

敦賀発電所 1 号炉  
使用済燃料プールの水温測定結果  
について

2020 年 10 月 21 日  
日本原子力発電株式会社

## 目 次

1. はじめに	1
2. 使用済燃料プールの状況	1
3. 使用済燃料プールの水温測定	1
4. 測定結果に対する考察	6
5. 結論	13

本資料のうち、 は、営業秘密又は核物質防護上の観点から公開できません。

## 1. はじめに

敦賀発電所原子炉施設保安規定の廃止措置管理において、施設運用上の基準として「使用済燃料プールの水温が 65℃以下であること」が要求されている。

## 2. 使用済燃料プールの状況

敦賀 1 号炉の使用済燃料プールには、現時点において、最終サイクルで取り出した使用済燃料を含む使用済燃料 314 体を貯蔵しており、その冷却期間は 9 年を超え、十分冷却が進んでいる状況である。

この状況を踏まえ、夏季における燃料プール冷却系（以下、「FPC 系」という。）の冷却機能停止試験を以下に示すとおり実施し、使用済燃料プール水の水温は、施設運用上の基準値である 65℃に対し十分裕度を持つことを確認した。

## 3. 使用済燃料プールの水温測定

### 3. 1 水温測定内容

試験期間、試験条件、測定項目等は、以下のとおりである。

#### ① 試験期間

- ・ 2019 年 6 月 3 日から 2019 年 9 月 10 日

#### ② 試験条件（概略系統は図 1 のとおり）

- ・ FPC 系熱交換器をバイパスし冷却機能を停止
- ・ プール水浄化のため、FPC 系の循環運転は継続
- ・ 原子炉建屋換気空調設備を全期間連続運転
- ・ 調査期間中、FPC スキマサージタンク水位維持のため、タンク水位 4～5 m の範囲で随時補給を実施

③ 主要な測定項目

- ・ 使用済燃料プール水温
- ・ 大気温度
- ・ 使用済燃料プール水位

④水温の測定箇所

- ・ 使用済燃料プール水温の測定箇所及び FPC 系循環水の出口は図 2 のとおりである。
- ・ プール水温の測定箇所については、FPC 系は循環運転を継続させており、プール水温は均一であると考えられることから、保安規定に定める制限値の確認計器である使用済燃料プール水温計（以下、「SFP 水温計」という。）を測定・評価に用いている。図 3 に使用済燃料プールの寸法及び SFP 水温計位置を示す。

⑤FPC 系の循環運転及びプール水の補給について

- ・ FPC 系については常時循環運転を実施しており、使用済燃料プールから FPC スキマサージタンクへプール水をオーバーフローさせることにより、使用済燃料プールの通常水位を常時維持している。なお、FPC 系の循環運転については、浄化機能維持及び水位維持のため、FPC 系の冷却機能停止後も継続する。
- ・ プール水の蒸発により減少したプール水は FPC スキマサージタンク水位の 4~5 m の範囲で復水貯蔵タンクから随時補給を実施している。
- ・ プール水の補給については期間中 36 回、総量で約  m<sup>3</sup> であった。

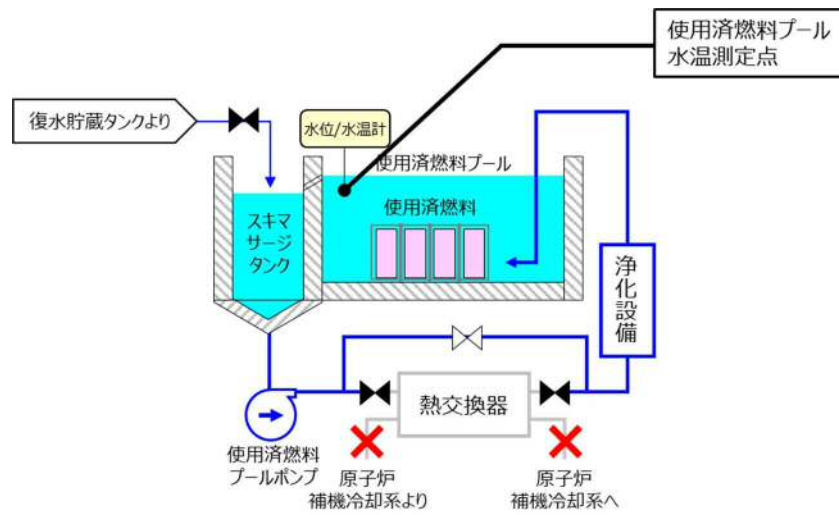


図1 試験時の概略系統と水温測定箇所



図2 使用済燃料プール水温の測定箇所及びFPC系循環水の出口

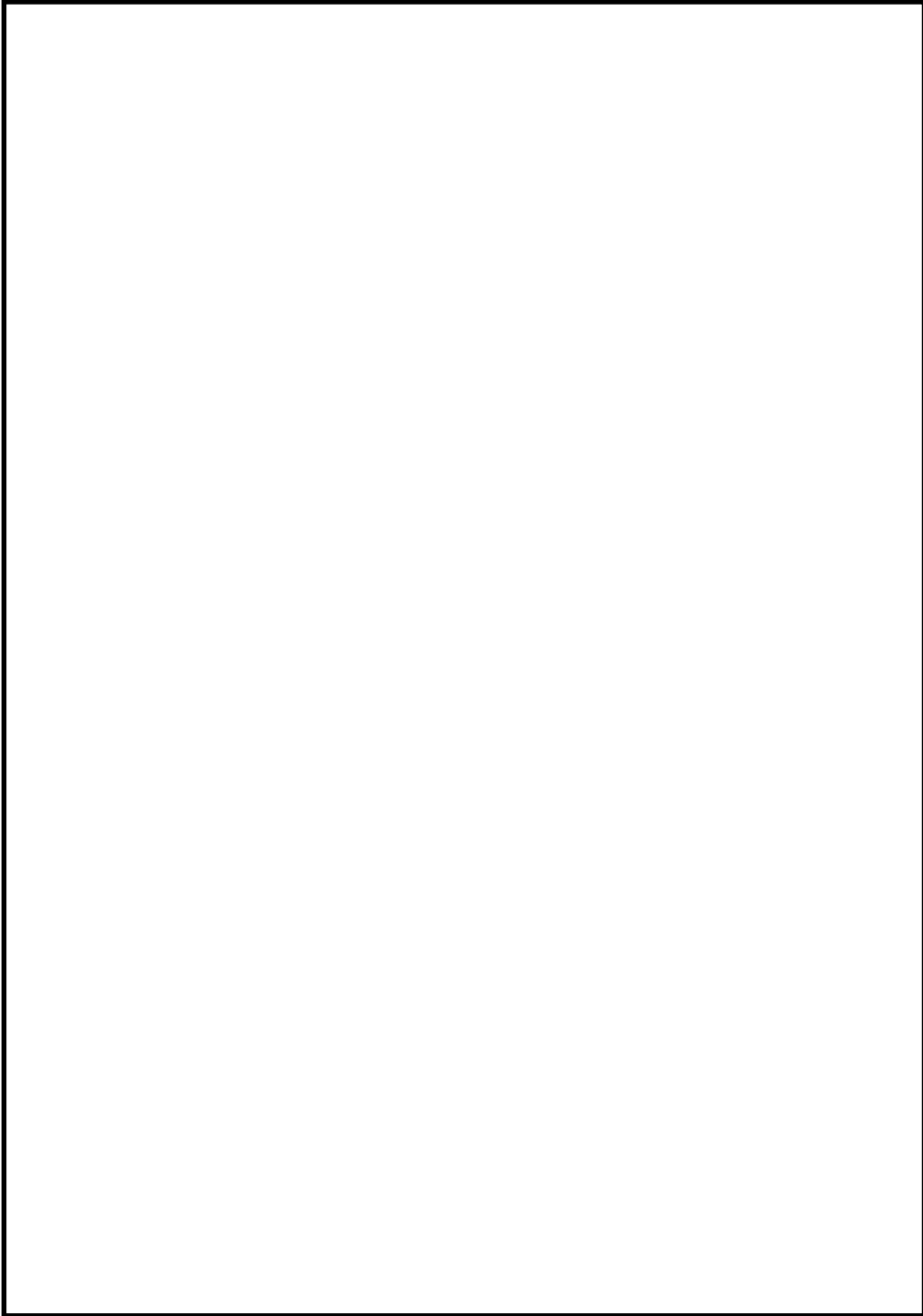


図 3 使用済燃料プール寸法及び SFP 水温計位置

### 3. 2 水温及び気温の測定結果

使用済燃料プール水温及び気温の測定結果は、図4のとおりであり、以下の結果が確認された。なお、各測定点における測定データを参考資料に示す。

- 気温が高くなる夏季においても、水温は50℃未満で推移した。
- 水温は、FPC系の冷却機能を停止して暫くは継続的に上昇したが、40℃を過ぎて以降の上昇は緩やかとなり平衡状態となり、それ以降の水温は気温の変化に応じて変化している。試験期間中の最高水温は8月18日から8月23日の間に記録された46.7℃である。
- FPC系の冷却機能を停止した状態であっても、自然冷却により施設運用上の基準である65℃以下に対し、20℃程度の余裕を有する。

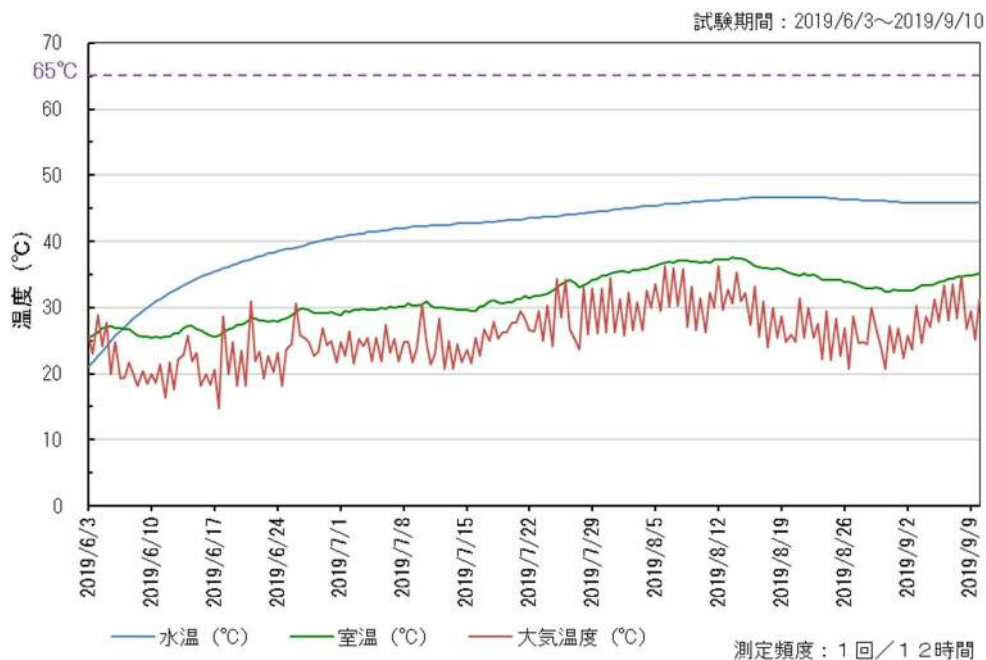


図4 試験時の使用済燃料プール水温，室温及び気温の測定結果

#### 4. 測定結果に対する考察

前項の測定結果を踏まえ、測定結果に対する考察として、以下の確認を行った。

- ・ 気温と水温の連動性の確認
- ・ 最高水温が記録された時期の妥当性確認
- ・ 環境条件の変化に対する概略評価
- ・ 補給水の水温への影響評価
- ・ 使用済燃料プール水温の測定位置の妥当性

具体的な内容についてそれぞれ次項以降に示す。

##### 4. 1 気温と水温の連動性の確認

水温上昇が緩やかとなった、7月1日以降の使用済燃料プール水温の測定結果から、気温の変動に対して5日程度の遅れを有し、使用済燃料プール水温が連動していることが以下のとおり確認できる。この確認結果をグラフに追記したものを図5に示す。

- ・ 7月1日から7月15日頃までは平均気温は落ち着いており、水温も7月8日以降ほぼ平衡状態となっている。
- ・ 7月15日～8月10日付近では、平均気温は上昇傾向にあり、水温もこれに追従して上昇している。
- ・ 8月12日に試験期間中において2番目に高い気温である36.2℃を記録（試験期間中の最高気温は8月6日に記録した36.3℃）して以降、気温は低下傾向にあり、水温についても8月18日に最高水温である46.7℃を記録して以降は一旦平衡に達した後、気温同様に低下している。



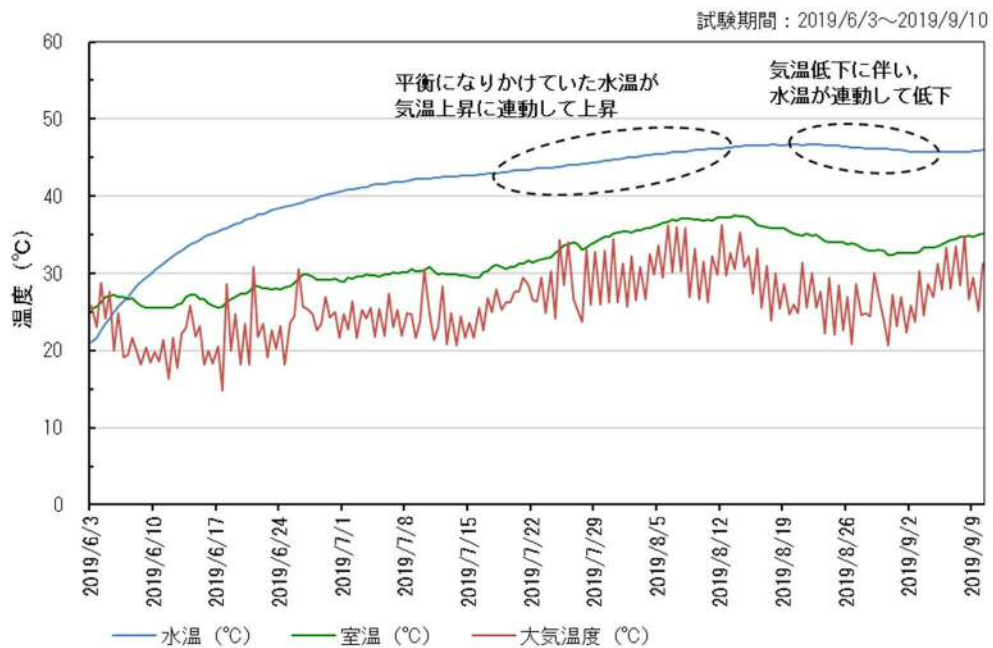


図5 使用済燃料プール 気温変化と水温変化の関係

#### 4. 2 最高水温が記録された時期の妥当性確認

今回の試験において、最高水温は8月18日から8月23日の間に記録されている。

7月1日から9月1日までの1週間ごとの平均気温は表1のとおりであり、平均気温は8月中旬が高いことから、8月中旬に最高水温が示されることが妥当と考えており、実際の試験結果とも矛盾しないものであった。

表1 2019年7月・8月の週間平均気温

期間	平均気温 (°C)
7月1日～7月7日	24.1
7月8日～7月14日	24.0
7月15日～7月21日	25.5
7月22日～7月28日	28.3
7月29日～8月4日	29.3
8月5日～8月11日	31.3
8月12日～8月18日	30.6
8月19日～8月25日	26.5
8月26日～9月1日	25.1

#### 4. 3 環境条件の変化に対する概略評価

環境条件が変わっても、使用済燃料プール水が 65°Cを超えない状況であることを確認するため、気温の観点から概略評価を行った。

水温が 65°Cに達するときの室温について、以下の前提条件をもとに、蒸発熱量の計算式を用いて評価する。評価計算の概念図は、図6のとおり。

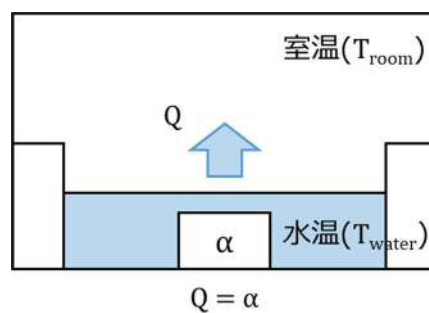


図6 水温が 65°Cに達するときの室温の評価 (概念図)

(前提条件)

- ・使用済燃料プール水面から奪われる熱量は、蒸発熱量のみを考慮 (プール

壁面は断熱)

・崩壊熱量 ( $\alpha$ ) と蒸発熱量 ( $Q$ ) が釣り合っているとする。

( $\alpha = Q$ ,  $\alpha$  の評価時点は冷却停止試験開始時)

(評価式)

$$Q = E \cdot A_s \cdot 0.2778 \cdot r$$

$$E = (0.061V + 0.125)(P_w - \varepsilon \cdot P_r)$$

$Q$  : 水面からの蒸発による伝熱量[W]

$E$  : 蒸発質量流束[kg/(m<sup>2</sup>・hr)]

$r$  : 水の表面温度における潜熱[kJ/kg]

$A_s$  : 使用済燃料プール水面の面積[m<sup>2</sup>]

$V$  : 水面上の風速[m/s]

$\varepsilon$  : 建屋内の湿度[-]

$P_w$  : 水面近傍の飽和水蒸気圧@水面温度[kPa]

$P_r$  : 建屋内の飽和蒸気圧@室温[kPa]

(出典：空気調和・衛生工学便覧 第14版 4 給排水衛生設備編 p.488)

上記の式を飽和蒸気圧 ( $P_r$ ) について整理する。

$$P_r = \frac{1}{\varepsilon} \left( P_w - \frac{Q}{(0.061V + 0.125) \cdot A_s \cdot 0.2778 \cdot r} \right)$$

この式に、水温が 65°C のときの飽和水蒸気圧 ( $P_w$ ) と飽和蒸気圧曲線より、飽和蒸気圧 ( $P_r$ ) に対応する室温を求めると、約 65°C となる。

(計算の入力条件は、別紙 1 参照)

気温と室温の温度差は、平均して6℃程度であり、水温が65℃になるためには、気温が約60℃を超えるような状況となるが、この状況は現実的に起こりにくいものと判断する。

#### 4. 4 補給水の水温への影響評価

使用済燃料プールへの補給水による水温への影響について、比熱を用いた計算により以下のとおり評価する。評価計算の概念図については、図7のとおり。

なお、補給水については、図1に示すとおり、復水貯蔵タンクから使用済燃料プールに直接補給されるのではなくFPCスキマサージタンクに補給され、使用済燃料プールのオーバーフロー水とともに、FPC系を通った後に使用済燃料プールに補給されることとなるが、評価においては直接使用済燃料プールに補給されるものとして評価した。

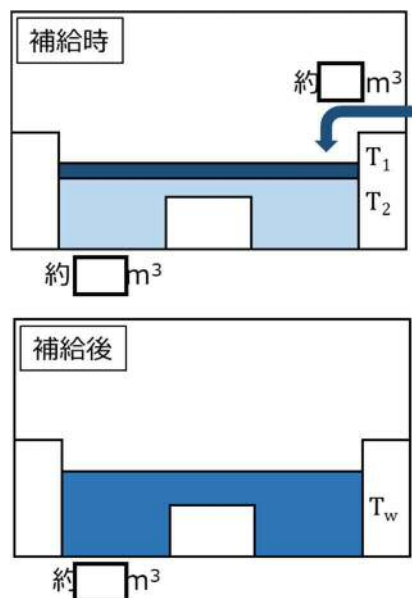


図7 補給水の水温への影響評価（概念図）

(評価式)

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

Q : 熱量[kJ]

m : 質量[kg]

C<sub>p</sub> : 比熱[kJ/(kg・K)]

ΔT : 温度差[K]

補給水を注水した後の、使用済燃料プール水温を T<sub>w</sub> とすると、補給水及びプール水それぞれの熱量変化は以下のとおりとなる。

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

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

T<sub>1</sub> : 補給水の水温[K]

T<sub>2</sub> : 補給前の使用済燃料プール水温[K]

T<sub>w</sub> : 熱平衡に達した時の使用済燃料プール水温[K]

1 : 補給水を指す添字

2 : プール水を指す添字

熱量の保存により両者は等しくなるので、 $Q_1 = Q_2$  即ち、

$$m_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_w - T_1) = m_2 \cdot C_{p2} \cdot (T_2 - T_w)$$

使用済燃料ピットの水温への影響は、8月31日時点の水温測定データに基づき計算すれば、

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

である。(計算の入力条件は、別紙2参照)

以上より、水の補給により、水温は約 0.07 (°C/回) 程度低下することを示しており、実績から補給頻度はおよそ 2 日に 1 回程度であることから、今回の冷却機能停止試験にて確認された 20°C の裕度に対する影響は小さいものと判断する。

#### 4. 5 使用済燃料プール水温の測定位置の妥当性

使用済燃料プール中におけるプール水の循環モデルを図 8 に示す。使用済燃料の崩壊熱により加熱されたプール水は、放熱しながら上部へ移動した後、水面付近で壁面へと移動し、その後プール下部へ移動するため、プール中では上部の温度が高くなると考えられる。

保安規定の施設運用上のプール水温の基準は建屋コンクリート躯体の健全性維持のための基準であり、図 3 に示すように、評価に用いた SFP 水温計はプール壁面近傍の水面付近の水温を測定していることから、評価上保守的な位置で水温を測定しているものと考えられる。

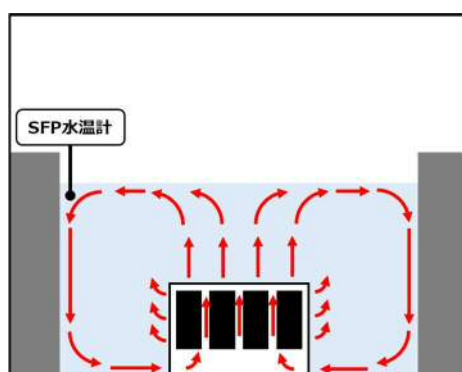


図 8 使用済燃料プール中におけるプール水の循環モデル

## 5. 結論

3. 及び4. の結果より，敦賀1号炉の使用済燃料プール水の冷却を停止しても，夏季において使用済燃料プールの水温は約47℃未満で推移し，施設運用上の基準値である65℃に対して，十分な余裕を持つ状況であることが確認された。この結果から，敦賀1号炉の使用済燃料プール水の冷却は不要であるものと判断する。

以 上

## 水温変化計算の入力値

$$\cdot Q = E \cdot A_s \cdot 0.2778 \cdot$$

$$\cdot E = (0.061V + 0.125)(P_w - \varepsilon \cdot P_r)$$

(出典：空気調和・衛生工学便覧 第14版 4 給排水衛生設備編 p.488)

	説明	単位	入力値
Q	水面からの蒸発による伝熱量 (冷却停止試験開始時の崩壊熱)	W	$5.7 \times 10^4$
A <sub>s</sub>	使用済燃料プール水面積	m <sup>2</sup>	<input type="text"/>
r	評価水温 (65℃) における水の潜熱	kJ/kg	2345.4
V	水面上の風速	m/s	0
ε	湿度 (試験期間中の原子炉建屋5階の平均値)	-	0.656
P <sub>w</sub>	評価水温 (65℃) における水面近傍の飽和蒸気圧	kPa	25.041



## 水温変化計算の入力値

(補給水の水温への影響評価 (2019年8月31日時点))

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

	説 明	単 位	入 力 値
$C_{p1}$	補給水の比熱	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	4.18
$T_1$	補給水の水温	$^{\circ}\text{C}$	29.9

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

	説 明	単 位	入 力 値
$C_{p2}$	使用済燃料プール水の比熱	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	4.18
$T_2$	補給前の使用済燃料プール水温	$^{\circ}\text{C}$	46.0

$$\cdot m_1 = \rho_1 \cdot V_1$$

	説 明	単 位	入 力 値
$\rho_1$	補給水密度 (30 $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{kg}/\text{m}^3$	995.6
$V_1$	使用済燃料プールへの1回あたり補給水量	$\text{m}^3$	

$$\cdot m_2 = \rho_2 \cdot V_2$$

	説 明	単 位	入 力 値
$\rho_2$	使用済燃料プール水密度 (46 $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{kg}/\text{m}^3$	989.8
$V_2$	補給前の使用済燃料プール水量	$\text{m}^3$	

測定日時	プール水温	室温	大気温度
	(°C)	(°C)	(°C)
06/03 12:00	21.1	25.4	25.8
06/04 00:00	21.7	25.7	23.0
06/04 12:00	22.6	26.2	28.8
06/05 00:00	23.4	26.9	24.1
06/05 12:00	24.2	27.1	27.7
06/06 00:00	25.0	27.2	20.0
06/06 12:00	25.7	26.9	24.8
06/07 00:00	26.4	26.9	19.2
06/07 12:00	27.0	26.7	19.4
06/08 00:00	27.7	26.8	21.7
06/08 12:00	28.3	26.3	20.0
06/09 00:00	28.9	25.8	18.1
06/09 12:00	29.4	25.6	20.4
06/10 00:00	29.9	25.6	18.5
06/10 12:00	30.4	25.5	19.9
06/11 00:00	30.9	25.6	18.6
06/11 12:00	31.3	25.5	21.3
06/12 00:00	31.8	25.6	16.4
06/12 12:00	32.2	25.6	21.7
06/13 00:00	32.6	26.0	17.7
06/13 12:00	32.9	26.1	22.2
06/14 00:00	33.3	26.9	22.9
06/14 12:00	33.7	27.2	25.8
06/15 00:00	34.0	27.2	21.8
06/15 12:00	34.3	26.7	23.2
06/16 00:00	34.7	26.6	18.1
06/16 12:00	35.0	26.1	20.0
06/17 00:00	35.2	25.8	18.3
06/17 12:00	35.5	25.6	20.6
06/18 00:00	35.7	25.7	14.8
06/18 12:00	35.9	26.2	28.6
06/19 00:00	36.1	26.7	20.0
06/19 12:00	36.4	26.9	24.7
06/20 00:00	36.6	27.3	18.2
06/20 12:00	36.9	27.4	23.5
06/21 00:00	37.1	27.7	18.2
06/21 12:00	37.3	28.3	30.9
06/22 00:00	37.6	28.3	21.8
06/22 12:00	37.7	28.1	23.4
06/23 00:00	37.9	28.0	19.2

測定日時	プール水温	室温	大気温度
	(°C)	(°C)	(°C)
06/23 12:00	38.2	27.9	22.6
06/24 00:00	38.3	28.0	20.3
06/24 12:00	38.5	27.9	23.2
06/25 00:00	38.7	28.2	18.1
06/25 12:00	38.8	28.3	23.6
06/26 00:00	38.9	28.8	24.5
06/26 12:00	39.0	29.3	30.6
06/27 00:00	39.2	29.8	25.7
06/27 12:00	39.4	29.8	25.4
06/28 00:00	39.6	29.6	24.7
06/28 12:00	39.8	29.2	22.6
06/29 00:00	40.0	29.1	23.4
06/29 12:00	40.1	29.1	26.9
06/30 00:00	40.3	29.1	24.3
06/30 12:00	40.4	29.3	25.0
07/01 00:00	40.6	29.0	21.7
07/01 12:00	40.7	28.9	24.7
07/02 00:00	40.8	29.4	22.7
07/02 12:00	40.9	29.3	26.4
07/03 00:00	41.0	29.6	21.6
07/03 12:00	41.1	29.6	25.3
07/04 00:00	41.2	29.8	24.2
07/04 12:00	41.4	29.7	25.5
07/05 00:00	41.5	29.7	21.8
07/05 12:00	41.5	29.6	25.4
07/06 00:00	41.6	29.9	21.9
07/06 12:00	41.7	29.8	27.4
07/07 00:00	41.8	30.2	23.1
07/07 12:00	41.9	30.0	25.3
07/08 00:00	41.9	30.2	21.9
07/08 12:00	42.0	30.2	24.8
07/09 00:00	42.1	30.6	24.7
07/09 12:00	42.2	30.3	21.7
07/10 00:00	42.2	30.3	23.8
07/10 12:00	42.2	30.4	30.4
07/11 00:00	42.3	30.9	24.7
07/11 12:00	42.4	30.3	21.4
07/12 00:00	42.4	29.9	23.0
07/12 12:00	42.5	30.0	28.3
07/13 00:00	42.5	29.9	20.8

測定日時	プール水温	室温	大気温度
	(°C)	(°C)	(°C)
07/13 12:00	42.5	29.8	24.9
07/14 00:00	42.6	29.8	20.7
07/14 12:00	42.7	29.7	24.5
07/15 00:00	42.7	29.7	21.7
07/15 12:00	42.7	29.6	23.6
07/16 00:00	42.7	29.5	21.6
07/16 12:00	42.8	29.5	25.5
07/17 00:00	42.8	30.1	22.6
07/17 12:00	42.9	30.3	26.8
07/18 00:00	43.0	30.9	25.0
07/18 12:00	43.0	31.1	27.9
07/19 00:00	43.1	30.8	25.2
07/19 12:00	43.1	30.6	26.2
07/20 00:00	43.2	30.8	26.2
07/20 12:00	43.3	30.8	27.7
07/21 00:00	43.3	31.2	27.7
07/21 12:00	43.3	31.3	29.4
07/22 00:00	43.4	31.7	28.4
07/22 12:00	43.5	31.4	26.5
07/23 00:00	43.6	31.7	26.4
07/23 12:00	43.6	31.8	29.5
07/24 00:00	43.7	31.9	24.9
07/24 12:00	43.7	32.1	30.3
07/25 00:00	43.8	32.6	24.1
07/25 12:00	43.8	33.1	34.3
07/26 00:00	43.9	33.6	28.5
07/26 12:00	44.0	33.8	34.1
07/27 00:00	44.1	34.1	26.7
07/27 12:00	44.1	33.7	25.1
07/28 00:00	44.2	33.1	23.7
07/28 12:00	44.2	33.3	33.1
07/29 00:00	44.3	33.7	25.9
07/29 12:00	44.4	34.1	32.8
07/30 00:00	44.5	34.4	26.0
07/30 12:00	44.6	34.8	32.9
07/31 00:00	44.6	34.8	26.2
07/31 12:00	44.7	35.2	34.5
08/01 00:00	44.8	35.3	26.2
08/01 12:00	44.9	35.4	31.2
08/02 00:00	45.0	35.4	25.7

測定日時	プール水温	室温	大気温度
	(°C)	(°C)	(°C)
08/02 12:00	45.0	35.3	32.2
08/03 00:00	45.1	35.6	26.5
08/03 12:00	45.2	35.6	30.8
08/04 00:00	45.3	35.8	26.6
08/04 12:00	45.3	35.8	32.5
08/05 00:00	45.4	36.1	29.9
08/05 12:00	45.4	36.3	33.6
08/06 00:00	45.5	36.6	29.5
08/06 12:00	45.6	36.7	36.3
08/07 00:00	45.7	36.9	30.1
08/07 12:00	45.7	36.8	36.0
08/08 00:00	45.7	37.1	30.3
08/08 12:00	45.8	37.1	35.8
08/09 00:00	45.9	37.1	27.0
08/09 12:00	46.0	37.0	33.2
08/10 00:00	46.0	36.9	26.6
08/10 12:00	46.0	36.8	31.5
08/11 00:00	46.1	36.9	26.2
08/11 12:00	46.2	36.8	32.2
08/12 00:00	46.2	37.2	29.9
08/12 12:00	46.2	37.2	36.2
08/13 00:00	46.3	37.3	29.7
08/13 12:00	46.3	37.2	32.7
08/14 00:00	46.4	37.5	30.6
08/14 12:00	46.4	37.4	35.3
08/15 00:00	46.5	37.4	30.9
08/15 12:00	46.5	37.2	32.2
08/16 00:00	46.6	36.8	27.3
08/16 12:00	46.6	36.3	33.2
08/17 00:00	46.6	36.1	25.6
08/17 12:00	46.6	36.0	31.0
08/18 00:00	46.7	35.9	23.9
08/18 12:00	46.7	35.8	30.0
08/19 00:00	46.6	35.9	25.4
08/19 12:00	46.6	35.8	28.6
08/20 00:00	46.7	35.5	24.7
08/20 12:00	46.7	35.2	25.9
08/21 00:00	46.7	35.0	24.8
08/21 12:00	46.6	34.9	31.4
08/22 00:00	46.7	35.1	25.5

測定日時	プール水温	室温	大気温度
	(°C)	(°C)	(°C)
08/22 12:00	46.7	34.9	30.0
08/23 00:00	46.7	35.0	25.5
08/23 12:00	46.7	34.6	27.6
08/24 00:00	46.6	34.2	22.2
08/24 12:00	46.6	34.1	29.4
08/25 00:00	46.5	34.1	22.0
08/25 12:00	46.5	34.1	28.4
08/26 00:00	46.4	34.1	22.6
08/26 12:00	46.4	33.8	26.9
08/27 00:00	46.3	33.9	20.8
08/27 12:00	46.3	33.7	28.6
08/28 00:00	46.3	33.4	24.6
08/28 12:00	46.2	33.1	24.8
08/29 00:00	46.2	32.9	24.4
08/29 12:00	46.1	32.9	30.0
08/30 00:00	46.1	33.1	27.1
08/30 12:00	46.1	32.9	23.9
08/31 00:00	46.1	32.4	20.7
08/31 12:00	46.0	32.4	27.2
09/01 00:00	46.0	32.7	23.2
09/01 12:00	46.0	32.6	26.9
09/02 00:00	45.9	32.6	22.3
09/02 12:00	45.8	32.6	25.8
09/03 00:00	45.8	32.6	23.7
09/03 12:00	45.8	32.8	30.3
09/04 00:00	45.8	33.3	24.6
09/04 12:00	45.8	33.4	28.6
09/05 00:00	45.8	33.4	27.0
09/05 12:00	45.8	33.5	31.3
09/06 00:00	45.8	33.8	27.9
09/06 12:00	45.8	34.0	33.3
09/07 00:00	45.8	34.3	28.0
09/07 12:00	45.8	34.4	33.5
09/08 00:00	45.8	34.7	28.4
09/08 12:00	45.8	34.7	34.9
09/09 00:00	45.8	34.9	26.7
09/09 12:00	45.9	34.8	29.5
09/10 00:00	45.9	35.0	25.1
09/10 12:00	46.0	35.1	31.3