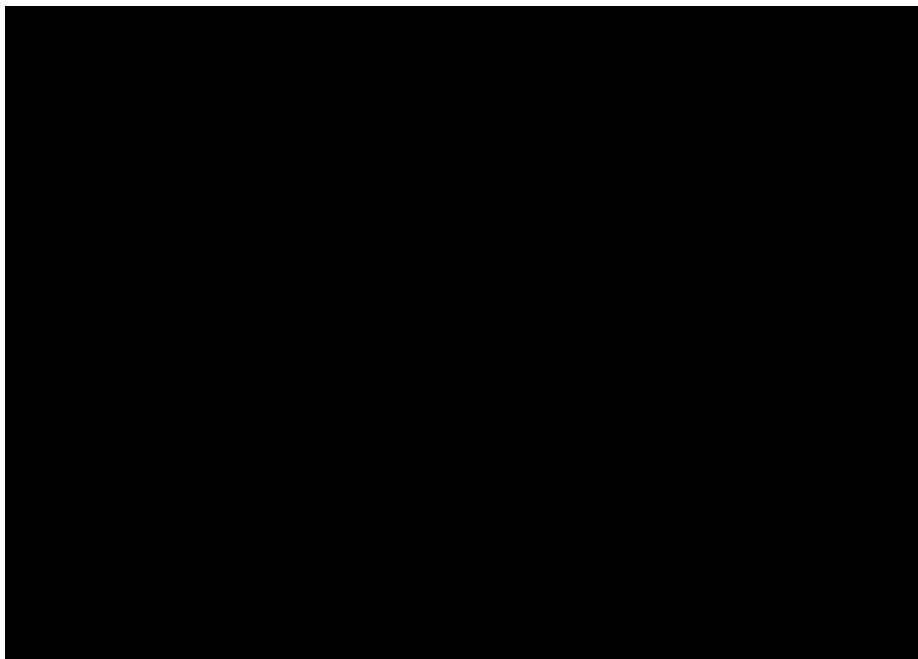
第2-1図 安全冷却水 B 冷却塔 概要図



第2-2 図 安全冷却水B 冷却塔 断面概要図

a. チューブサポート

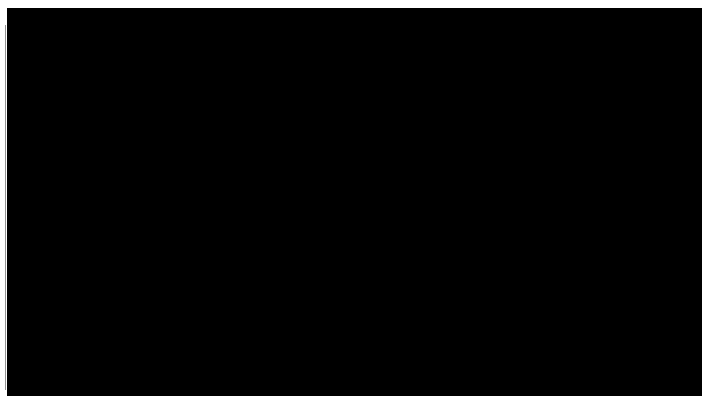
第2-2図に示す管束を一部の構成部材であり，輻射放熱及び対流放熱を阻害する部材が周辺にないことから，熱伝達率は $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮する。



第 2-3 図 管束構造図

b. ファンリング及びファンブレード

ファンリング及びファンブレードについては，輻射放熱及び対流放熱を阻害する部材が周辺にないことから，熱伝達率は $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮する。

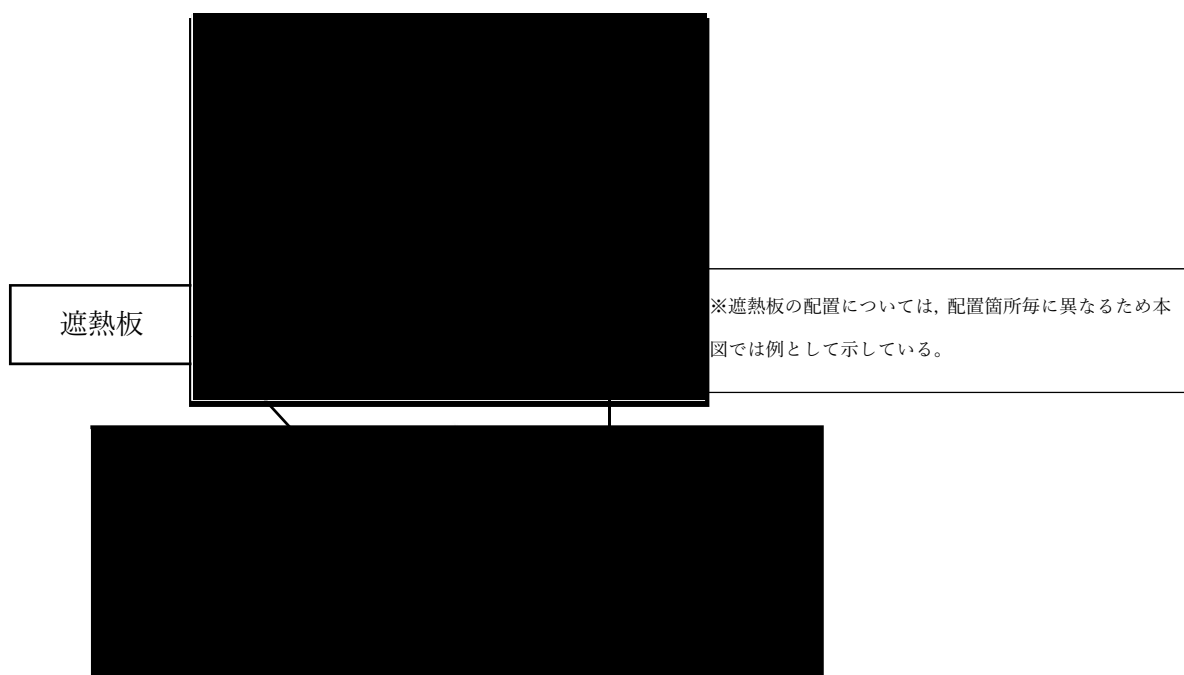


第 2-4 図 ファン駆動部構造図

c. 原動機

原動機については、遮熱板の温度上昇による放熱が考慮され、遮熱板と当該設備の温度差により入熱が考慮される。そのため、輻射放熱については考慮されず、対流放熱の成分である、停止時の評価については、熱伝達率は $12\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮する。

また、原動機については、当該設備を冷却するためファンがあることから、運転時については、当該設備の冷却ファンの風速を考慮して熱伝達率を考慮する。



第2-5図 原動機と遮熱板の構造概要図

d. 減速機

減速機については、遮熱板の温度上昇による放熱が考慮され、減速機と当該設備の温度差により入熱が考慮される。そのため、輻射放熱については考慮されず、対流放熱の成分である、熱伝達率は $12\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮する。



第2-6図 減速機と遮熱板の構造概要図

d. 支持架構

第2-2図に示すとおり、支持架構については、輻射放熱及び対流放熱を阻害する部材が周辺にないことから、熱伝達率は $17\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮することができる。

ただし、必要離隔距離を広く取るため、設計裕度として $12.5\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を考慮する。

以上