

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 30 R 2
提出年月日	令和 4 年 8 月 9 日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護設計の基本方針に関する

飛来物防護ネットによる

冷却塔の冷却機能への影響について

1. 文章中の青字部は、R 1 から R 2 への変更箇所を示す。
2. 本資料（R 2）は、令和 4 年 3 月 18 日に提示した「竜巻防護設計の基本方針に関する冷却塔の冷却性能について R 1」に対し、ヒアリングにおける主な指摘事項である試験装置の測定結果の追加及び圧力損失計算に対し各値の出典を明確化するとともに記載内容の適正化を図ったものである。

目 次

1. 概要	1
2. 冷却機能への影響について	1
2.1 冷却機能への影響確認方法	1
2.2 損失係数の設定	4

■■■■■ : 商業機密の観点から公開できない箇所

1. 概要

本資料は、再処理施設の第1回設工認申請のうち、以下の添付書類に示す竜巻防護設計の基本方針を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-3 竜巻防護に関する施設の設計方針」

上記添付書類において、冷却塔の竜巻防護対策である飛来物防護ネットは、竜巻防護対象施設の有する安全機能に影響を与えないよう、冷却塔の空気による熱交換を可能とするため、空気の流出入を阻害しない防護ネットを主体構造とすることで、冷却機能に影響を与えない設計とする設計方針を示している。

本資料では、飛来物防護ネットによる冷却塔の冷却機能への影響について説明する。

なお、本資料で示す飛来物防護ネットによる冷却塔の冷却機能への影響については、今回申請対象以外の再処理施設の冷却塔に対しても適用するものである。

また、本資料は、第1回設工認申請の対象設備を対象とした記載であることから、第2回設工認申請以降の申請対象を踏まえて、記載を拡充していく。

2. 冷却機能への影響について

飛来物防護ネットの設置による冷却塔への空気の流入・流出面積の減少により、ファンの吸気側及び排気側で圧力損失が増加することから、2.1項以降に飛来物防護ネットの設置により、冷却塔の冷却機能に影響を与えないことの確認方法及び確認結果を示す。

2.1 冷却機能への影響確認方法

飛来物防護ネットを設置することで、ファンの吸気側及び排気側で圧力損失が増加する。そのため、飛来物防護ネットを設置することで増加するネット吸気側及び排気側の圧力損失と冷却塔で生じる圧力損失の合計値、ファンの設計静圧（冷却に必要な空気流量を送り出すことが可能な静圧）を比較し、ファンの設計静圧が上回ることで、ファンによって冷却に必要な空気流量を送り出すことができ、冷却塔の冷却機能への影響を与えないことを確認する。

$$\Delta P_{in} + \Delta P_{out} + \Delta P_c < h$$

ΔP_{in} : ネット吸気側の圧力損失 [Pa]

ΔP_{out} : ネット排気側の圧力損失 [Pa]

ΔP_c : 冷却塔の圧力損失 [Pa]

h : ファンの設計静圧 [Pa]

飛来物防護ネットを設置したことによる、ネット吸気側及び排気側の圧力損失を下式より算出する。ここで、損失係数 ξ は未知数であることから、

「2.2 損失係数の設定」に示す試験結果を用いて設定する。また、圧力損失の算出に用いる記号を第2-1表に示す。

$$\Delta P = \zeta \times \rho \times \frac{U^2}{2}$$

ΔP : 圧力損失 [Pa]

ζ : 損失係数 [-]

ρ : 空気密度 [kg/m³]

U : 風速 [m/s]

このとき、ネットを通過する風速 U については、次式より算出する。

$$U = Q \div A$$

Q : ファンの風量 [m³/s]

A : 空気流路の面積 [m²]

飛来物防護ネットを設置することによるネット吸気側及びネット排気側の圧力損失はそれぞれ以下のとおり算出する。

$$\Delta P_{in} = \zeta \times \rho_{in} \times \frac{(Q_{in} \div A_{in})^2}{2}$$

$$\Delta P_{out} = \zeta \times \rho_{out} \times \frac{(Q_{out} \div A_{out})^2}{2}$$

このとき、ファンの排気風量 Q_{out} については、次式より算出する。

$$Q_{out} = Q_{in} \times \frac{\rho_{in}}{\rho_{out}}$$

なお、空気密度は吸気温度によって値が異なってくるが、温度が高くなるほど空気密度は低下する傾向であり、同じ風量 (m³/s) においては空気密度が低下することで圧力損失も小さくなる。このため、吸気温度の設定については、高温に対する設計温度 (■℃) ではなく、設計上の外気温度 (■℃) を用いることとする。

第2-1表 記号の定義

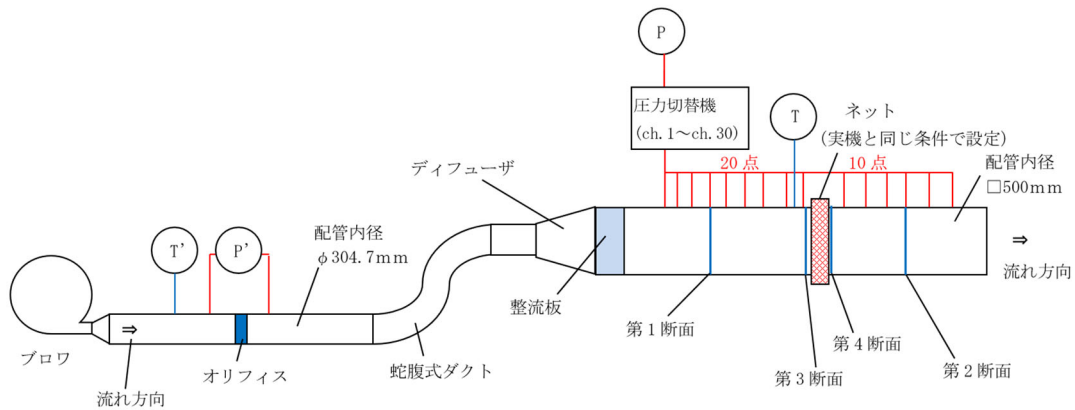
記号	単位	定義
h	Pa	ファンの設計静圧
U	m/s	ネットを通過する風速
Q_{in}	m ³ /s	ファンの設計吸気風量
Q_{out}	m ³ /s	ファンの排気風量
ρ_{in}	kg/m ³	ネット吸気側の空気密度
ρ_{out}	kg/m ³	ネット排気側の空気密度
A_{in}	m ²	ネット吸気流路の面積
A_{out}	m ²	ネット排気流路の面積
ζ	—	ネットの損失係数
ΔP_{in}	Pa	ネット吸気側の圧力損失
ΔP_{out}	Pa	ネット排気側の圧力損失
ΔP_c	Pa	冷却塔の圧力損失

2.2 損失係数の設定

圧力損失を算出するためには、ネットを通過する際の損失係数を設定する必要があるが、ネット通過時における損失係数に関するデータは文献等では確認できなかったため、試験結果を用いて設定する。

(1) 測定方法

ネット通過時の損失係数をベルヌーイの定理を用いて算出する。試験装置を第2-1図に示す。試験に用いるネットは、実機と同じ、50mm目合のネット2枚及び40mm目合のネット1枚の計3枚を用いた構成とする。なお、実機では2枚の50mm目合のネット同士の重ね合わせにおいて目合間の飛来物のすり抜けを伴う貫通を防止するため、半目ずらしで設置することから、試験に用いる2枚の50mm目合のネットについても同様な半目ずらしとする。



第2-1図 試験装置概要図

試験装置に設けられたネットによる圧力損失を求めるため、ネットの上流直管部で十分に流れが安定した断面を第1断面、下流側で十分に流れが安定した断面を第2断面、ネットの上流断面を第3断面、ネットの下流断面を第4断面とする。

第1断面と第2断面の間でベルヌーイの定理を適用すると、下式となる。

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_2 U_2^2 + \Delta h_{13} + \Delta h_{24} + \Delta P_{\text{Loss}} \quad \dots (1)$$

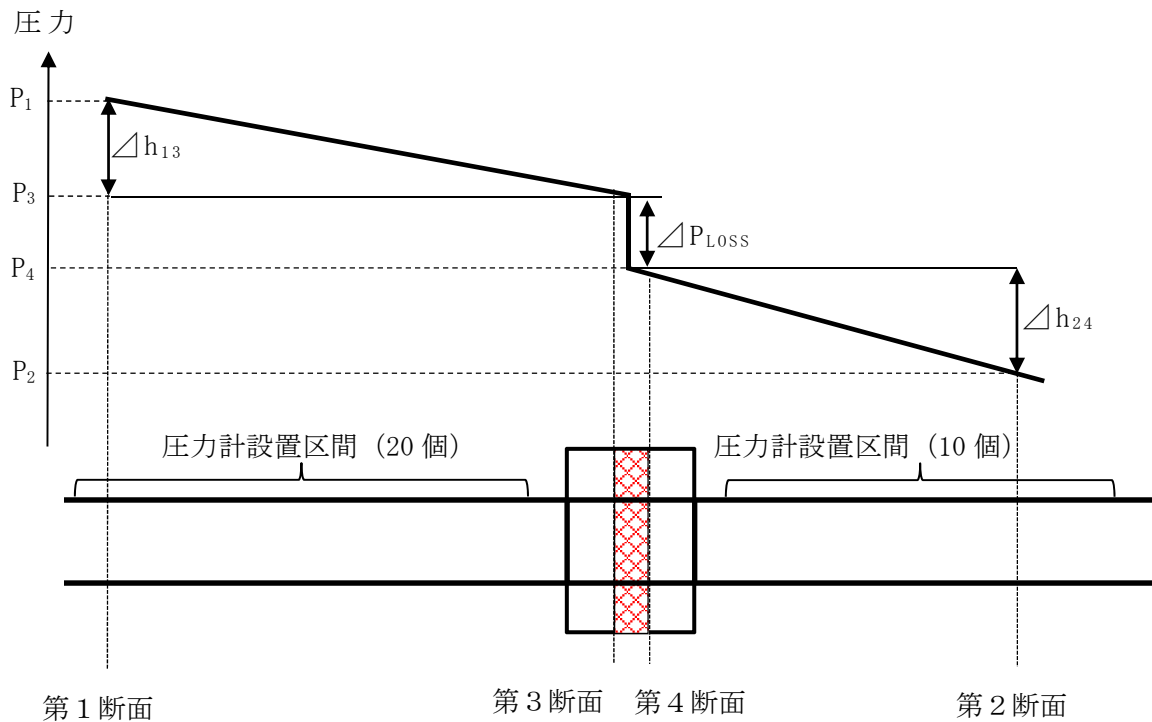
- ここで、
- P_1 : 第1断面における圧力
 - ρ_1 : 第1断面における空気密度
 - U_1 : 第1断面における風速
 - P_2 : 第2断面における圧力
 - ρ_2 : 第2断面における空気密度
 - U_2 : 第2断面における風速
 - Δh_{13} : 第1断面から第3断面の摩擦損失 (管部)
 - Δh_{24} : 第2断面から第4断面の摩擦損失 (管部)

ΔP_{LOSS} : ネットの圧力損失

(2) 圧力損失の算出方法

圧力損失は、第2-1図の試験装置から得られる測定データを元に計器の測定誤差や試験装置の製作誤差を考慮し、算出する。

圧力損失の測定のイメージ図を第2-2図に示す。



第2-2図 圧力損失の測定イメージ図

第2-2図より、

$$P_3 = P_1 - \Delta h_{13}$$

$$P_4 = P_2 + \Delta h_{24}$$

P_3 : 第3断面における圧力

P_4 : 第4断面における圧力

であることが分かる。

ここで、 Δh_{13} は、試験装置に設置された20個の圧力計 (ch. 1~ch. 20) より得られた圧力値を最小二乗回帰することで、静圧勾配線を求めて第1断面から第3断面間の Δh_{13} を算出する。 Δh_{24} は試験装置に設置された10個の圧力計 (ch. 21~ch. 30) より得られた圧力値を用いて同様に第2断面から第4断面間の Δh_{24} を算出する。

空気密度及び風速を一定とすると、(1)式は以下のとおりとなる。

$$\Delta P_{LOSS} = P_3 - P_4 \quad \dots (2)$$

また、 ΔP_{Loss} は下式より算出される。

$$\Delta P_{\text{Loss}} = \frac{1}{2} \rho_1 U_1^2 \zeta \quad \cdot \cdot \quad (3)$$

(2) 及び (3) 式より、損失係数は下式より算出される。

$$\zeta = \frac{P_3 - P_4}{\frac{1}{2} \rho_1 U_1^2}$$

(3) 測定結果

一例としてネット通過時の風速が 3.0m/s における，圧力計 ch.1～ch.30 の測定結果を第2-2表に示す。風速を変化させた場合のそれぞれの損失係数の算出結果については「(6) 損失係数の算出結果」に示す。

第2-2表 圧力計の測定結果

ch.	計測位置※ (m)	圧力 (Pa)	ch.	計測位置※ (m)	圧力 (Pa)
1	-9.0	2.22	21	0.3	1.58
2	-8.5	4.08	22	0.5	1.57
3	-8.0	6.03	23	0.8	1.52
4	-7.5	6.55	24	1.0	1.33
5	-7.0	6.98	25	1.5	1.17
6	-6.5	7.22	26	2.0	1.22
7	-6.0	7.10	27	2.5	1.00
8	-5.5	7.02	28	3.0	0.97
9	-5.0	6.90	29	3.5	0.83
10	-4.5	6.78	30	4.0	0.62
11	-4.0	6.72			
12	-3.5	6.55			
13	-3.0	6.20			
14	-2.5	6.07			
15	-2.0	6.03			
16	-1.5	6.05			
17	-1.0	5.70			
18	-0.8	5.52			
19	-0.5	5.48			
20	-0.3	5.57			

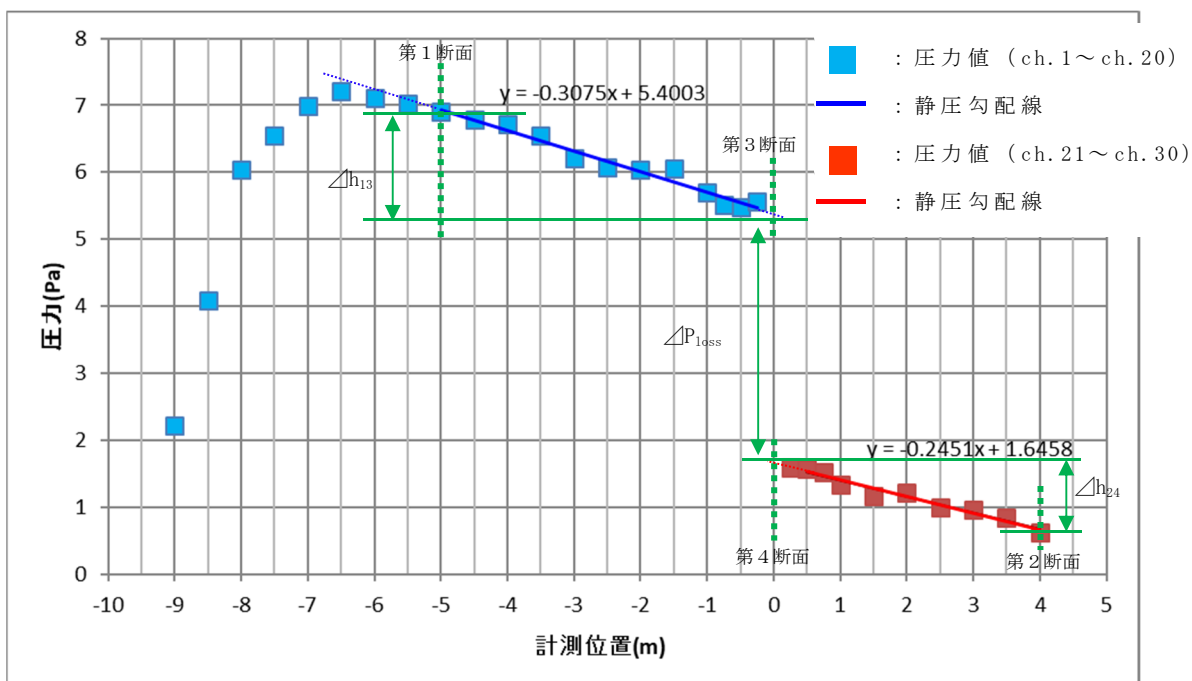
※計測位置についてはネット設置個所を基準 (0m) とする

(4) 圧力損失の算出

「(3) 測定結果」の第2-2表に示す圧力値より、最小二乗回帰にて算出される静圧勾配線を第2-3図に示す。静圧勾配線より算出される第3断面及び第4断面における圧力を第2-3表に示す。

静圧勾配線は、ネットの上流直管部については、十分に流れが安定した ch. 9 の圧力値を第1断面における圧力とし、ネットの下流直管部については、十分に流れが安定した ch. 30 の圧力値を第2断面における圧力として算出した。

なお、試験装置は円管ダクトと角管ダクトを接続し構成している。このため、流体が通過する管形状の変化が生じるとダクトに沿った内部の流れが剥離し、圧力が低下する。第1断面前の区間 (ch. 1~ch. 8) は、この状態から流体の流れが徐々に安定し圧力が回復している状況を示している。



第2-3図 静圧勾配線 (風速 3.0m/s 時)

第 2-3 表 第 3 断面及び第 4 断面における圧力

定義	記号	単位	値	備考
第 3 断面における圧力 ($P_1 - \Delta h_{13}$)	P_3	Pa	5.40	最小二乗回帰にて算出される静圧勾配線に $x=0$ を代入して、第 3 断面の位置の圧力を算出
第 4 断面における圧力 ($P_2 + \Delta h_{24}$)	P_4	Pa	1.65	最小二乗回帰にて算出される静圧勾配線に $x=0$ を代入して、第 4 断面の位置の圧力を算出
圧力損失 ($P_3 - P_4$)	ΔP_{Loss}	Pa	3.75	

(5) 誤差を考慮した圧力損失の算出について

試験により算出された圧力損失に対して、計器の測定誤差や試験装置の製作誤差を考慮するため、圧力損失の誤差範囲をモンテ・カルロ法により求め、圧力損失の標準偏差を算出する。

誤差は、計器の測定値及び試験装置の設計寸法を基準に計器の精度又は試験装置の寸法公差の範囲で変動するものとし、一様分布となるよう設定した乱数から生成する。

計器の測定値及び試験装置の寸法値に誤差を加え、繰り返し圧力損失を算出し、圧力損失の頻度分布から、平均の圧力損失 (P_μ) 及び標準偏差 ($\pm \sigma$) を算出する。

誤差を考慮した圧力損失は平均の圧力損失 (P_μ) に 2σ を加えた値とし、損失係数が大きくなるよう設定する。

算出した平均の圧力損失 (P_μ)、標準偏差 ($\pm \sigma$) 及び誤差を考慮した圧力損失 ($P_\mu + 2\sigma$) を第 2-4 表に示す。

第 2-4 表 誤差を考慮した圧力損失

平均の圧力損失 P_μ (Pa)	標準偏差 $\pm \sigma$ (Pa)	誤差を考慮した圧力損失 $P_\mu + 2\sigma$ (Pa)
3.76	0.11	3.98

(6) 損失係数の算出結果

計器の測定誤差や試験装置の製作誤差を考慮した圧力損失から算出される損失係数を第2-5表に示す。

第2-5表 測定結果と損失係数

風速 U_1 (m/s)	空気密度 ρ_1 (kg/m ³)	圧力損失 P_3-P_4 (Pa)	誤差を考慮した 圧力損失 $P_\mu+2\sigma$ (Pa)	損失係数 ξ (-)
3.0	1.13	3.75	3.98	0.773
5.4	1.14	11.80	12.04	0.723
7.0	1.14	17.33	17.96	0.643
10.1	1.16	37.17	37.87	0.633

第2-5表より，損失係数が最大であった風速 3.0m/s 時の損失係数を全風速範囲に適用することとする。

別紙

外竜巻30【竜巻防護設計の基本方針に関する飛来物防護ネットによる冷却塔の冷却機能への影響について】

別紙				備考
資料No.	名称	提出日	Rev	
別紙-1	安全冷却水B冷却塔の冷却機能への影響について	8/9	2	
別紙-2	安全冷却水A冷却塔の冷却機能への影響について			後次回で示す範囲
別紙-3	冷却塔Aの冷却機能への影響について			後次回で示す範囲
別紙-4	冷却塔Bの冷却機能への影響について			後次回で示す範囲
別紙-5	安全冷却水冷却塔Aの冷却機能への影響について			後次回で示す範囲
別紙-6	安全冷却水冷却塔Bの冷却機能への影響について			後次回で示す範囲

令和4年8月9日 R2

別紙-1

安全冷却水B冷却塔の冷却機能への影響について

目 次

1. 概要	1
2. 冷却機能への影響確認対象設備について	1
2.1 安全冷却水 B 冷却塔の機能について	1
2.2 安全冷却水 B 冷却塔の構造について	1
3. 冷却機能への影響確認方法	4
4. 冷却機能への影響確認条件	4
5. 冷却機能への影響確認結果	8

1. 概要

本資料は、本文記載の「2. 冷却機能への影響について」に基づき、飛来物防護ネット（再処理設備本体用 安全冷却水系冷却塔 B）（以下、「飛来物防護ネット（A 4 B）」という。）の設置による安全冷却水 B 冷却塔の冷却機能への影響について確認した結果を示す。

2. 冷却機能への影響確認対象設備について

2.1 安全冷却水 B 冷却塔の機能について

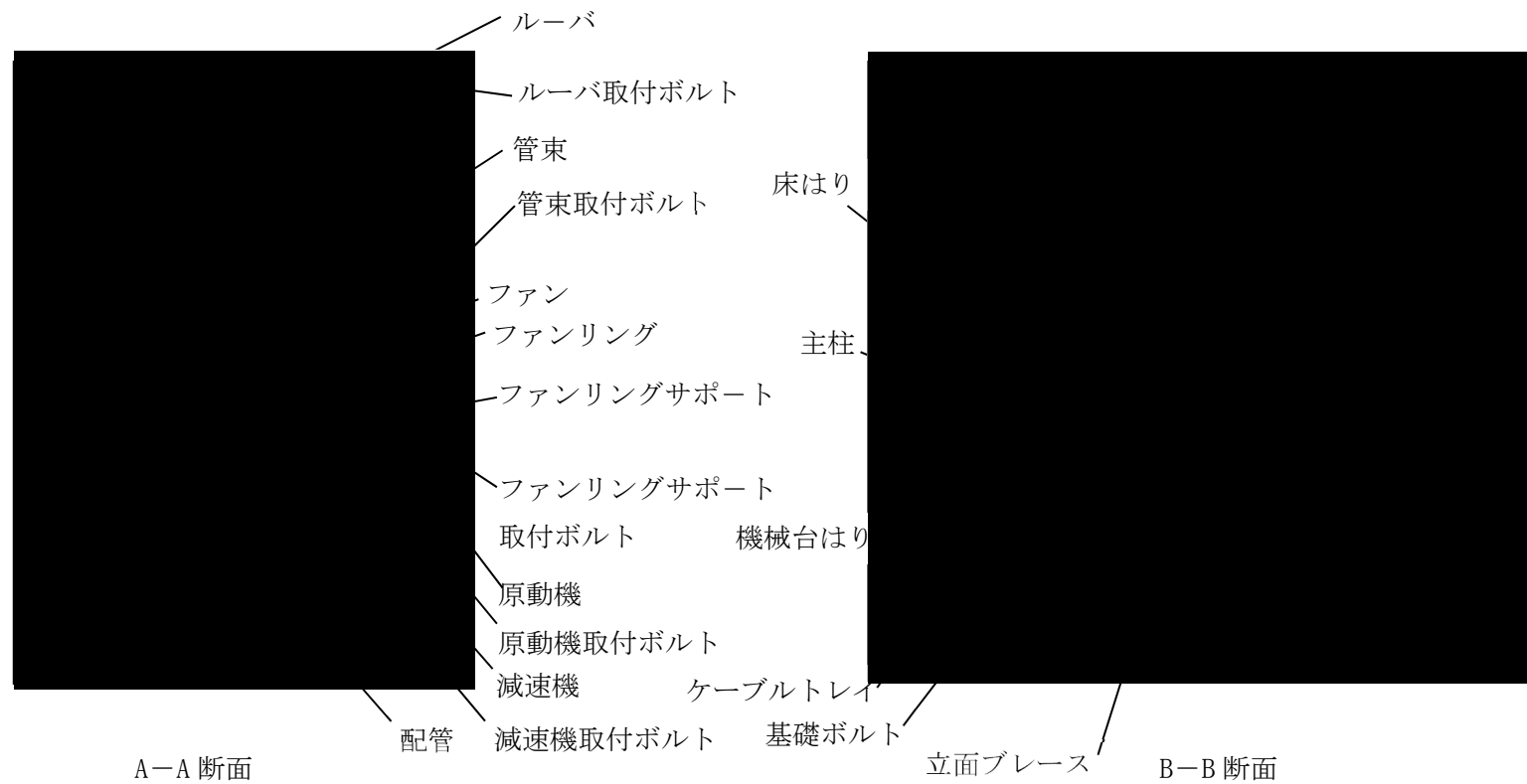
安全冷却水 B 冷却塔は、再処理施設内の各施設を冷却した後の冷却水を、空気と熱交換することで冷却するための設備である。そのため、安全冷却水 B 冷却塔は崩壊熱により溶液が沸騰するおそれのある機器の崩壊熱を除去するための冷却能力を有しており、その冷却機能の維持に必要な機器として、支持架構、ファン駆動部、管束及び配管により構成される。

2.2 安全冷却水 B 冷却塔の構造について

安全冷却水 B 冷却塔の概要図を第 2-1 図に示す。また、第 2-1 図に示した A-A、B-B 断面について第 2-2 図に示す。



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

3. 冷却機能への影響確認方法

冷却機能への影響確認は本文記載のとおり，冷却に必要な空気流量において，ファンの設計静圧と飛来物防護ネット（A 4 B）設置後の各圧力損失（ネット吸気側及び排気側の圧力損失と冷却塔の圧力損失）の合計値を比較し，ファンの設計静圧が上回ることによって，安全冷却水 B 冷却塔の冷却機能への影響を与えないことを確認する。

4. 冷却機能への影響確認条件

(1) 冷却機能への影響確認に用いる条件

安全冷却水 B 冷却塔の冷却機能への影響確認に用いる条件を第 4-1 表に示す。ここで，ネット吸気側流路の面積 A_{in} 及びネット排気側流路の面積 A_{out} を算出するためには，冷却空気が飛来物防護ネット（A 4 B）を通過する空気流路（吸気及び排気）を設定する必要があることから，「4. (2) 飛来物防護ネット（A 4 B）の流路設定について」に示す空気流路を用いて算出する。

なお，飛来物防護ネット（A 4 B）のネットを通過する風速は，本文記載の「2.2 損失係数の設定」に示す試験で用いた風速内に収まっていることから，試験により算出した損失係数は適用可能である。

第4-1表 安全冷却水B冷却塔の冷却機能への影響確認に用いる条件

記号	単位	定義	値	備考
h	Pa	ファンの設計 静圧	■	メーカー保証値
Q_{in}	m^3/s	ファンの設計 吸気風量	■	メーカー保証値
Q_{out}	m^3/s	ファンの排気 風量	■	本文記載の2.1項による。
ρ_{in}	kg/m^3	ネット吸気側の 空気密度	■ ^{※1} (吸気温度： ■°C ^{※2})	※1：伝熱工学資料改訂 第5版 ※2：第6回申請 添付VI 設計及び工事の方法の技 術基準への適合に関する 説明書 添付-8 崩壊熱除 去に関する説明書 第 2.3表より
ρ_{out}	kg/m^3	ネット排気側の 空気密度	■ ^{※1} (排気温度： ■°C ^{※2})	※1：伝熱工学資料改訂 第5版 ※2：第6回申請 添付VI 設計及び工事の方法の技 術基準への適合に関する 説明書 添付-8 崩壊熱除 去に関する説明書 第 2.3表より
A_{in}	m^2	ネット吸気流路 の面積	511.0	面積の設定について 4.(2)項に示す。
A_{out}	m^2	ネット排気流路 の面積	485.0	面積の設定について 4.(2)項に示す。
ζ	—	ネットの損失係 数	0.773	本文記載の2.2(6)項によ る。

(2) 飛来物防護ネット（A 4 B）の流路設定について

飛来物防護ネット（A 4 B）の圧力損失を算出するため、冷却空気を通過する空気流路（吸気及び排気）を設定する。

飛来物防護ネット（A 4 B）の吸気側流路は、流路面積を小さくした方が圧力損失は大きくなることから、地上から安全冷却水 B 冷却塔のファン駆動部のファンリング下端までの高さと同様に吸気側流路の高さを同じとし、流路面積を制限して設定した。また、排気側流路においても同様な考えで安全冷却水 B 冷却塔の天面開口の投影面と同じ大きさとし、流路面積を制限して設定した。

また、飛来物防護ネット（A 4 B）の吸気側及び排気側の圧力損失の算出は、支持架構や防護板及び補助防護板を考慮し、流路外形面積から支持架構（柱、はり等）、防護板及び補助防護板の面積を差し引いたうえで、算出する。

飛来物防護ネット（A 4 B）の吸気側及び排気側の空気流路を第 4-1 図に示す。

飛来物防護ネット（A 4 B）の吸気側及び排気側の空気流路面積を第 4-2 表に示す。

第 4-2 表 飛来物防護ネット（A 4 B）の空気流路面積（単位：m²）

	流路外形面積（①）	除外した面積*（②）	空気流路面積（①-②）
吸気側	888.1	377.1	511.0
排気側	659.6	174.6	485.0

※支持架構（柱、はり等）や防護板、補助防護板の見付面積



※流路面積は支持架構（柱，はり等），
防護板及び補助防護板の面積を差
し引いた値となる。

第4-1図 飛来物防護ネット（A4B）の空気流路（吸気側・排気側）

5. 冷却機能への影響確認結果

冷却に必要な空気流量において、ファンの設計静圧及び各圧力損失（ネット吸気側及び排気側の圧力損失と冷却塔の圧力損失）を第5-1表に示す。

冷却に必要な空気流量において、ファンの設計静圧が各圧力損失（ネット吸気側及び排気側の圧力損失と冷却塔の圧力損失）の合計値を上回っていることから、飛来物防護ネット（A4B）の設置による安全冷却水B冷却塔の冷却機能への影響はないことを確認した。

第5-1表 ファンの設計静圧と各圧力損失の比較

		安全冷却水B冷却塔	備考
①ファンの設計静圧：h		■ Pa	メーカー保証値
②圧力損失	ネット吸気側 ： ΔP_{in}	■ Pa	
	ネット排気側 ： ΔP_{out}	■ Pa	
	冷却塔 ： ΔP_c	■ Pa	メーカー保証値
	合計値 ： $\Delta P_{in} + \Delta P_{out} + \Delta P_c$	■ Pa	
影響確認結果	影響確認結果 (① > ②)	○	