



使用済燃料の崩壊熱減少に伴う 性能維持施設の変更について

2021年11月1日

関西電力株式会社



- 現在、美浜 2 号炉の使用済燃料ピットには、美浜 2 号炉の使用済燃料510体全数を貯蔵しており、使用済燃料の冷却期間は運転停止から9年以上経過し、十分に冷却が進んでいる状況である。（今後は、時間経過及び搬出により、さらに冷却が進むのみ）
- この状況を踏まえ、性能維持施設による使用済燃料ピット水の冷却を停止した場合に使用済燃料ピット水の温度が保安規定で定められている施設運用上の基準65℃を超えないことを確認する目的で、2020年夏季に美浜2号炉の使用済燃料ピット水の冷却停止試験を実施した。
- 試験結果を踏まえ、今回の申請では、使用済燃料の冷却に係る設備（原子炉補機冷却設備、補機冷却海水設備及びディーゼル発電機（以下、D/Gという。））による使用済燃料ピット水の冷却は不要であると評価した。
- 本資料は、今回の試験結果をまとめるとともに、環境条件（気温の上昇等）の変化に対する影響を評価したうえで、性能維持施設の変更が廃止措置の安全性に対して影響が無いことの確認を行うものである。

使用済燃料ピット（SFP）冷却停止試験の試験条件等は以下の通り。

○試験期間

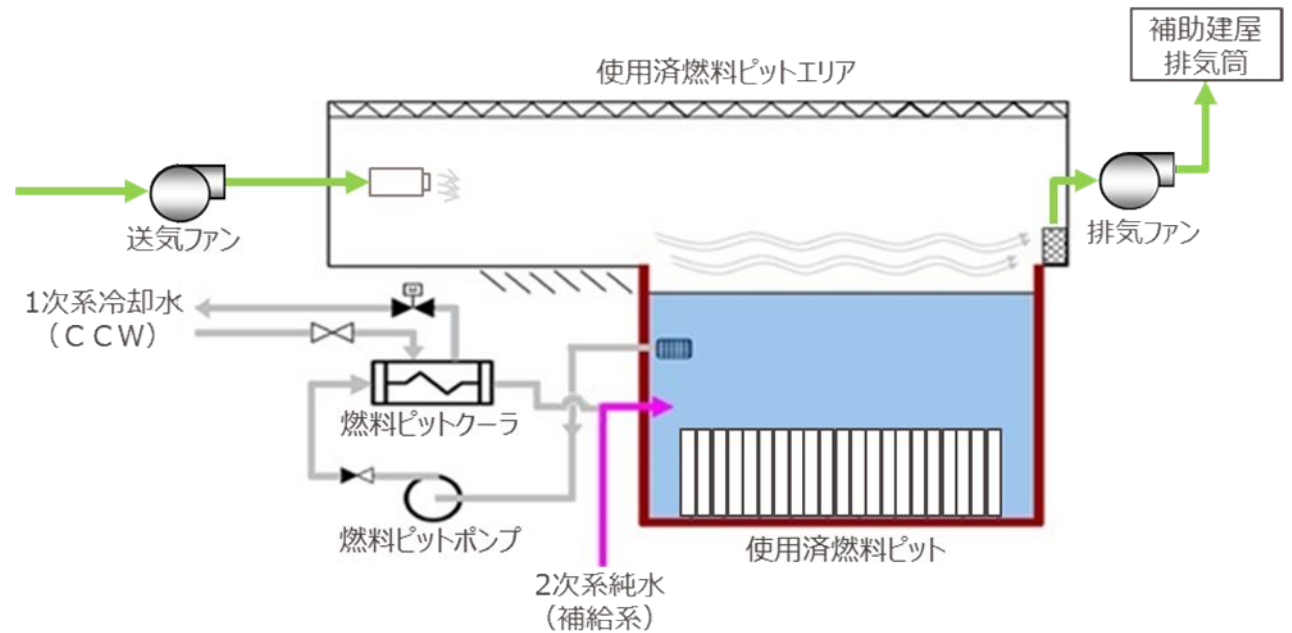
2020.6.8 ~ 2020.10.9

○試験条件

- ・燃料ピットポンプの状態：停止
- ・換気空調の状態：連続運転
- ・使用済燃料ピットへの補給
：水位が標準水位(水深□m)より、
4cm程度低下した際に給水

○測定項目

- ・水温 } ⇒ □ 3 □ 4
- ・気温 }
- ・室温 }
- ・水位 } ⇒ □ 5
- ・補給水温度 }



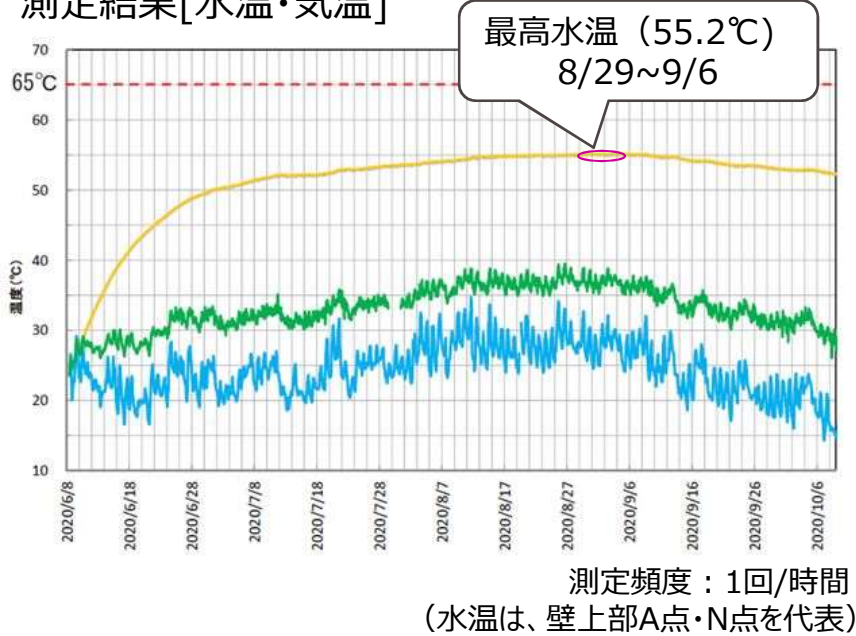
試験時の概略系統

太枠囲みの範囲は、機密に係る事項ですので公開することはできません。

SFP水温、大気温、SFPエリア内室温（水面近傍）の測定結果について、以下に示す。

水温測定箇所

測定結果[水温・気温]



- A点 (Aピット壁面側上)
- N点 (Bピット壁面側上)
- 大気温 (°C)
- 室温 (水面近傍) (°C)



- 6/8に冷却を停止して以降、水温は平衡状態に至るまでしばらく上昇した。
- 8/29に最高水温55.2°Cを記録した。
- その後、9/6まで最高水温近辺の温度を継続して記録し、その後気温低下に伴い水温が低下した。

[最高水温(N点)]

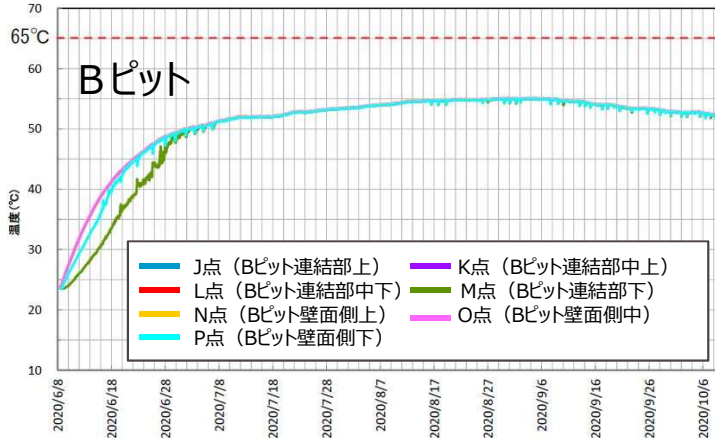
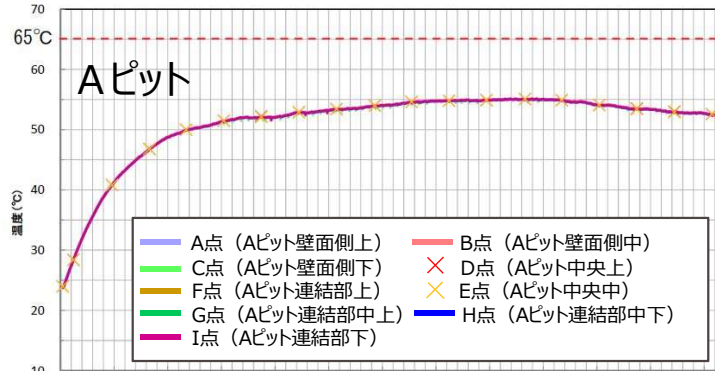
測定日	水温 (°C)
次の期間、断続的に 8月29日 20時 ~ 9月6日 5時	55.2

太枠囲みの範囲は、機密に係る事項ですので公開することはできません。

測定結果 その2 (ピット別)

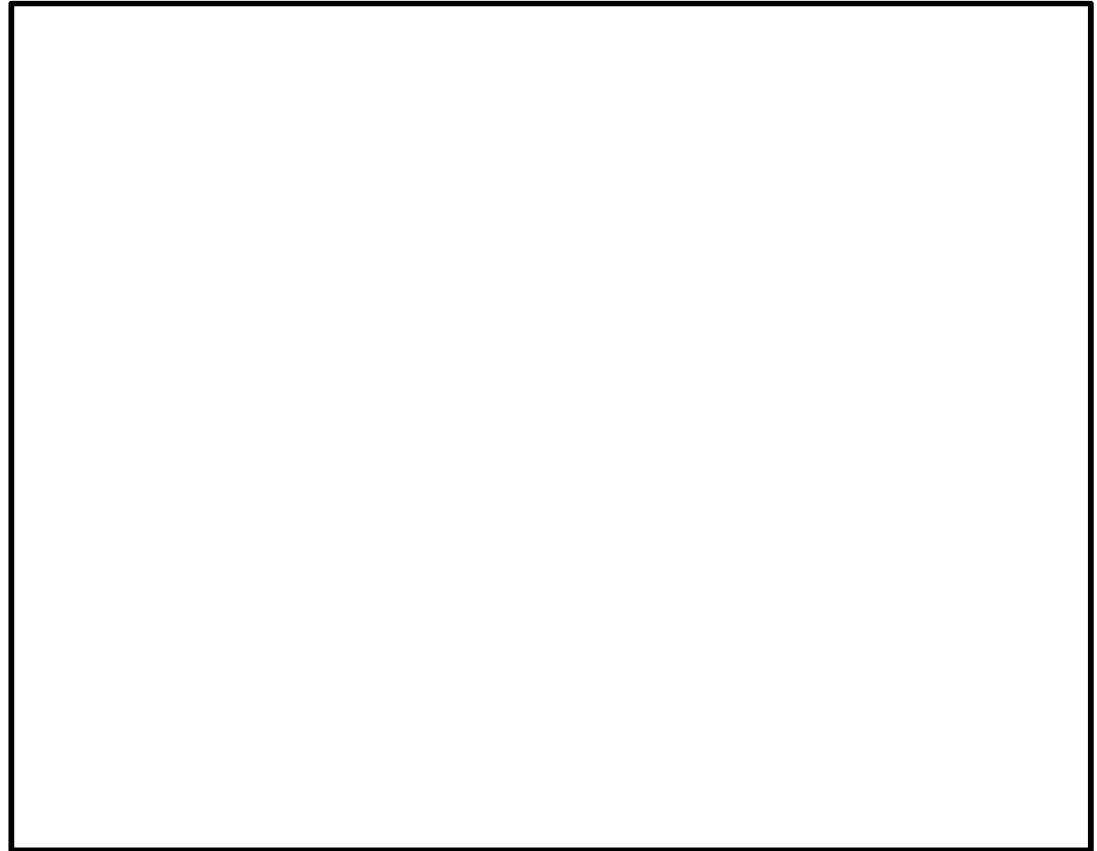
全測定点におけるSFP水温の測定データの推移を下記のグラフに示す。

測定結果[ピット別]



測定頻度：1回/時間 (中央部の水温は、1回/週で参考測定)

水温測定箇所



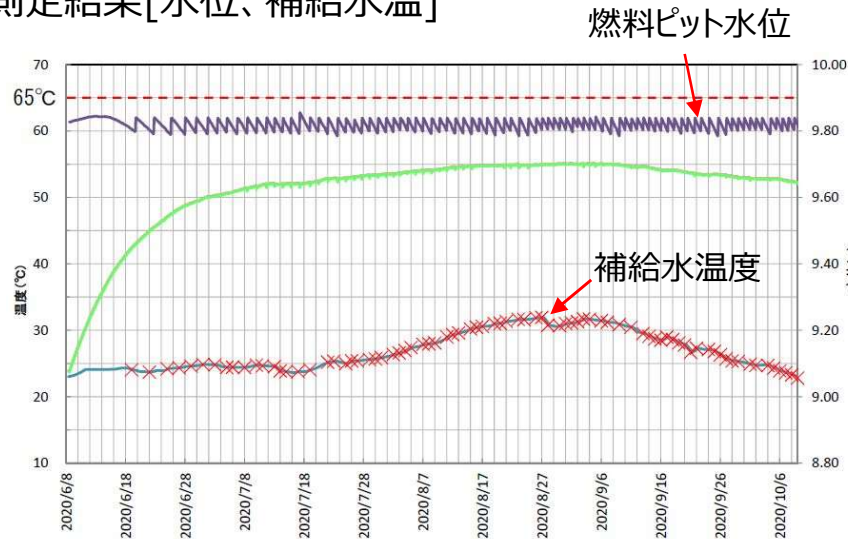
- Aピットの水温は、全ての測定点で終始ほぼ同一の水温であった。
- Bピットの水温は、試験開始以降しばらくは上部と底部でかい離が見られたが、時間経過に伴い温度差は小さくなり、7月上旬以降は全ての測定点でほぼ同一の水温となった。
- Bピットの水温がほぼ同一となって以降は、AピットとBピット全測定点の水温はほぼ同じ値を示しており、AピットとBピットの水温は同一となっていることが確認された。

太枠囲みの範囲は、機密に係る事項です
ので公開することはできません。

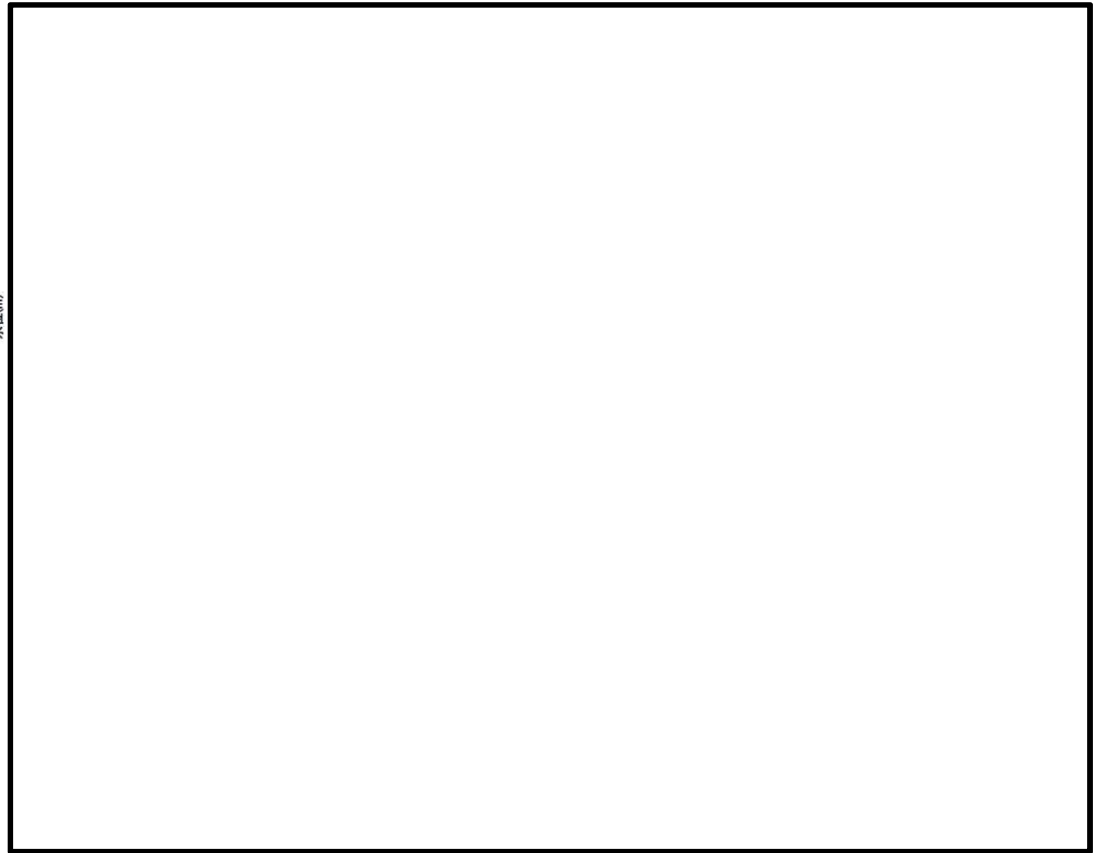
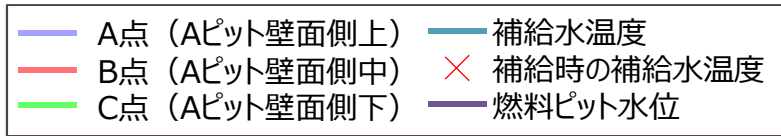
SFP水位の低下に伴い、給水を行った。SFP水位、SFP水温、補給水温の推移を下記のグラフに示す。

水温測定箇所

測定結果[水位、補給水温]



補給水温の測定頻度：補給時に測定
(補給の有無に関わらず1回/日で参考測定)



- 水位が標準水位(水深12m)より、4cm程度低下した際に、給水を実施した。(試験期間中に合計86回実施)
- 1回あたりの補給水量は、約5m³であった。(SFP水量は約1600m³)
- 給水による水温の有意な変化はなかった。

太枠囲みの範囲は、機密に係る事項です
ので公開することはできません。

- 今回の冷却停止試験は、気温の高い夏季に、換気空調を常時運転し、水位の低下に応じて一定頻度で給水を行う条件で、実施した。
- 本検討では、これらの条件が仮に冷却停止試験時と変わっても、SFP水温が保安規定で定められている施設運用上の基準65℃を超えないことを確認するため、①室温及び気温、②補給水、③換気空調の3項目について、それぞれ条件が変わった場合の水温への影響を評価した。
- これら3項目の評価を踏まえて、停電によってSFP水温が保安規定で定められている施設運用上の基準65℃に達するまでにどれくらいの猶予期間があるのかを評価した。

評価概要は以下の通り。

概要	頁
①SFP水温が65℃になる場合の室温、気温 SFP最高水温測定時(9/3)の試験データを基に、SFP水温が65℃となる際の室温・気温を、試験時と65℃想定時の関係性より評価した。	7
②補給水のSFP水温への影響 SFP最高水温測定時(9/3)の試験データを基に、SFPへの補給水の給水によってSFP水温がどの程度低下するのかを評価した。	8
③換気空調のSFP水温への影響 SFP最高水温測定時(9/3)の試験データを基に、換気空調系が停止した場合、排出されなくなる熱によって、どの程度SFP水温が上昇するのかを評価した。	9

↓ 上記3項目を踏まえ停電時を評価

停電時のSFP水温が65℃に達するまでの期間 停電によって試験時の環境（補給水の給水、換気空調の常時運転）と異なる状況になった場合に、SFP水温が保安規定で定められている施設運用上の基準65℃に達するまでの猶予期間がどの程度あるのかを評価した。	10
---	----

環境条件の変化に対する検討 - ①水温が65℃になる場合の室温・気温 -

試験データを基に水温が65℃となる場合の室温及び外気温を算出し、外気温の裕度を評価した。

評価結果

水温が65℃になる為には、一日平均気温が約39℃になる必要がある。
試験時の平均気温は約29℃であり、試験時よりも平均気温が10℃高くなるような状況は現実的に考え難い。

評価方法

試験時の伝熱量（（水温→室温）と（室温→気温））と水温65℃時の伝熱量の関係から、水温65℃の時の室温及び外気温を算出した。

○使用済燃料ピット水（水温） ⇔ 室内（室温） の関係

- ・崩壊熱は一定であり、壁等から外部への伝熱量（①）は増加する（∵土壌温度がほぼ一定）ため、室内への伝熱量（②+③）は試験時より減少する。
- ・飽和蒸気圧の関係から、高温領域での水温と室温の温度差（ ΔT_2 ）は、低温領域での温度差（ ΔT_1 ）よりも小さくなるので、小さい温度減少で同じ熱量を伝熱することができる。

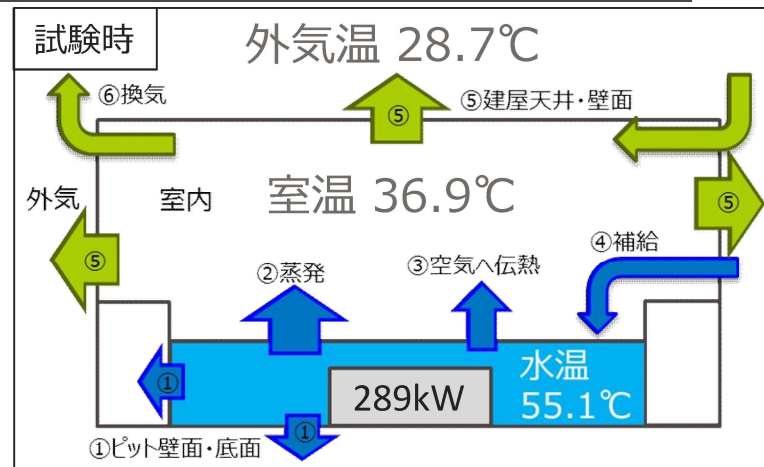
➡ 水温65℃での温度差（水温 - 室温）は、試験時よりも減少。

○室内（室温） ⇔ 外気（気温） の関係

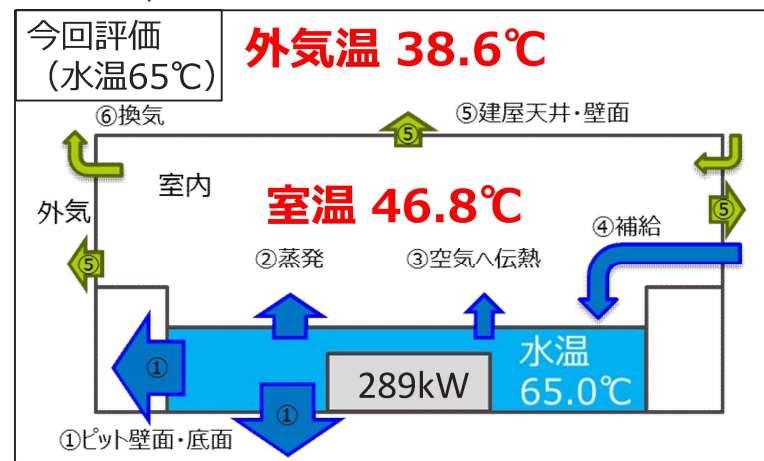
- ・外気への伝熱量は、ピット水からの伝熱量に等しく（②+③ = ⑤+⑥）、この伝熱量は試験時より減少する。
- ・室温と外気温の温度差は、伝熱量に比例する。

➡ 水温65℃での温度差（室温 - 気温）は、試験時よりも減少。

上記の（水温→室温）と（室温→気温）の関係から、水温65℃時のそれぞれの温度差は、保守的に試験時と同じ温度差で室温及び外気温を見積もった右表よりも小さくなる。



伝熱割合の変化を踏まえ、水温65℃になった際の室温・外気温を評価



	水温65℃時 (評価値)	(参考) 試験データ
水温 (一日平均)	65.0°C	55.1°C
室温 (一日平均)	46.8°C	36.9°C
外気温 (一日平均)	38.6°C	28.7°C

SFPへの補給水の給水による、水温への影響について、評価した。

評価結果

補給水の給水により、水温は約0.07℃/回程度低下する。
実績から補給頻度はおよそ3日に2回程度であり、補給による水温への影響は小さい。

評価方法

給水による温度変化について、比熱を用いた計算式により算出する。

(計算式)

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Q : 熱量[kJ]
 m : 質量[kg]
 C_p : 比熱[kJ/(kg・K)]
 ΔT : 温度差[K]

補給水を給水した後の、SFPの水温を T_w とすると、補給水及びピット水それぞれの熱量変化は以下の通り。

$$Q_1 = m_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_w - T_1)$$

1 : 補給水を指す添字

$$Q_2 = m_2 \cdot C_{p2} \cdot (T_2 - T_w)$$

2 : ピット水を指す添字

T_1 : 補給水の水温[℃]
 T_2 : 補給前のSFP水温[℃]
 T_w : 熱平衡に達した時のSFP水温[℃]

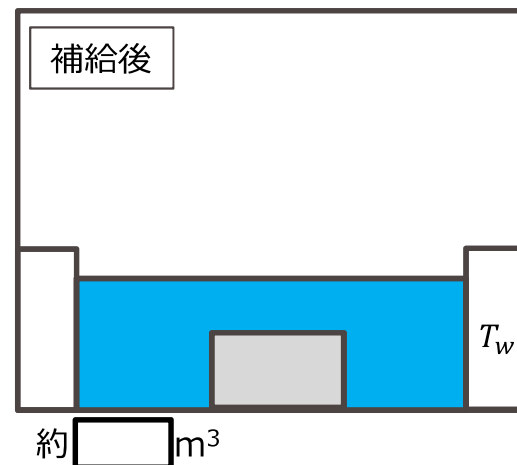
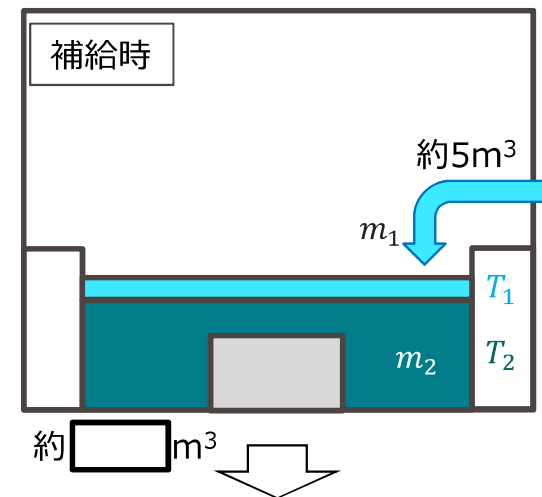
パラメータ	m_1	m_2	C_{p1}	C_{p2}	T_1	T_2
値			4.180	4.182	31.69	55.10

熱量の保存により両者は等しくなるので、 $Q_1 = Q_2$ 即ち、
 $m_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_w - T_1) = m_2 \cdot C_{p2} \cdot (T_2 - T_w)$

パラメータ	T_w
値	55.03

以上の関係性を踏まえ、9/3の水温測定データに基づき計算したSFP水温の変化量は次の通りである。

$$\Delta T = T_2 - T_w \cong 0.07$$



太枠囲みの範囲は、機密に係る事項ですので公開することはできません。

換気空調系の水温への影響について、評価した。

評価結果

換気空調の水温への寄与は約0.05℃/hと小さく、仮に換気空調系が停止し室内の熱が外部への伝達なしに全て水温上昇に寄与したとしても非常に小さな上昇率であり、影響は小さい。
 なお、換気空調系は性能維持施設であり、換気空調系の長期停止状態が継続する状態は考え難い。

評価方法

換気空調系による温度変化について、比熱を用いた計算式により算出する。

(計算式)

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$\left[\begin{array}{ll} Q : \text{熱量[kJ]} & m : \text{質量[kg]} \\ C_p : \text{比熱[kJ/(kg}\cdot\text{K)]} & \Delta T : \text{温度差[K]} \end{array} \right]$$

送気により供給される低温空気が、室内の高温空気と同じ温度になって室外に排気されるとすると、換気により室内から奪われる熱量は以下の通り。

$$Q_{air} = m_{air} \cdot C_{p,air} \cdot \Delta T_{air}$$

$$\Delta T_{air} = T_{room} - T_{air}$$

air : 送気を指す添字

room : 室内を指す添字

パラメータ	m_{air}	$C_{p,air}$	T_{room}	T_{air}
値		1.007	36.89	31.58

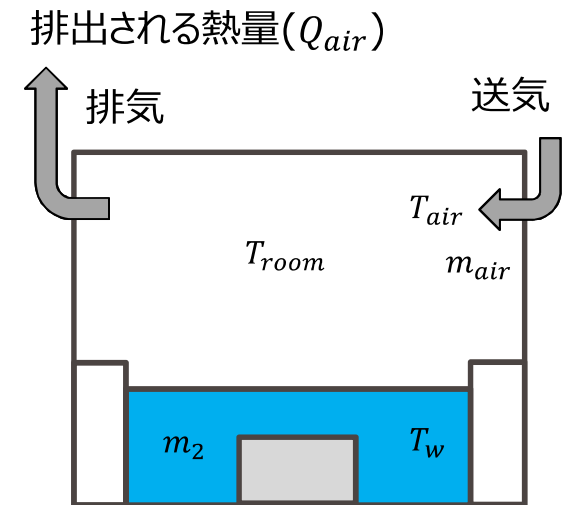
この換気により室内から奪われる熱量 Q_{air} が全てSFP水温に寄与していると仮定すると、寄与している水温への影響は以下の通り。

$$Q_{air} = m_2 \cdot C_{p2} \cdot \Delta T'$$

$\Delta T'$: 温度上昇幅 (1時間あたり) [K]

2 : ピット水を指す添字

パラメータ	m_2	C_{p2}
値		4.182



9/3の水温最高時点における試験測定データから算出した水温への影響は次の通り。
 $\Delta T' \approx 0.05$

太枠囲みの範囲は、機密に係る事項ですので公開することはできません。

今回D/Gを性能維持施設から削除するため、前述の3項目の評価を踏まえ、停電の影響を考慮し、SFP水温が65℃に達するまでに、どの程度の猶予期間があるのかを評価した。

評価結果

SFPの冷却停止状態の最高水温である55.2℃から65℃に上昇するには最短でも約8日と十分な時間的裕度を有する。

評価方法

(停電による補給水への影響)

停電で給水のためのポンプを動かさない状況になっても燃料取替用水タンクの水は、自重注水が可能であるので、停電の影響を考慮する必要はない。

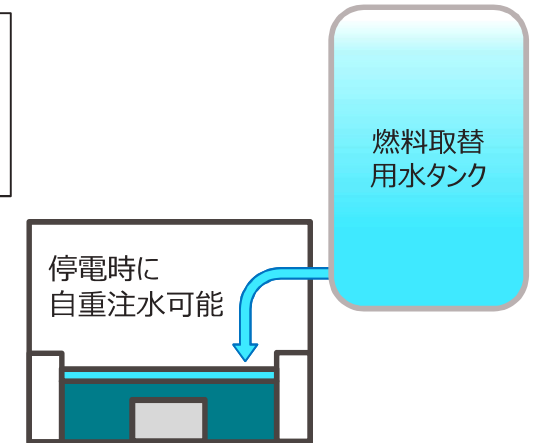
(換気空調停止による影響)

P.9の評価から、換気空調停止により水温は約0.05℃/h上昇する。SFPの冷却停止状態の最高水温である55.2℃で換気空調が停止し、右図に示すように水温が65℃まで約0.05℃/hで線形的に上昇すると仮定して、65℃に達する最短日数を算出する。

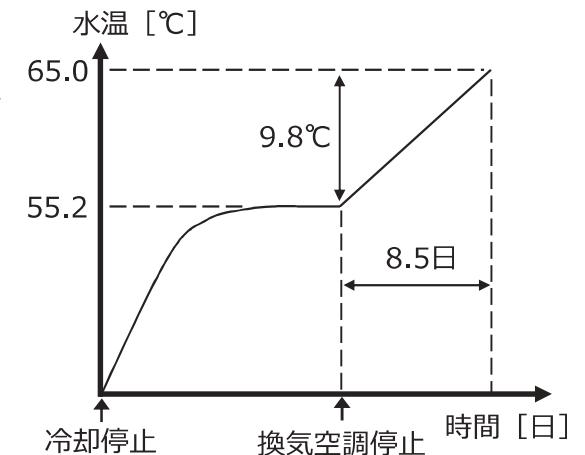
計算結果は以下の通り。

$$\frac{(65.0 - 55.2)[^{\circ}\text{C}]}{\text{温度差}} \div \frac{0.0477[^{\circ}\text{C}/\text{h}]}{\text{水温上昇レート}} \doteq 205[\text{h}] \doteq 8.5[\text{day}]$$

温度差 水温上昇レート 65℃に達する最短日数



自重注水による給水イメージ



SFP冷却停止状態における換気空調停止後のSFP水温の推移イメージ

SFP冷却停止試験及び環境条件の変化に対する影響評価の結果は次の通り。

- 美浜2号炉の使用済燃料ピット水の冷却を停止しても、夏季において使用済燃料ピット水の水温は約55℃以下で推移し、保安規定で定められている施設運用上の基準（65℃）に対して十分な余裕がある。
- 仮にSFP水温が65℃になることを想定すると、外気温（一日平均）が約39℃になる必要があり、現実的には起こることは考え難い。
- また停電時を想定した場合、SFPへの給水は燃料取替用水タンクからの自重注水により可能であることから、換気空調停止の影響のみ考慮すると、SFP水温が55.2℃から65℃に上昇するには最短でも約8日と十分な時間を有する。
- したがって、使用済燃料ピット水の冷却を停止しても、保安規定で定められている施設運用上の基準（65℃）を超過することは考え難く、使用済燃料ピット水の冷却は不要である。

ここから、原子炉補機冷却設備、補機冷却海水設備及びディーゼル発電機を性能維持施設から除外することについて、それぞれの具体的な冷却水の供給先及び電源供給先に対し影響がないことを確認する。

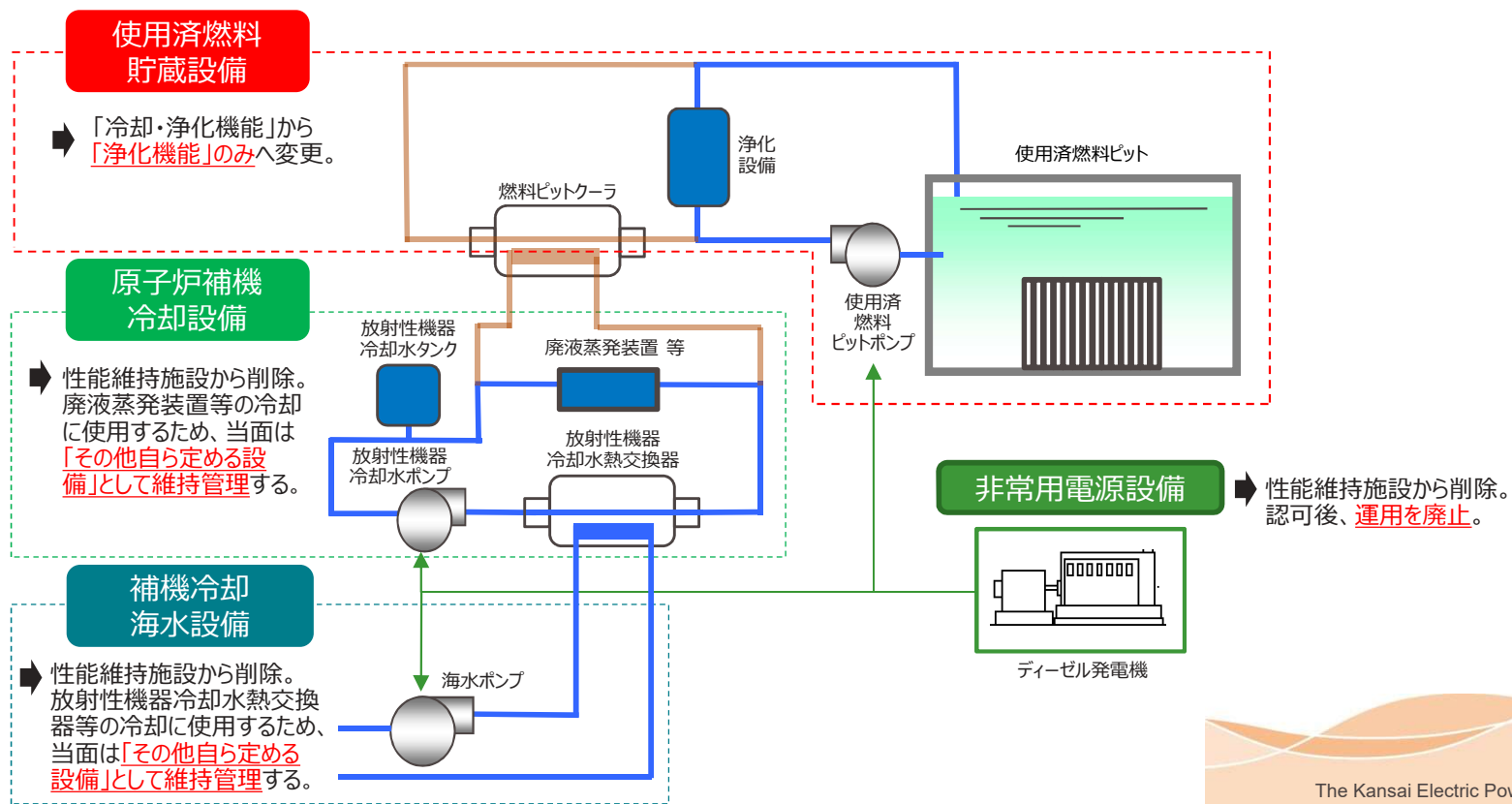
性能維持施設の変更内容および確認内容は以下の通り。

内容	頁
使用済燃料ピット冷却停止に係る性能維持施設の変更内容	13
性能維持施設としての冷却系設備の必要性について	14
電源供給先のうちD/Gによる電源供給の要否について	15 ~ 17

使用済燃料ピット冷却停止に係る性能維持施設の変更内容

使用済燃料ピット冷却停止に係る性能維持施設の変更内容を下表に、当該設備の系統概要を下図に示す。

変更前			変更	変更後			
設備等の区分	設備名称	機能		設備等の区分	設備名称	機能	
核燃料物質貯蔵設備	使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料ピット、使用済燃料ラック	臨界防止機能	核燃料物質貯蔵設備	使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料ピット、使用済燃料ラック	臨界防止機能
		使用済燃料ピット水位を監視する設備	水位監視機能			使用済燃料ピット水位を監視する設備	水位監視機能
		使用済燃料ピット水の漏えいを監視する設備	漏えい監視機能			使用済燃料ピット水の漏えいを監視する設備	漏えい監視機能
		使用済燃料ピット 冷却装置	冷却・浄化機能			使用済燃料ピット 冷却装置	浄化機能
非常用電源設備	ディーゼル発電機	電源供給機能	→	非常用電源設備	蓄電池		電源供給機能
	蓄電池						
原子炉補機冷却設備	放射性機器冷却水ポンプ		→	削除			
	放射性機器冷却水熱交換器						
	放射性機器冷却水タンク						
補機冷却海水設備	海水ポンプ		→	削除			



[冷却系設備]

- 冷却系設備（原子炉補機冷却設備、補機冷却海水設備）の冷却水の供給先及び性能維持施設としての冷却水の必要性については下表の通り。
- 使用済燃料の冷却が不要になれば、安全確保上、冷却水の供給が必要となる性能維持施設はないことを確認した。

性能維持施設としての冷却系設備の必要性

冷却系設備	冷却水の供給先	変更前	変更後	説明
原子炉補機冷却設備 〔・放射性機器冷却水ポンプ ・放射性機器冷却水熱交換器 ・放射性機器冷却水タンク〕	使用済燃料貯蔵設備 （使用済燃料ピット冷却装置）	○	×	使用済燃料の冷却が不要になれば、原子炉補機冷却設備による冷却水の供給は必要なくなる。
	液体廃棄物の廃棄設備 （廃液蒸発装置）	×	×	廃液処理時に使用する設備であり、冷却が停止しても、廃液処理を停止すれば問題ない設備であるため、安全系による冷却（性能維持施設による冷却）は必須でない。
補機冷却海水設備 〔・海水ポンプ〕	原子炉補機冷却設備 （放射性機器冷却水熱交換器）	○	×	使用済燃料の冷却が不要になれば、補機冷却海水設備による原子炉補機冷却設備（燃料ピット冷却器）への冷却水の供給は必要なくなる。
	非常用電源設備 （ディーゼル発電機）	○	×	使用済燃料の冷却が不要になれば、ディーゼル発電機は必要なくなる。 （次ページ以降参照）

[電源関係]

- D/Gによる電源供給先、及び停電時のD/Gによる電源供給の要否は下表の通り。
- 使用済燃料の冷却が不要になって以降は、停電時にD/Gによる電源供給が必須となる設備はない。

電源供給先のうちD/Gによる電源供給の要否 (1 / 3)

電源を使用する性能維持施設		維持機能	D/Gによる電源供給先(安全系母線の接続先)	D/Gによる電源供給の要否		説明
				変更前	変更後	
核燃料物質取扱設備	使用済燃料ピットクレーン	臨界防止機能	×	×	×	—
	原子炉補助建屋クレーン	燃料落下防止機能	×	×	×	
核燃料物質貯蔵設備	燃料ピットポンプ	冷却機能	○	○	×	使用済燃料の冷却が不要になれば、維持する必要はない。 なお、浄化については、必要時（実績：年に1回程度）に樹脂塔へ通水を行っているものであり、停電時の浄化は必須ではない。
		浄化機能				
	使用済燃料ピット水位計	水位監視機能	○	×	×	停電時は、蓄電池による電源供給を行う。 また、携帯型水位計や、現地水面計を用いた使用済燃料ピット水位の監視も可能である。
液体廃棄物の廃棄設備	廃液蒸発装置	放射性廃棄物処理機能	×	×	×	—
	洗浄排水処理装置		×	×	×	
固体廃棄物の廃棄設備	ベイラ		×	×	×	

電源供給先のうちD/Gによる電源供給の要否（2 / 3）

電源を使用する性能維持施設		維持機能	D/Gによる電源供給先(安全系母線の接続先)	D/Gによる電源供給の要否		説明
				変更前	変更後	
放射線管理施設	固定エリアモニタ (補助建屋内ドラム詰室、除染洗たく室、使用済燃料ピット付近)	放射線監視機能	○	×	×	固定エリアモニタは、管理区域内の線量の変動・人が駐在・作業等の立入のあるエリアに設置しており、停電時には、ドラム詰室や使用済燃料移動エリアにて作業が行われておらず、線量率に変動が無いことを確認するとともに、必要に応じてサーベイメータ等による監視を行う。また、蓄電池による電源供給も可能であり、D/Gによる電源供給ができなくとも監視は可能である。
	手足モニタ（退出モニタ）		×	×	×	—
	排気モニタ (格納容器排気筒ガスモニタ、補助建屋排気筒ガスモニタ)	放射線監視機能	○	×	×	施設内の希ガス、よう素については使用済燃料が破損しない限り施設内に発生源はなく、停電時は、管理区域内作業を停止するとともに、換気空調系は停止し、ダンパが閉止するため、放射性物質は管理区域外へ放出されない。 また、蓄電池による電源供給も可能であり、さらにはモニタリングポストによる周辺環境への影響を監視することにより、D/Gによる電源供給ができなくとも監視は可能である。
	排水モニタ (液体廃棄物処理設備排水モニタ)	放出管理機能	○	×	×	放射性液体廃棄物の放出は、放出タンク内の放射性物質の量をあらかじめ確認してから放出作業を行っており、停電時は、排水のポンプが停止するとともに、放出作業を行わない。 また、蓄電池による電源供給も可能であり、D/Gによる電源供給ができなくとも監視は可能である。
	排水のサンプリングモニタ設備 (原子炉基礎湧水モニタ、タービンサンプ水モニタ)	放射線監視機能	○	×	×	原子炉基礎湧水やタービンサンプ水には元々放射性物質は含まれておらず、念のために測定しているものであるが、停電時は、排水ポンプが停止することから排水は行われない。 また、蓄電池による電源供給や、現地サンプリングによる監視も可能であり、D/Gによる電源供給ができなくとも監視は可能である。

電源供給先のうちD/Gによる電源供給の要否 (3 / 3)

電源を使用する性能維持施設		維持管理	D/Gによる電源供給先 (安全系母線の接続先)	D/Gによる電源供給の要否		説明				
				変更前	変更後					
原子炉格納施設	原子炉格納容器換気送風機	換気機能	×	×	×	—				
	原子炉格納容器換気排風機									
	アニュラス排風機						○	×	×	運転時とは異なり炉心に燃料はなく、冷却材喪失事故などの事故によるアニュラス内の負圧措置を維持する必要はない。
原子炉補機冷却設備	放射性機器冷却水ポンプ	冷却機能	○	○	×	使用済燃料の冷却が不要になれば、維持する必要はない。				
補機冷却海水設備	海水ポンプ		○							
換気設備	補助建屋放射性区域送気ファン	換気機能	×	×	×	—				
	使用済燃料ピット送気ファン									
	補助建屋放射性区域排気ファン						○	×	×	運転時とは異なり、事故時に使用する低圧注入ポンプや格納容器スプレイポンプは使用しないことから、これら設備が設置されている安全補機室の空調管理を停電時に行う必要はない。
	補助建屋主排気フィルタユニット									
	補助建屋主排気ファン									
	出入管理室送気ファン						×	×	×	—
	出入管理室排気ファン									
	放射化学室排気ファン									
照明設備	非常用照明	照明機能	○	×	×	停電時は、蓄電池による電源供給を行う。				