

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-40-4 改3
提出年月日	平成30年5月15日

安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書に係る補足説明資料のうち  
補足-40-4 使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置について

平成30年5月  
日本原子力発電株式会社

## 目 次

1. 概要	1
2. 使用済燃料プール監視カメラ用冷却装置の容量と冷却能力	1
3. 評価条件及び算出方法	2
3.1 評価条件	2
3.2 適用規格	2
3.3 評価方法	2
3.4 算出方法	3
4. 使用済燃料プール監視カメラの耐環境性について	6
5. 使用済燃料プール監視カメラ空冷装置冷却器の性能試験について	8
6. 使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の配管について	10
7. 使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の操作性	11

## 1. 概要

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置は、原子炉建屋原子炉棟での重大事故等時における高温環境下においても使用済燃料プール監視カメラの機能維持を図るために、カメラ本体を冷却するための空気を供給する設計とする。

冷却用空気として、原子炉建屋原子炉棟内に設置する空気圧縮機の周辺空気を吸込み、除湿器、空気供給弁を経て、原子炉建屋原子炉棟内に設置する冷却器に供給する。冷却器で冷却された空気をカメラに供給し、温度の上昇した空気は原子炉建屋付属棟内に放出する。

本資料では、使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の容量について説明する。また、使用済燃料プール監視カメラの耐環境性及び冷却能力についても説明する。

## 2. 使用済燃料プール監視カメラ用冷却装置の容量と冷却能力

### (1) 容量

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の空気圧縮機から供給される空気が使用済燃料プール監視カメラの入口で $\square$ ℃以下になるように必要流量を設定する。

使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の必要流量（空気圧縮機の必要流量）が $\square$  L/minであることから、空気圧縮機の容量を $\square$  L/min以上とする。

### (2) 冷却能力

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置は、空気圧縮機で圧縮された空気を、除湿器及び冷却器で冷却する設計としている。

除湿器の冷却能力としては同一機器を使用した試験を実施しており、原子炉建屋原子炉付属棟内空調機械室の環境温度である 46 ℃となる周辺温度環境を設定して試験をした結果、除湿器出口の温度は $\square$ ℃以下となることを確認している。

冷却器の冷却能力としてはメーカーによる性能試験及び同一機器を使用した試験により、冷却器の出口温度は入口温度より $\square$ ℃低下した空気を供給できることを確認している。

### 3. 評価条件及び算出方法

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の必要流量（空気圧縮機の必要流量）を求めた評価条件及び算出方法は以下のとおりである。使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の系統構成を図 3-1「使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の空気供給概略図」に、空気圧縮機の必要流量及び評価温度を表 3-1「必要流量及び評価温度」に示す。

#### 3.1 評価条件

- 使用済燃料プール監視カメラの入口温度：°C以下
- 原子炉建屋配管入口温度 °C
- 周囲温度：原子炉建屋付属棟（圧縮機，除湿器設置場所）46 °C\*<sup>1</sup>  
原子炉建屋原子炉棟（使用済燃料プール監視カメラ，冷却器設置場所）100°C\*<sup>2</sup>
- \* 1 添付書類 V-1-1-6「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」により 46°Cに設定している。
- \* 2 添付書類 V-1-1-6「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」により 100°Cに設定している。
- 空気圧縮機の必要流量  L/min
- 冷却器の冷風率：35 %  
（空気圧縮機，除湿器からの冷却空気流量（冷却器の入口流量）に対する使用済燃料プール監視カメラの冷却に使用される空気（冷却器の出口流量）の割合）
- けい酸カルシウムの熱伝導率：0.0535 W/mK  
（J I S A9501 2014 表 4-無機多孔質保温材けい酸カルシウム保温板（筒）1号-15より）
- ロックウールの熱伝導率：0.03314 W/mK  
（J I S A9504 2014 表 2-人造鉱物繊維保温材ロックウール保温筒より）
- 保温厚さ：けい酸カルシウム 0.1 m  
ロックウール 0.02 m
- 空気の定圧比熱：1.005 kJ
- 空気の密度：1.293 kg/m<sup>3</sup>（0 °C，大気圧における密度）

#### 3.2 適用規格

- J I S A9501 2014 保温保冷工事施工標準
- J I S A9504 2011 人造鉱物繊維保温材

#### 3.3 評価方法

- (1) 使用済燃料プール監視カメラの必要最低流量を満足するよう必要流量を任意に与える。
- (2) 設定された空気圧縮機の流量を用いて，空気圧縮機入口から使用済燃料プール監視カメラ入口に向けて温度を算出する。
- (3) 上記の計算を使用済燃料プール監視カメラ入口まで行い °C以下であることを確認する。  
（解析結果が °C以上になった場合には，使用済燃料プール監視カメラへの空気流量を増加させ，(1)に戻り再度計算を行い，°C以下となるまで流量を与える。）

### 3.4 算出方法

#### (1) 算出の概要

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置に必要な流量の 500 L/min を流した場合に発生する冷却空気の温度変化を下記の順に算出する。

##### ① 空気圧縮機入口（初期条件）の設定

空気圧縮機は原子炉建屋付属棟内空調機械室の空気を吸込むため、空気圧縮機入口の温度、流量は以下の通り設定する。

温度：46 °C

流量：500 L/min

##### ② 空気圧縮機及び除湿器による入熱

圧縮機及び除湿器の入熱を考慮し、試験結果より温度が 5 °C 上昇することとし、除湿器出口の温度、流量は以下の通りとなる。

温度：51 °C

流量：500 L/min

##### ③ 除湿器から原子炉建屋原子炉棟入口の周囲温度からの入熱

除湿器出口の温度 51 °C に対し周囲温度は 46 °C と低いため配管内の空気は冷却されるが、本評価は冷却能力の評価が目的のため、温度を下げる効果は評価上無視することとし、原子炉建屋原子炉棟入口までの温度、流量は下記の通り変化しない設定とする。

温度：51 °C

流量：500 L/min

##### ④ 原子炉建屋原子炉棟入口から冷却器入口の周囲温度からの入熱

原子炉建屋原子炉棟入口の温度を内部流体の入口温度とし、3.4(2)算出式に記載の算出式により冷却器入口温度を算出する。

温度：86.48 °C

流量：500 L/min

##### ⑤ 冷却器による冷却と流量減少

冷却器の冷却効果により 50 °C 低下し、流量は冷風率、35 % を乗じた流量に低下することとし、冷却器出口の温度、流量は以下の通りとなる。

温度：36.48 °C

流量：175 L/min

##### ⑥ 冷却器出口から使用済燃料プール監視カメラ入口

冷却器出口の温度を内部流体の入口温度とし、3.4(2)算出式に記載の算出式により冷却器入口温度を算出する。

温度：38.35 °C

流量：175 L/min

(2) 算出式

- ・冷却器入口温度及び使用済燃料プール監視カメラ入口温度の算出式

$$|\theta_{f m} - \theta_{\alpha}| = |\theta_{i m} - \theta_{\alpha}| \cdot e^{-\alpha \cdot l}$$

周囲温度 $\theta_{\alpha}$ は、配管内部の気体温度 $\theta_{f m}$ および $\theta_{i m}$ より高いので

$$\theta_{f m} = \theta_{\alpha} - (\theta_{\alpha} - \theta_{i m}) \cdot e^{-\alpha \cdot l}$$

$$\alpha = \frac{3.6 \cdot U_1}{m' \cdot C_p}$$

- ・熱透過率算出式

$$U_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}$$

- ・内部流体の流量算出式

$$m' = m \cdot \rho \cdot \frac{60}{1000}$$

ここに、

$\theta_{f m}$  : 内部流体 出口温度 (°C)

$\theta_{i m}$  : 内部流体 入口温度 (°C)

$\theta_{\alpha}$  : 周囲温度 (°C)

$\rho$  : 空気の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  : 内部流体の流量 (L/min)

$m'$  : 内部流体の流量 (kg/h)

$l$  : 管の長さ (m)

$\pi$  : 円周率

$\lambda$  : 保温材 (けい酸カルシウム, ロックウール) の熱伝導率 (W/mK)

$D_i$  : 保温材内径 (m)

$D_e$  : 保温材外形 (m)

$C_p$  : 内部流体の定圧比熱 (kJ)

$U_1$  : 熱透過率

上記に基づき算出した熱透過率 ( $U_1$ ) 及び各インプットは下表の通り。

	$m'$	$U_1$	$\alpha$	$D_e$	$D_i$	$\lambda$
原子炉建屋原子炉棟入口から 冷却器入口温度 (けい酸カルシウム)	38.79	0.1743	0.01609	0.234	0.034	0.0535
冷却器出口から使用済燃料 プール監視カメラ入口温度 (ロックウール)	13.58	0.2271	0.05993	0.054	0.014	0.0488

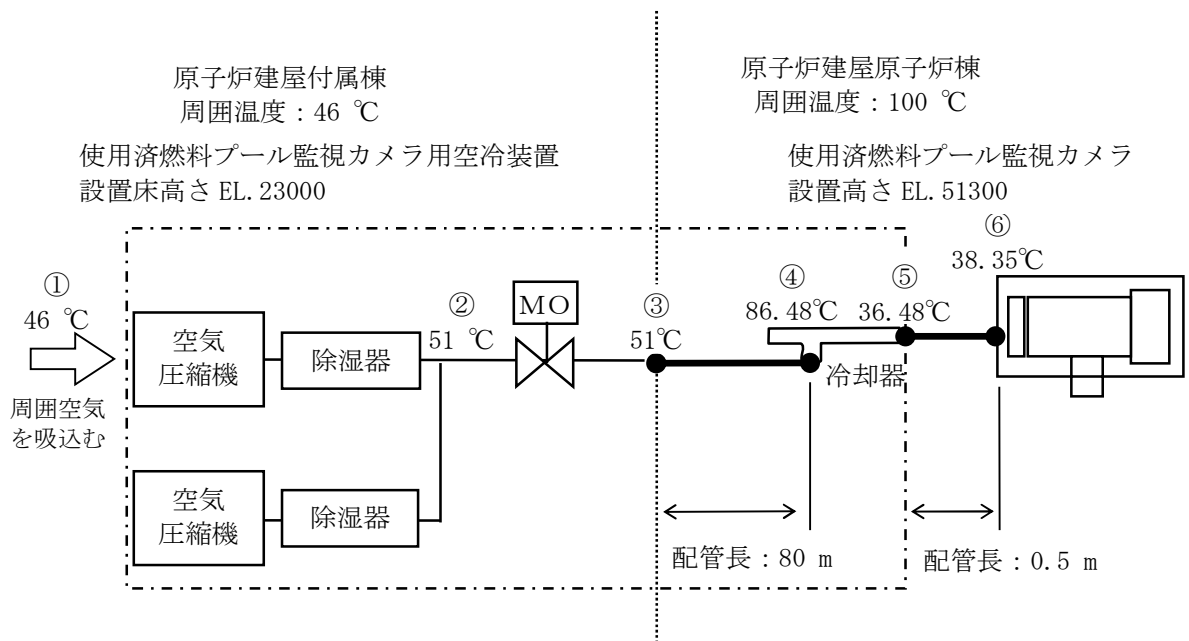


図 3-1 「使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の空気供給概略図」

表 3-1 必要流量及び評価温度

	必要流量 (L/min)	評価温度 (°C)
使用済燃料プール 監視カメラ用空冷装置	□	□

4. 使用済燃料プール監視カメラの耐環境性について

使用済燃料プール監視カメラの耐環境性については、実証試験を実施している。また、使用済燃料プール監視カメラの設計条件に基づき評価が必要な場合は、実証試験結果を踏まえて評価を実施する。

試験結果	<p>空冷カバーに 30 L/min のエアを吹き込んだ場合、使用済燃料プール監視カメラ本体の温度は平均 43.6 °C まで冷却されていることから、雰囲気温度が 100 °C 環境であっても、計測機能維持が可能であることを確認した。また、カメラ映像機能は温度曝露試験にて <input type="text"/> °C の環境下まで監視可能であることを確認した。</p> <p>今回の試験結果を基に、使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の設計条件で設定している配管出口温度及び必要流量を流した場合の使用済燃料プール監視カメラの空冷カバー内部温度を求め、温度曝露試験にて機能維持が確認された <input type="text"/> °C 以下であることを確認した。</p>
最高使用温度	<p>≤ 50 °C <input type="text"/></p>
試験条件	<p>蒸気封入容器温度 100 °C          圧縮空気量 30 L/min          圧縮空気温度 30 °C</p>
温度試験内容	<p>本試験では、空冷カバーの冷却性能を確認するために、空冷カバーに常温空気を吹き込みながら、過熱蒸気の吹込みを開始し、蒸気封入容器内部の雰囲気温度が 100 °C に達するまで加熱した。</p> <p>そして、使用済燃料プール監視カメラ外部温度が定常状態になるまで雰囲気温度を維持し、使用済燃料プール監視カメラ外部温度が定常状態になったあと、各箇所の温度及びその変化の計測を行った。</p>
試験回路構成	<p>The diagram illustrates the experimental setup. On the left, a box labeled '過熱蒸気発生器' (Superheated steam generator) has a red arrow pointing to a larger box labeled '蒸気封入容器' (Steam-sealed container). Below this arrow is the text '約 <input type="text"/> の過熱蒸気' (Approx. <input type="text"/> of superheated steam). Inside the '蒸気封入容器' is a 'カメラ+空冷カバー' (Camera + cooling cover). To the right of the container, a 'カメラ制御用 PC' (Camera control PC) and a '温度測定機器' (Temperature measurement device) are connected to the camera system. Below the container, a 'コンプレッサ' (Compressor) is connected to an 'エア流量計' (Air flow meter), which then leads to '冷却エア' (Cooling air) being directed towards the camera's cooling cover.</p>



機械による熱負荷は以下の式により求められる。

$$Q = V (T_2 - T_1) \cdot C_p \cdot \gamma$$

機械工学便覧 B 8 熱交換器・空気調和・冷凍 第 2 章 空気調和 2.2.5

a. 風量の計算より引用

ここで、

Q: 機械による負荷 (W)

V: 風量 (m<sup>3</sup>/s)

T<sub>1</sub>: 入口空気温度 (°C)

T<sub>2</sub>: 出口空気温度 (°C)

C<sub>p</sub>: 流体の比熱 (J/kg・°C)

γ: 流体の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

与えられた条件 (試験結果)

圧縮空気量 V =  L/min

空冷カバー空気入口温度 T<sub>1</sub> =  °C

空冷カバー内部温度 T<sub>2</sub> =  °C

上記条件より機械による顕熱負荷 Q を求める。

$$Q = \text{}$$

$$= \text{}$$

$$= \text{}$$

C<sub>p</sub> 及び γ を一定とし、必要流量、評価温度及び上記で求めた顕熱負荷 Q を用いて空冷カバー内部温度を算出する。

$$V = \text{必要流量} \times \text{冷風率} = 500 \times 0.35 = 175 \text{ L/min}$$

$$T_1 = \text{評価温度} = \text{} \text{ °C}$$

$$T_2 = \text{空冷カバー内部温度} = X \text{ °C}$$

$$Q = \text{}$$

$$X = \text{} \text{ °C}$$

## 5. 使用済燃料プール監視カメラ空冷装置冷却器の性能試験について

冷却器の性能は冷却器メーカーが実施した性能試験結果が公開されている。公開されている試験結果は、入口圧力を変化させた時の出入口流量及び温度と温度差であり、この試験結果を冷却器の性能として条件を設定している。

冷却器の冷却能力は試験結果中、温度差が最も低い 51 °C を考慮し、50 °C に設定している。

使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の必要流量も試験結果中、流量が最も低い 491 L/min を考慮し、500 L/min に設定している。

以上の冷却能力及び必要流量の設定により、圧縮機は冷却器に入口圧力 0.3~0.7 MPa の範囲で 500 L/min の空気を設定する必要がある。

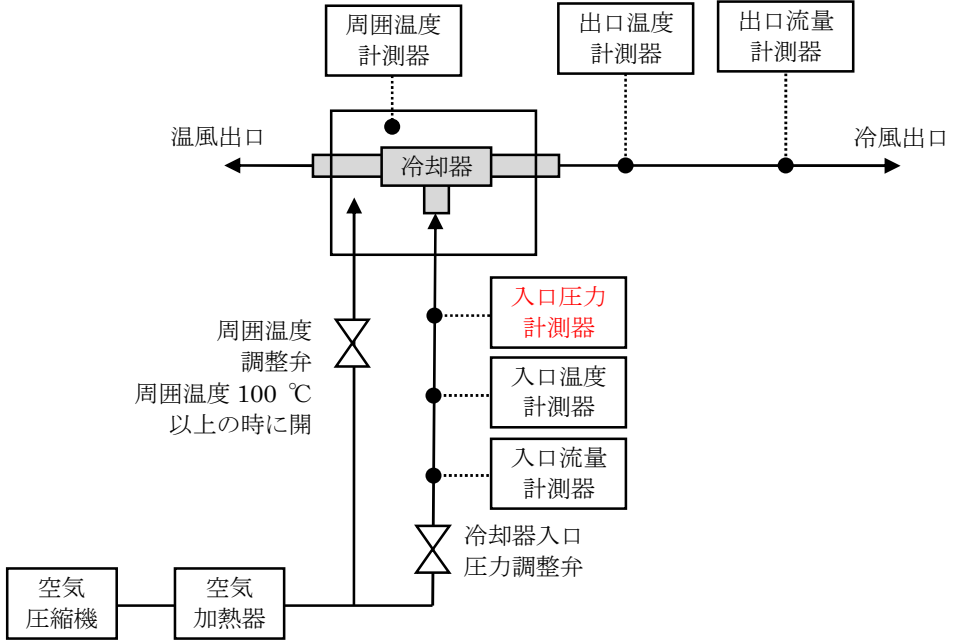
圧縮機は必要流量 500 L/min を上回る公称値 605 L/min の機種を選定している。この圧縮機の出口圧力は約 0.7~0.9 MPa であるが、配管等の圧損を 0.2 MPa 程度と見込んでおり冷却器入口での圧力は 0.5~0.7 MPa の空気を供給可能である。しかし、使用済燃料プール監視カメラの冷却には必要流量の 500 L/min を供給すれば十分であることから、オリフィス等により冷却器の入口圧力は 0.3~0.4 MPa 程度に調整する。

### 5.1 冷却器メーカーにおける性能試験結果

試験結果	冷却器入口に 16 °C の空気を供給し、冷却器出入口の温度及び流量を測定。 圧力が変化した場合においても温度差 50 °C の冷却能力は確保されている。 <table border="1"><thead><tr><th>入口圧力 (MPa)</th><th>入口流量 (L/min)</th><th>入口温度 (°C)</th><th>出口流量 (L/min)</th><th>出口温度 (°C)</th><th>温度差 (°C)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.3</td><td>491</td><td>16</td><td>172</td><td>-35</td><td>51</td></tr><tr><td>0.4</td><td>624</td><td>16</td><td>218</td><td>-38</td><td>54</td></tr><tr><td>0.5</td><td>754</td><td>16</td><td>264</td><td>-39</td><td>55</td></tr><tr><td>0.6</td><td>901</td><td>16</td><td>315</td><td>-39</td><td>55</td></tr><tr><td>0.7</td><td>1043</td><td>16</td><td>365</td><td>-40</td><td>56</td></tr></tbody></table>	入口圧力 (MPa)	入口流量 (L/min)	入口温度 (°C)	出口流量 (L/min)	出口温度 (°C)	温度差 (°C)	0.3	491	16	172	-35	51	0.4	624	16	218	-38	54	0.5	754	16	264	-39	55	0.6	901	16	315	-39	55	0.7	1043	16	365	-40	56
入口圧力 (MPa)	入口流量 (L/min)	入口温度 (°C)	出口流量 (L/min)	出口温度 (°C)	温度差 (°C)																																
0.3	491	16	172	-35	51																																
0.4	624	16	218	-38	54																																
0.5	754	16	264	-39	55																																
0.6	901	16	315	-39	55																																
0.7	1043	16	365	-40	56																																
試験条件	冷却器周囲温度 — 冷却器入口温度 16 °C 冷風率 35 % 冷却器入口圧力 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa, 0.7 MPa																																				
試験内容	冷却器入口に 16 °C の空気を供給し、入口圧力を変化させ、冷却器出入口の流量及び温度を測定。																																				

## 5.2 周囲温度の変化による冷却能力の確認

メーカー確認試験は試験時の周囲温度は非公開となっており、周囲温度の冷却能力への影響は確認できない。よって、周囲温度 100 °C 以上の状態での冷却能力の確認を追加で行い、重大事故等時の環境においても冷却能力が保たれることを確認した。

試験結果	<p>周囲温度が上昇した時の冷却器性能を確認するため、冷却器の周囲を約 55 °C、100 °C 以上の状態で、冷却器入口に 100 °C 以上の空気を供給し、冷却器出入口の温度を測定した。重大事故等時の冷却器周囲温度の 100 °C においてもメーカー試験結果同様の冷却能力が確保されることを確認した。</p> <p>①周囲温度：55 °C</p> <table border="1" data-bbox="488 658 1441 828"> <thead> <tr> <th>入口圧力 (MPa)</th> <th>入口流量 (L/min)</th> <th>入口温度 (°C)</th> <th>出口流量 (L/min)</th> <th>出口温度 (°C)</th> <th>温度差 (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>②周囲温度：100 °C</p> <table border="1" data-bbox="488 875 1441 1046"> <thead> <tr> <th>入口圧力 (MPa)</th> <th>入口流量 (L/min)</th> <th>入口温度 (°C)</th> <th>出口流量 (L/min)</th> <th>出口温度 (°C)</th> <th>温度差 (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	入口圧力 (MPa)	入口流量 (L/min)	入口温度 (°C)	出口流量 (L/min)	出口温度 (°C)	温度差 (°C)							入口圧力 (MPa)	入口流量 (L/min)	入口温度 (°C)	出口流量 (L/min)	出口温度 (°C)	温度差 (°C)						
入口圧力 (MPa)	入口流量 (L/min)	入口温度 (°C)	出口流量 (L/min)	出口温度 (°C)	温度差 (°C)																				
入口圧力 (MPa)	入口流量 (L/min)	入口温度 (°C)	出口流量 (L/min)	出口温度 (°C)	温度差 (°C)																				
試験条件	<p>冷却器周囲温度 約 55 °C、100 °C 以上          冷却器入口温度 100 °C 以上          冷風率 35 % (固定)          冷却器入口圧力 0.5 MPa、0.6 MPa、0.7 MPa</p>																								
試験内容	<p>本試験では、冷却器性能の温度依存性を確認するため、冷却器の周囲を約 55 °C、100 °C 以上の状態で、冷却器入口に 100 °C 以上の空気を供給し、冷却器出入口の温度を測定した。</p>																								
試験回路構成	 <p>試験回路構成図は、空気圧縮機から空気加熱器へ、冷却器入口圧力調整弁を経て冷却器の入口に供給される。冷却器の入口には、入口圧力計測器、入口温度計測器、入口流量計測器が設置されている。冷却器の周囲温度は、周囲温度調整弁によって 100 °C 以上に調整される。冷却器の上部には周囲温度計測器が設置されている。冷却器の出口には、出口温度計測器と出口流量計測器が設置されている。冷却器の左側は温風出口、右側は冷風出口となる。</p>																								

6. 使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の配管について

使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の圧縮機、除湿器、空気供給弁は原子炉建屋付属棟内の空調機械室内に設置し、冷却器は原子炉建屋原子炉棟に設置する。この間の配管は、原子炉建屋付属棟から原子炉建屋原子炉棟に入り、使用済燃料プール監視カメラ設置場所の冷却器まで敷設する。図 6-1「使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の配管ルート概略図」参照。

この配管の構造強度は、応力解析により確認する。原子炉建屋原子炉棟入口から冷却器の配管は約 70 m の計画であるが、温度評価上は余裕を見込んだ 80 m としてしている。

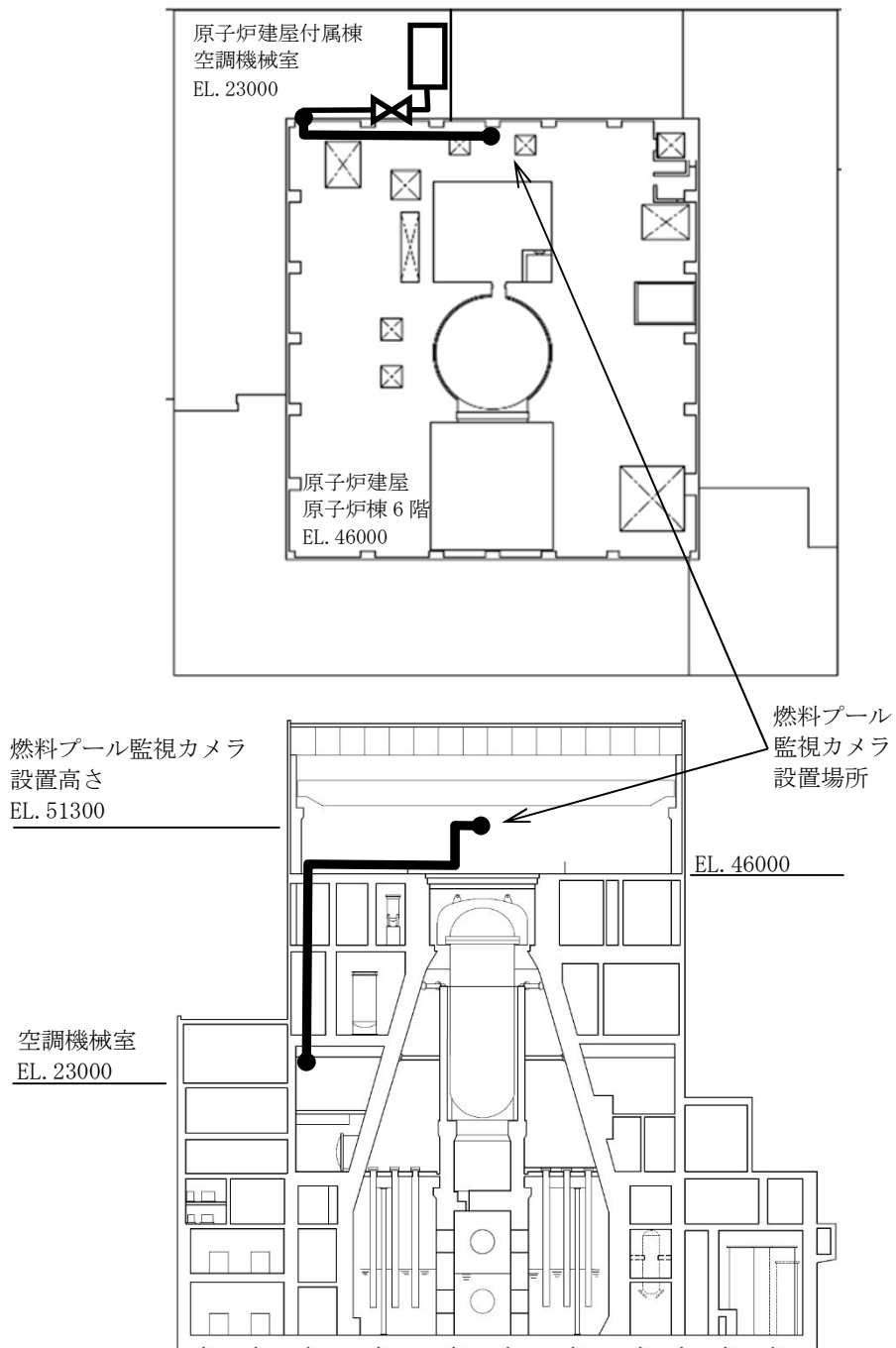


図 6-1 使用済燃料プール監視カメラ空冷装置の配管ルート概略図

## 7. 使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の操作性

重大事故等時に、使用済燃料貯蔵槽の状態監視に使用する使用済燃料プール監視カメラの附属設備である使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置は、以下の機能を有する。

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置は、原子炉建屋における重大事故等時の高温環境下においても使用済燃料プール監視カメラの機能維持を図るために、カメラ本体を冷却するための空気を供給する設計とする。

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置は、使用済燃料プール監視カメラに空気を供給する空気圧縮機、供給する空気の温度上昇を防止するための冷却器、除湿器、配管等で構成し、原子炉建屋原子炉棟及び原子炉建屋附属棟内に設置する。

冷却用空気として、原子炉建屋原子炉棟内に設置する空気圧縮機の周辺空気を吸込み、除湿器、空気供給弁を経て、原子炉建屋原子炉棟内に設置する冷却器に供給する。冷却器で冷却された空気をカメラに供給し、温度の上昇した空気は原子炉建屋附属棟内に放出する。図 7-1「使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の空気供給概略図」参照。

使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置は、中央制御室にて空冷装置の弁操作及び起動操作が可能であり、想定される重大事故等時の環境下においても、確実に操作できる設計とする。

使用時は起動操作のみで必要流量が確保できる設計とする。試験等により必要流量が確保されていることを確認し、試験後は流量等に影響を与える操作をしないことで必要流量を確保する。

設置する弁は全開又は全閉で使用する設計とし、開閉状態を管理する。

冷却器の冷風率調整ねじは設置時以降、操作しないこととする。

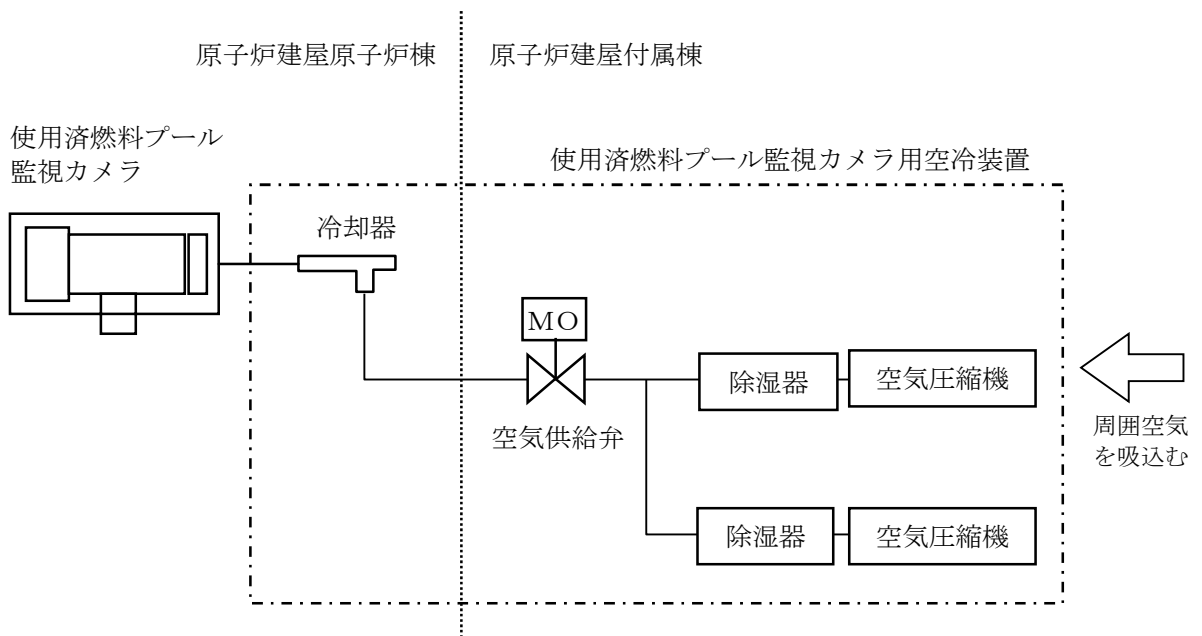


図 7-1「使用済燃料プール監視カメラ用空冷装置の空気供給概略図」