

2号機原子炉注水停止試験結果

2020年10月29日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

■ 試験目的（2号機：注水停止3日間）

- ✓ 2019年度試験（約8時間）より長期間の注水停止時の温度上昇を確認し、温度評価モデルの検証データ等を蓄積する。

（補足）

- 昨年度試験では、注水停止期間、RPV底部温度はほぼ一定で上昇することを確認。
- 昨年度試験より長期間の停止で、温度上昇の傾きに変化が生じるか確認し、評価モデルを検証する。

■ 試験結果概要

- ✓ 注水停止：2020年8月17日～8月20日までの約3日間。

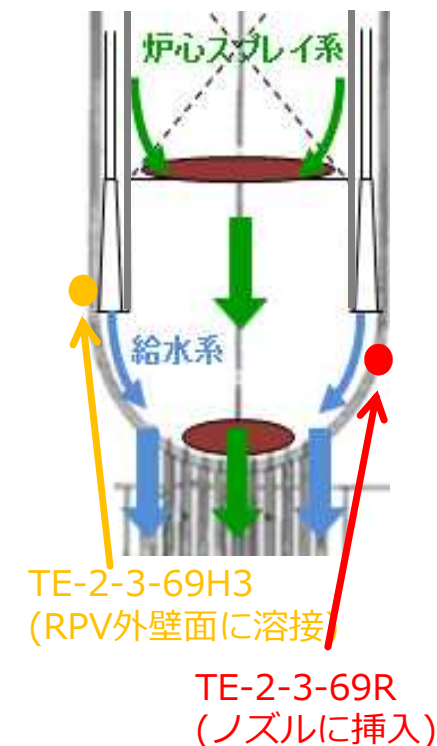
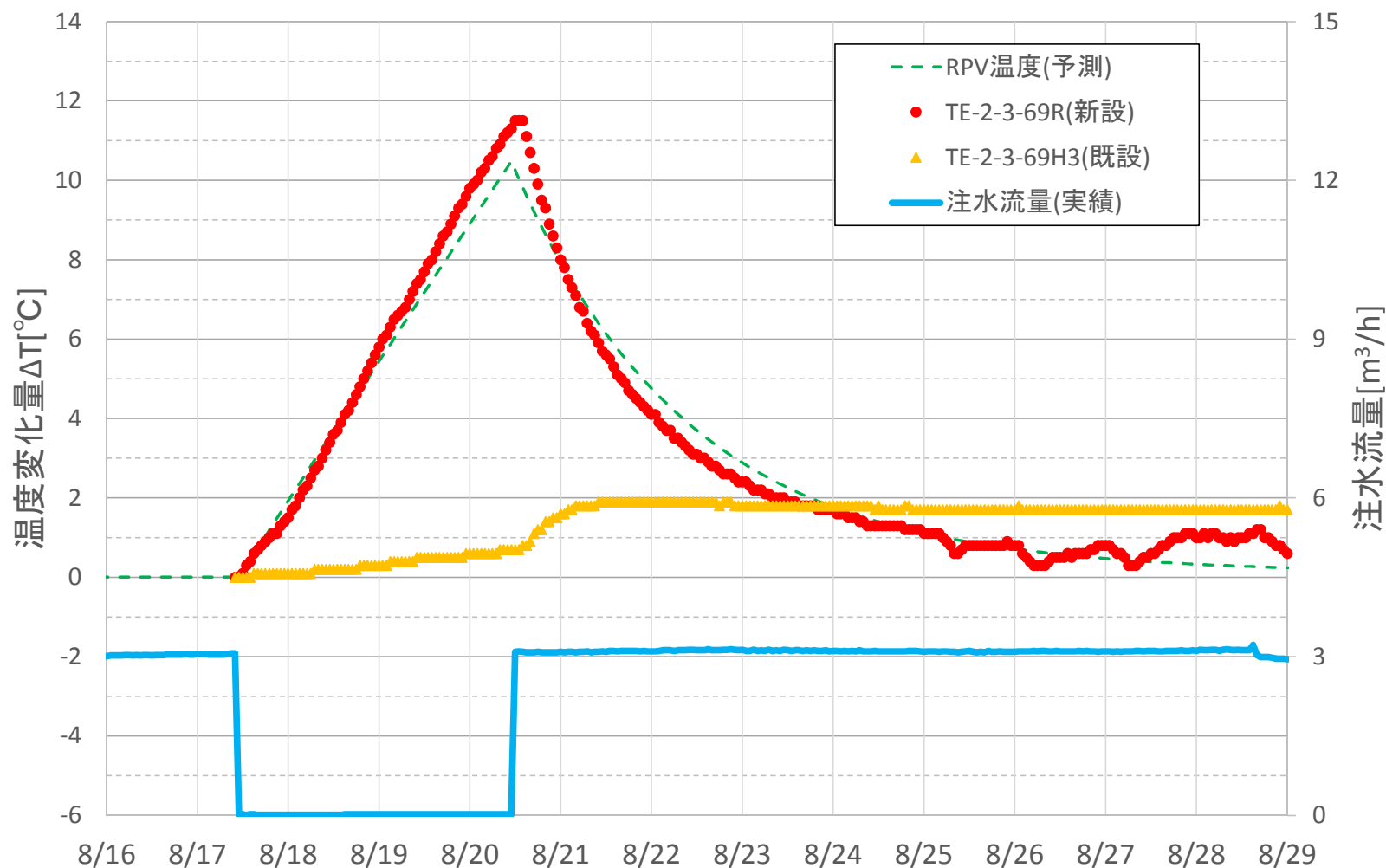
注水停止：2020年8月17日10:09

注水再開：2020年8月20日11:59

- RPV底部温度、PCV温度に、温度計毎のばらつきはあるが概ね予測の範囲内で推移。
- 注水停止中、新設のRPV底部温度計（TE-2-3-69R）の温度は、ほぼ一定の上昇率で上昇し、予測とよく一致。（約0.16℃/h）
- 注水停止中にD/W圧力の低下、注水再開時にD/W圧力の上昇を確認。
- ダスト濃度（HEPAフィルタ通過後）や希ガス（Xe135）濃度に有意な変動なし。
- HEPAフィルタ通過前のダスト・凝縮水を分析した結果、注水停止中に採取した試料で、濃度上昇を確認。

RPV底部温度の推移（試験開始からの温度変化量）

- TE-2-3-69R（新設）：温度上昇は予測評価と比較して若干高かったもののよく一致。
- TE-2-3-69H3（既設）：TE-2-3-69Rと比べ注水停止中の温度上昇は緩やか（予測評価ほどの温度上昇なし）。
- 両者の挙動の違いは昨年度試験と同様。



RPV底部温度の挙動（予測評価との比較）に関する考察

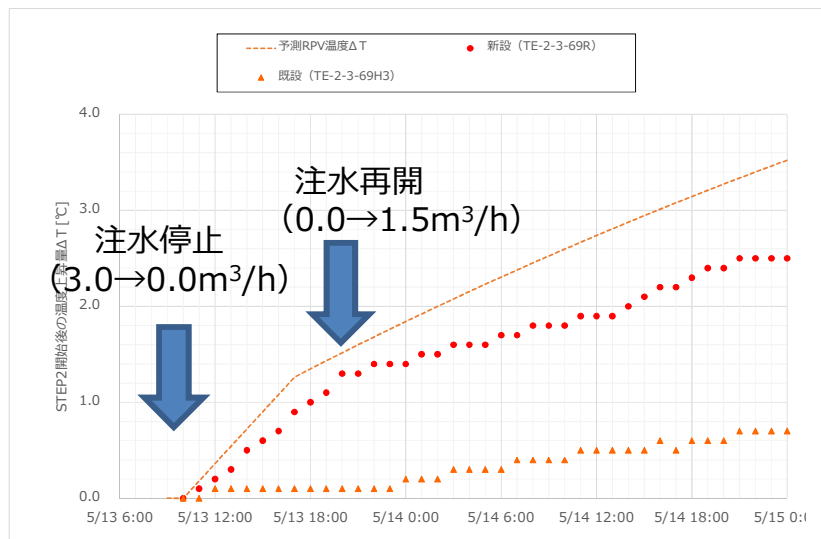
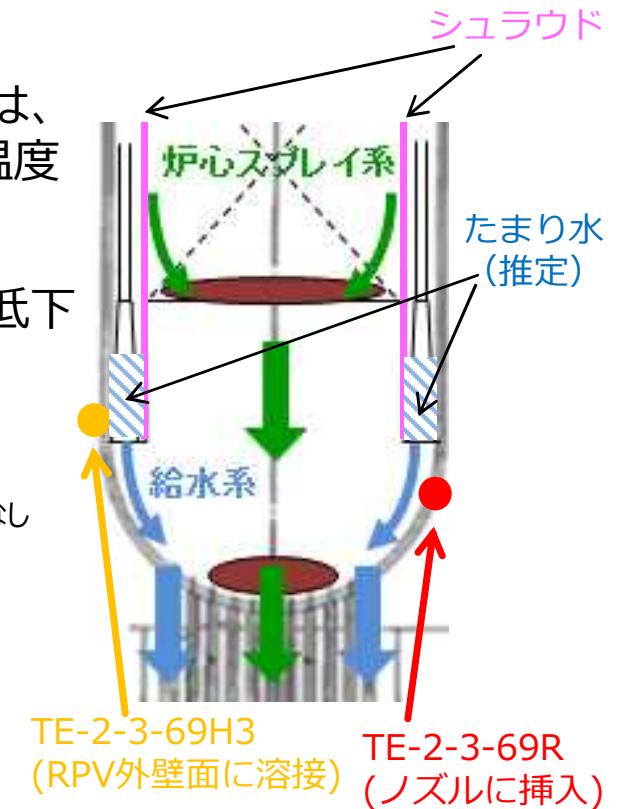
- 昨年度試験：TE-2-3-69H3（既設）の温度変化は緩慢。下段の要因と推定。
- 今回の試験結果も同様の要因によるものと推定。

（昨年度考察）

- ① 両温度計の設置位置が異なり、TE-2-3-69Rの方が燃料デブリに近い可能性。
- ② 2号機のシュラウドは概ね健全であり、TE-2-3-69H3の内側には、たまり水があると推定※¹。たまり水の影響により、当該箇所の温度変化が緩やかになっている可能性。
- ③ TE-2-3-69H3などの既設の温度計は、事故の影響により絶縁が低下しており、指示値の不確かさが大きい可能性※²。
（指示値の不確かさは最大20℃程度と評価）

※¹ 「総合的な炉内状況把握の高度化（平成29年度成果報告）」（IRID、IAE）

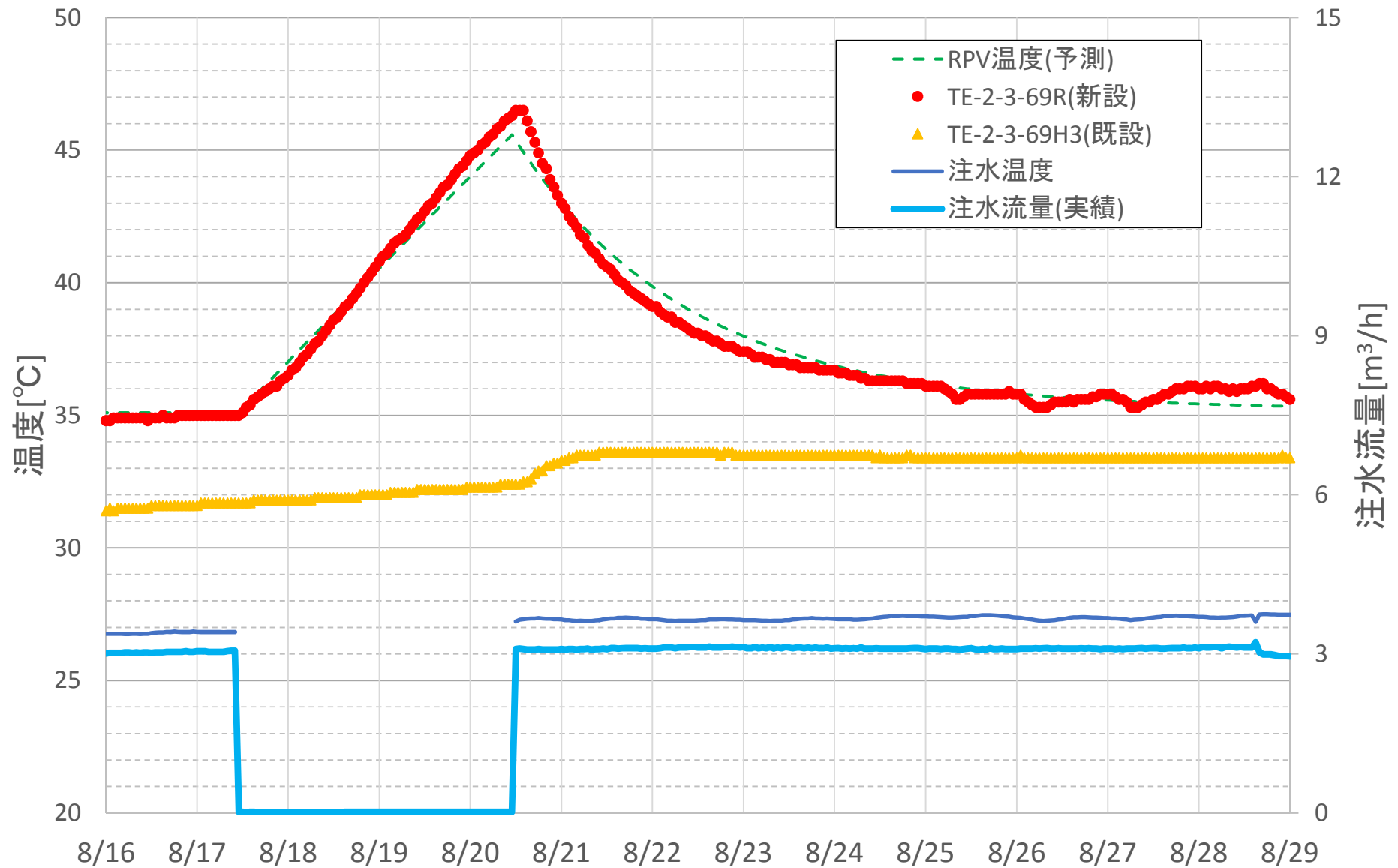
※² TE-2-3-69H3は、定期的な信頼性評価により「監視に使用可」と確認しており、冷却状態の監視に支障なし



昨年度の2号機原子炉注水停止試験の結果（温度変化量）

- TE-2-3-69R
- ▲ TE-2-3-69H3

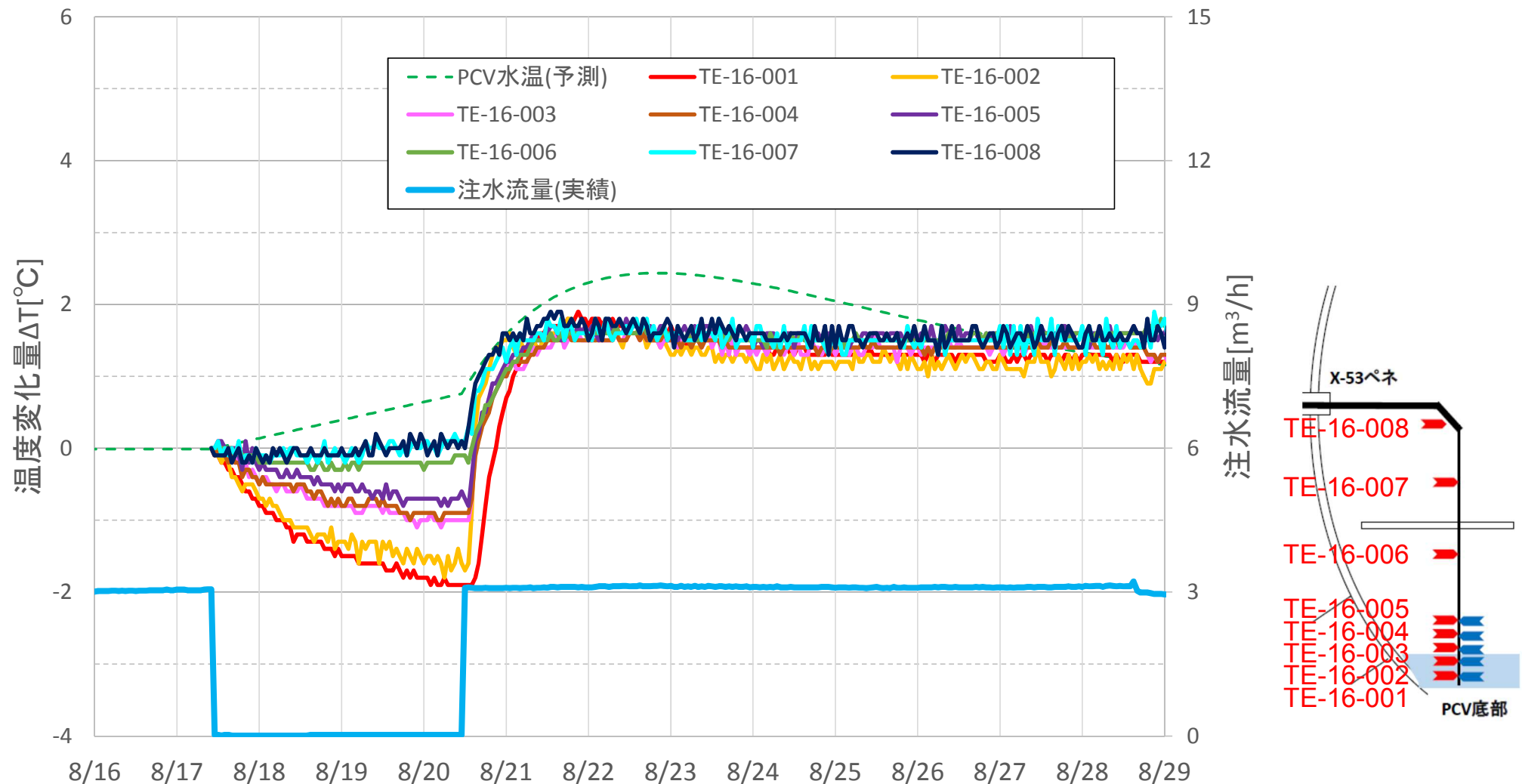
(参考) RPV底部温度の推移 (実測値)



※予測温度は試験開始時の実績温度(TE-2-3-69R)を基準としている

PCV温度(新設)の推移 (試験開始からの温度変化量)

- TE-16-001・002：試験期間を通じて水没。温度低下が大きい。
- TE-16-003～005：水面に近い気相温度を測定。温度低下が小さい。
- TE-16-006～008：ほとんど変化せず。
- 注水再開後はいずれの温度も上昇。TE-16-001は上昇開始が少し遅い。

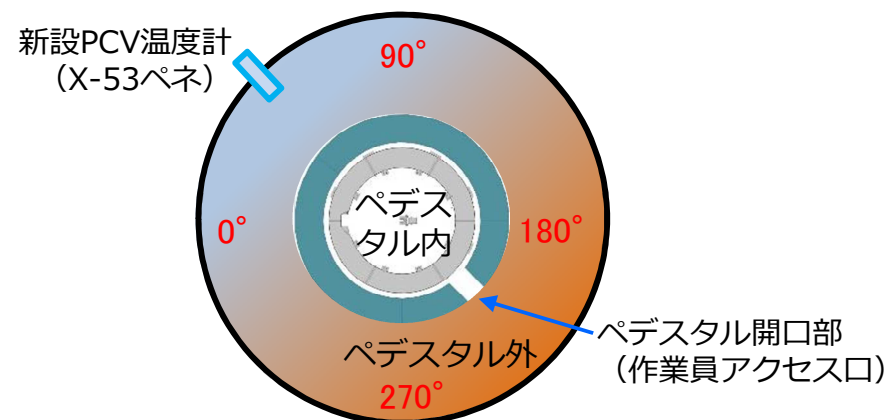
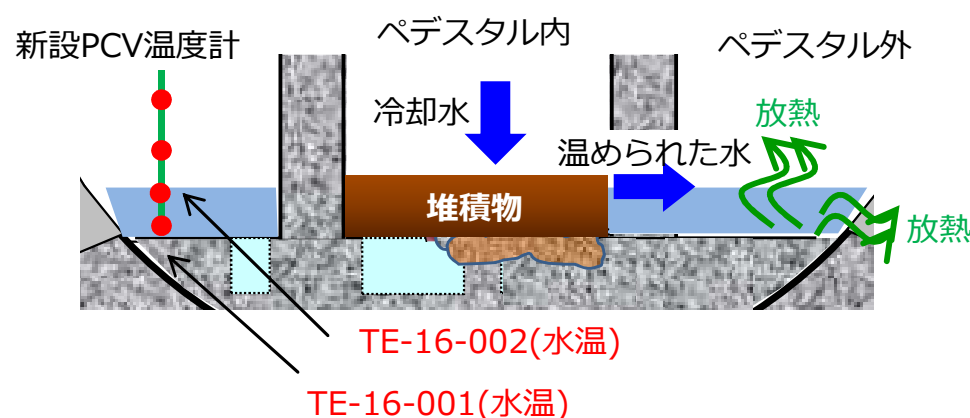


PCV温度の挙動（予測評価との比較）に関する考察

- 昨年度試験でも注水停止中はPCV水温が低下。下段の要因と推定。
- 今回の試験結果も同様の要因によるものと推定。

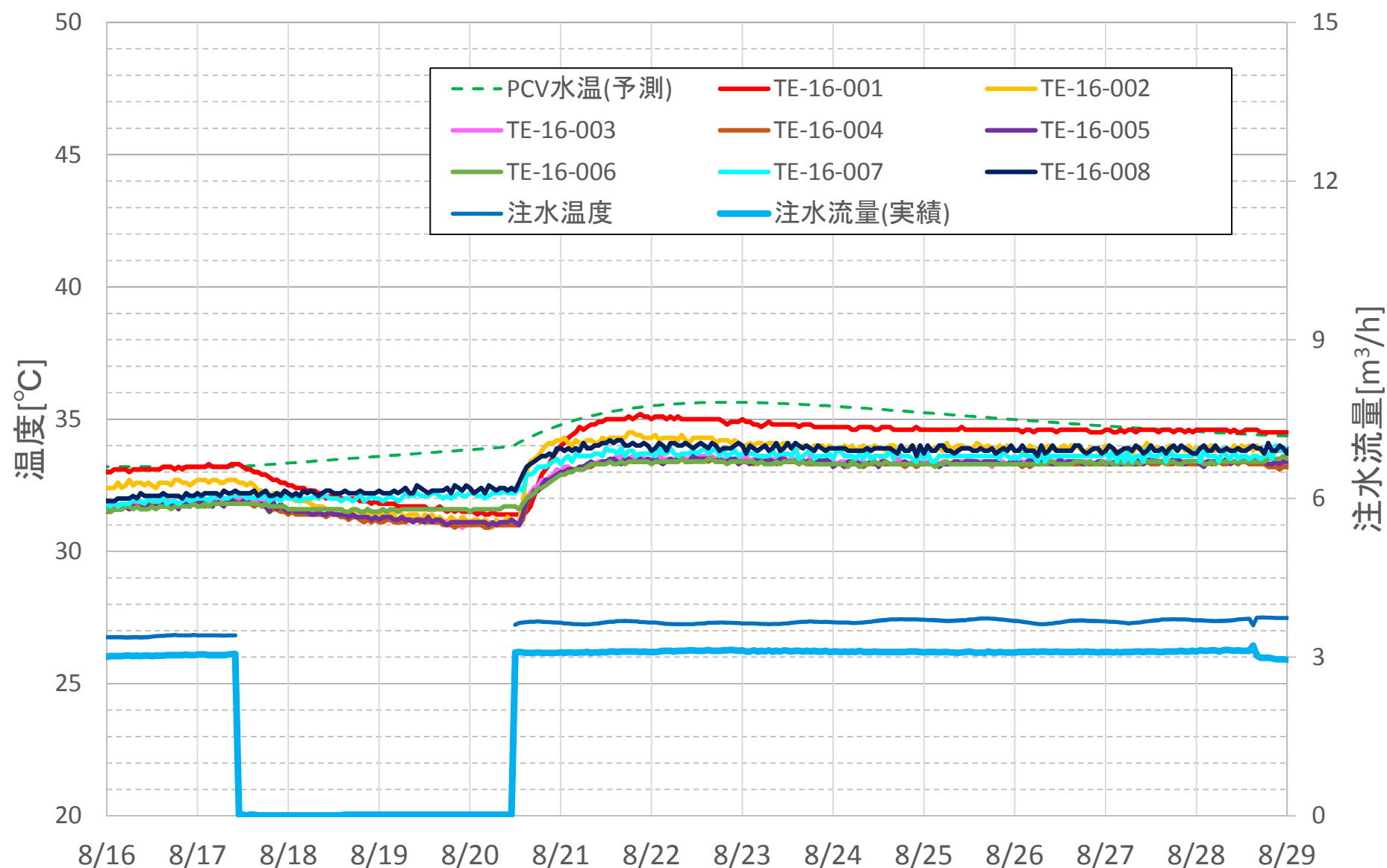
（昨年度考察）

- ① これまでのPCV内部調査で2号機のペDESTAL内堆積物は水没していないことを確認。注水停止に伴い、燃料デブリを除熱して温められた水の供給がなくなり、PCV水温は放熱により徐々に低下した可能性。
- ② 注水再開に伴い、燃料デブリを除熱して温められた水が供給され温度が上昇した可能性。



- 今回の試験では、注水再開後の温度上昇量が大きい。これは、注水停止期間が延びたため、注水再開による熱移動が大きかったことによるものと推定。
- 注水再開後、TE-16-001の温度上昇が若干遅い。これは、001がPCV最深部に設置されていて、水温変化への追従が002に比べ遅くなることによるものと推定。

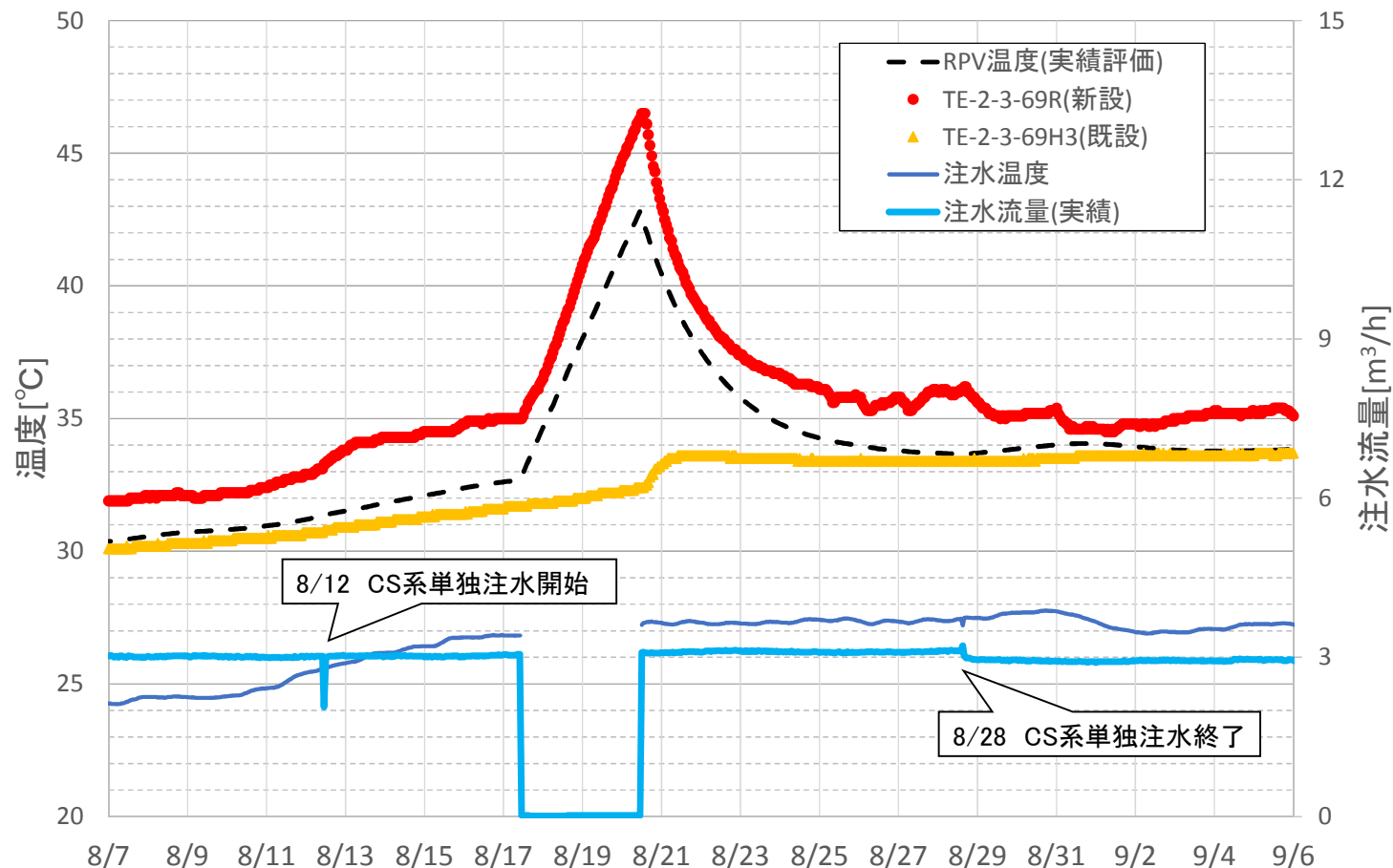
(参考) PCV温度(新設)の推移 (実測値)



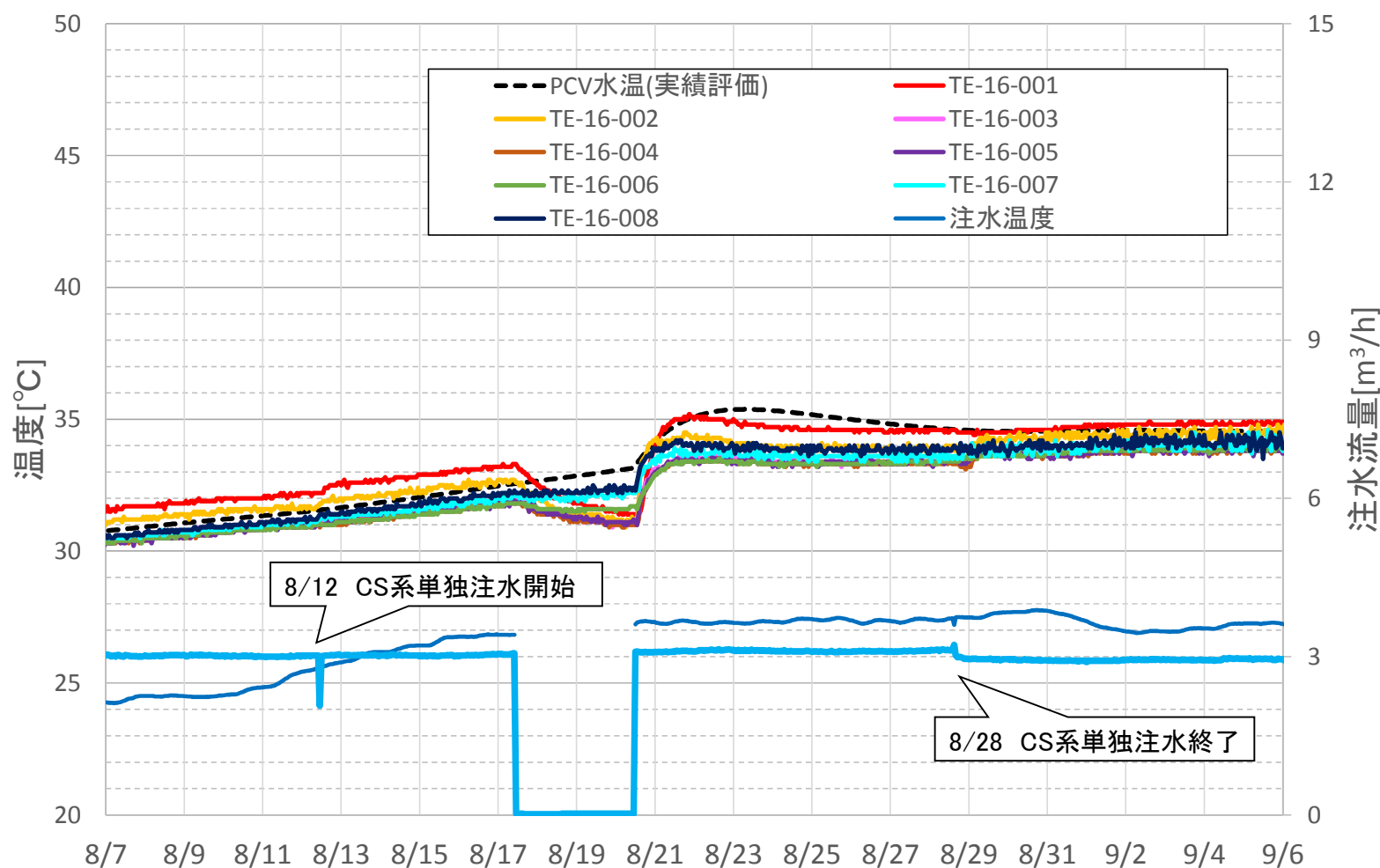
※予測温度は試験開始時の実績温度(TE-16-001)を基準としている

実績データを用いた熱バランス評価（RPV底部温度）

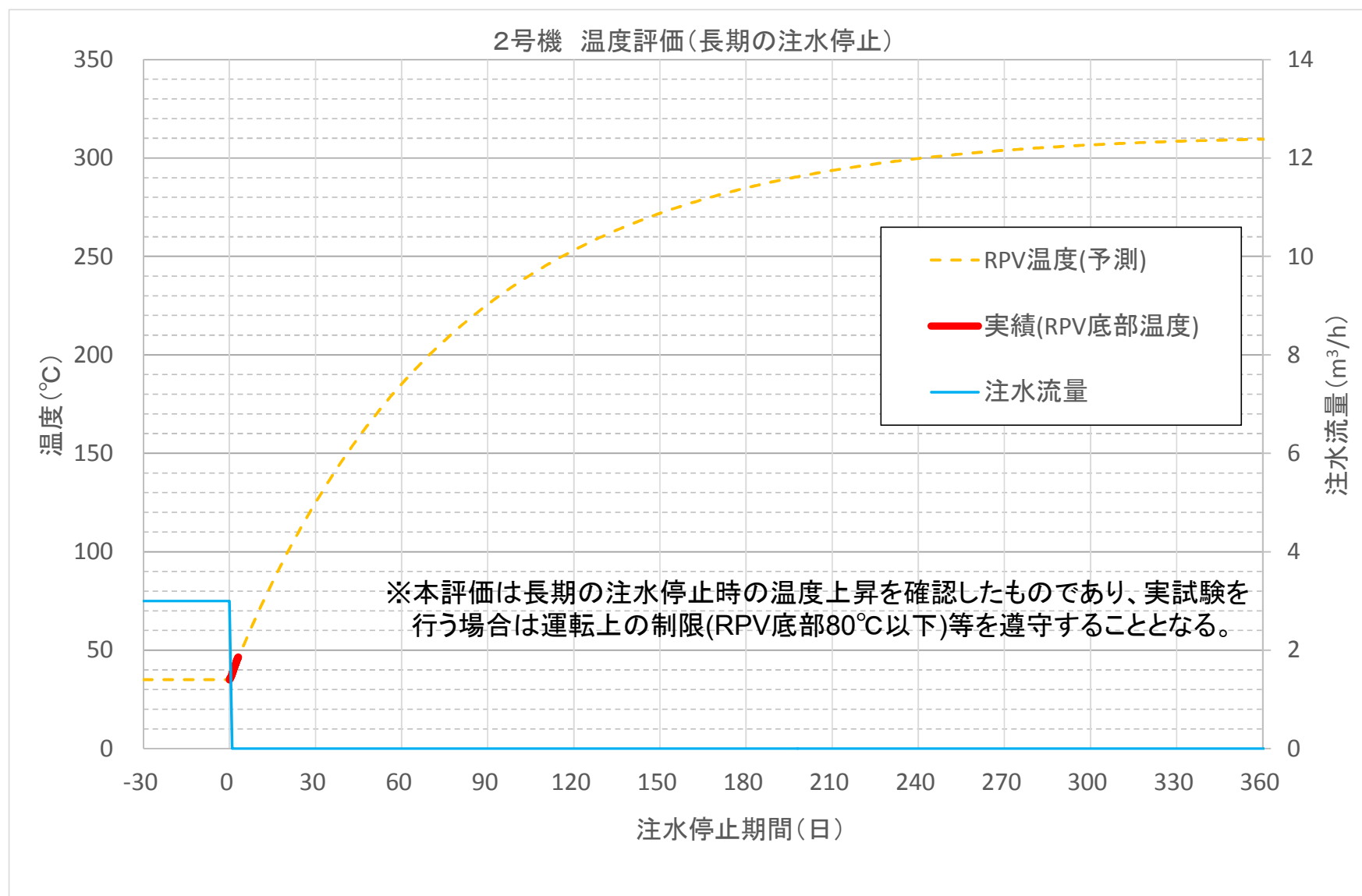
- 実際の注水温度等を適用して、試験時のRPV温度を評価。
 - 熱バランス評価による計算値は、TE-2-3-69Rに比べ、注水停止中も含め最大で3℃程度低いが、RPV底部の温度挙動を概ね再現できていると考える。
 - 熱バランス評価はCS系・FDW系からの注水時の実績データに沿うようにフィッティングをしており、CS系単独注水時に若干の差異が生じる。
 - TE-2-3-69H3の挙動も、注水停止中を除けば概ね再現できていると考える。



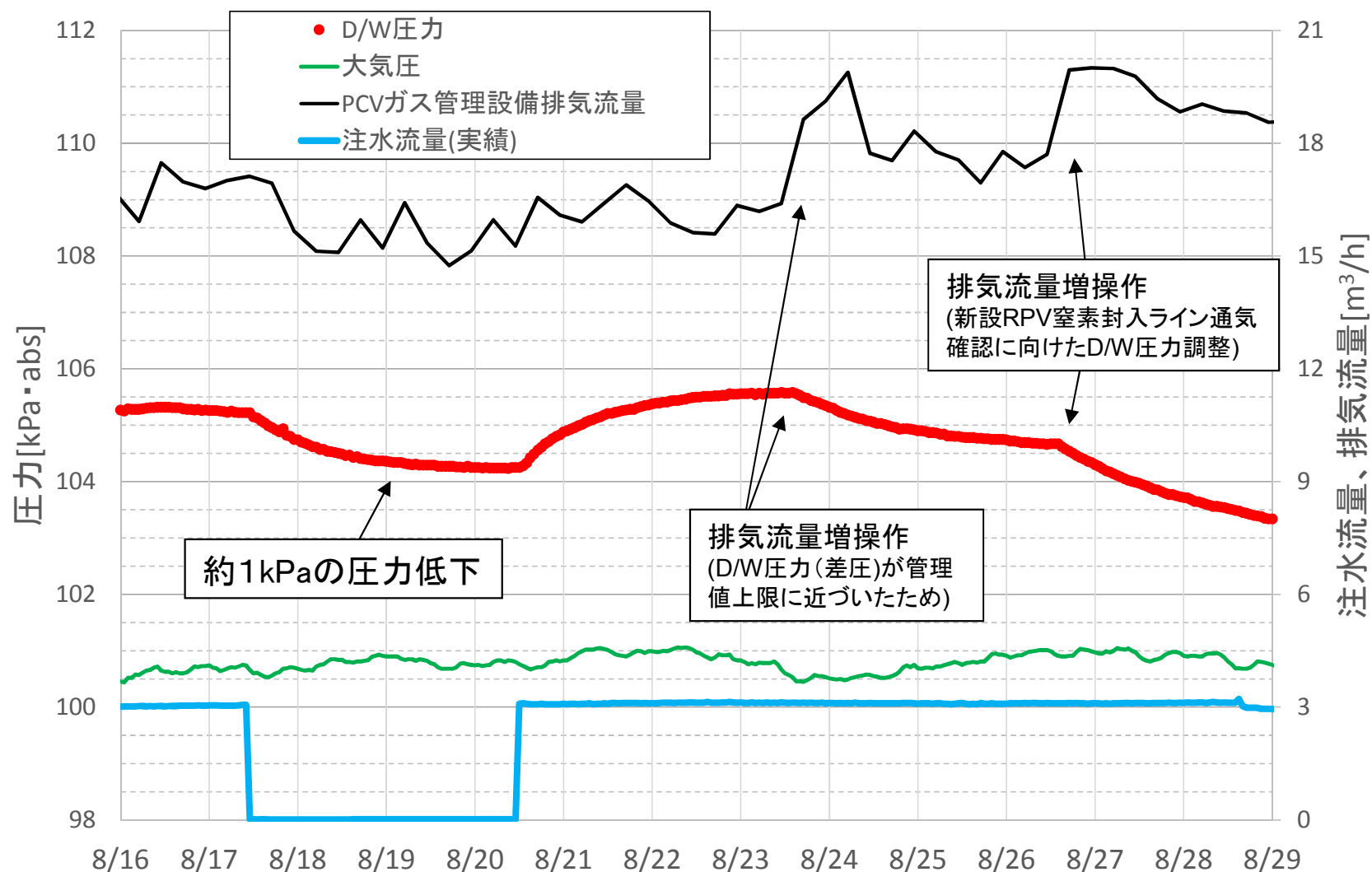
- 実際の注水温度等を適用して、試験時のPCV温度を評価。
 - 熱バランス評価による計算値は、注水停止中を除きPCV温度の挙動を概ね再現できていると考える。
 - 注水停止中の温度挙動を再現できていない理由は、ペデスタルの内側と外側の領域を分けて評価していないことなどが挙げられる。



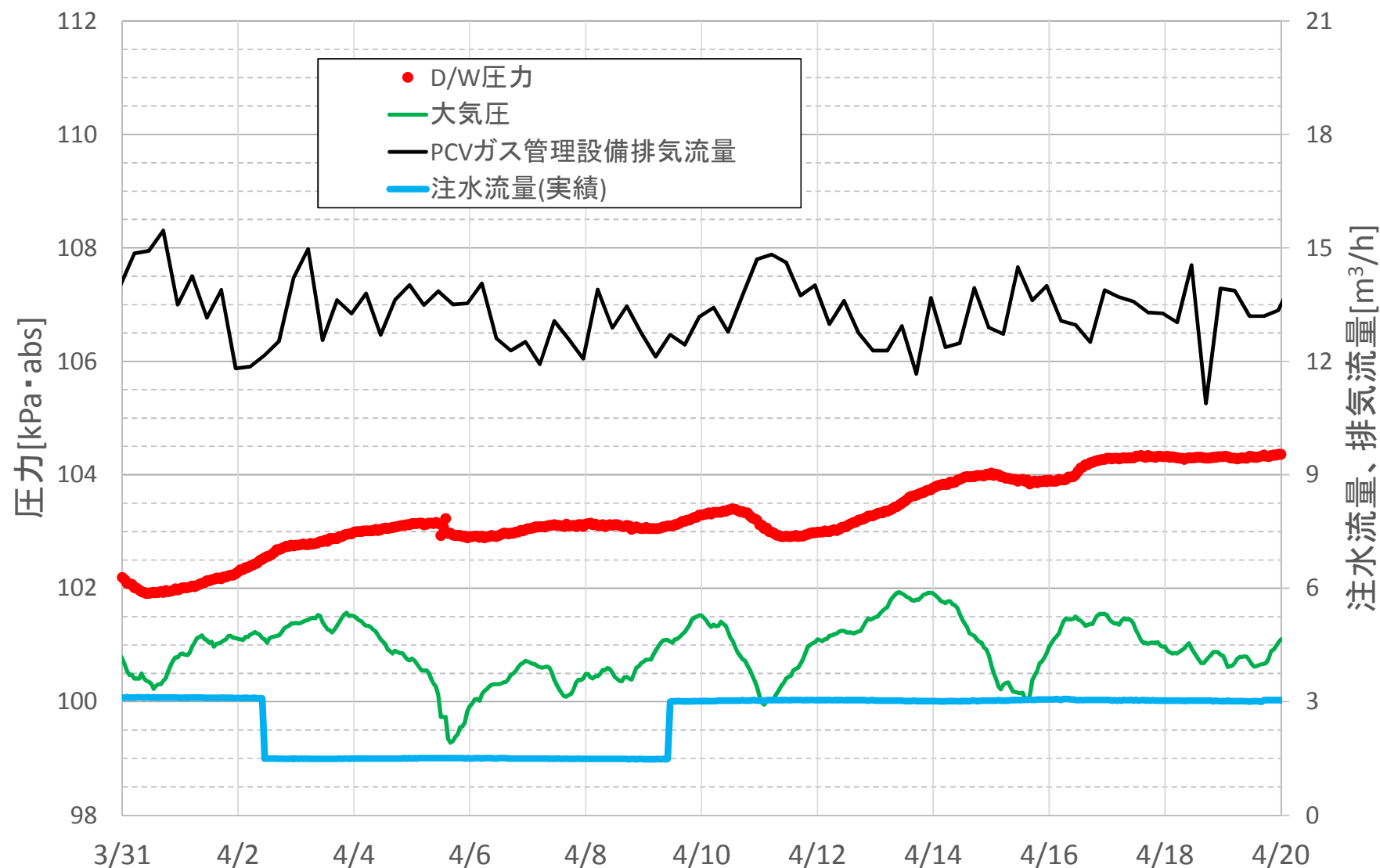
- 3日間の注水停止では、RPV底部温度（TE-2-3-69R）の温度上昇率はほぼ一定。
- この範囲では、熱バランス評価による計算値は実測値をよい精度で再現。



- 注水停止中にD/W圧力の低下、注水再開後にD/W圧力の上昇を確認。
- D/W圧力の低下量：約1kPa
- PCV温度約32℃の飽和水蒸気圧：約4.8kPa → 圧力変化がPCV内の乾燥によるものであれば、20%程度の相対湿度変化に相当。

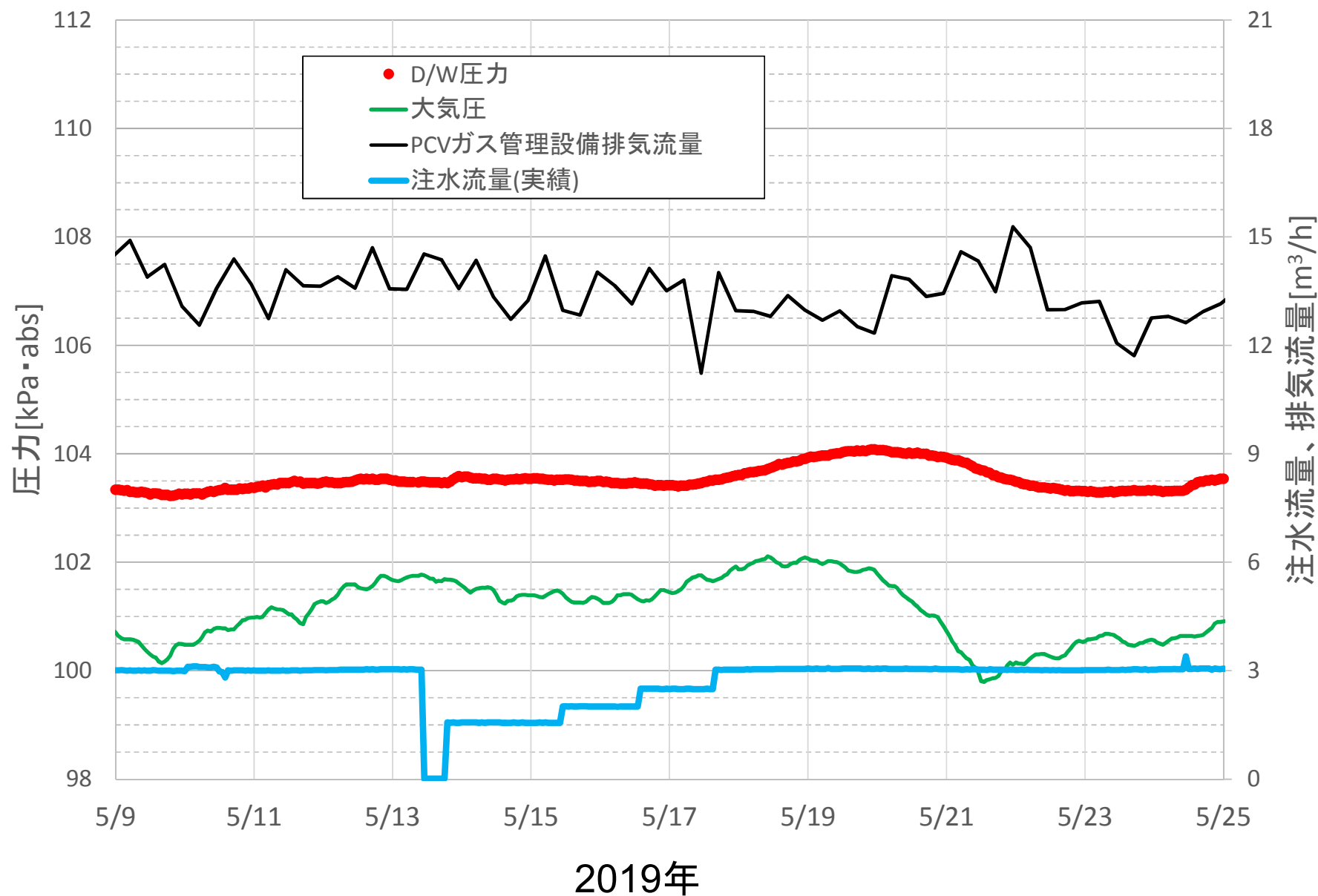


■ STEP 1（注水量低減）：注水量低減に伴うD/W圧力変動は認められず。

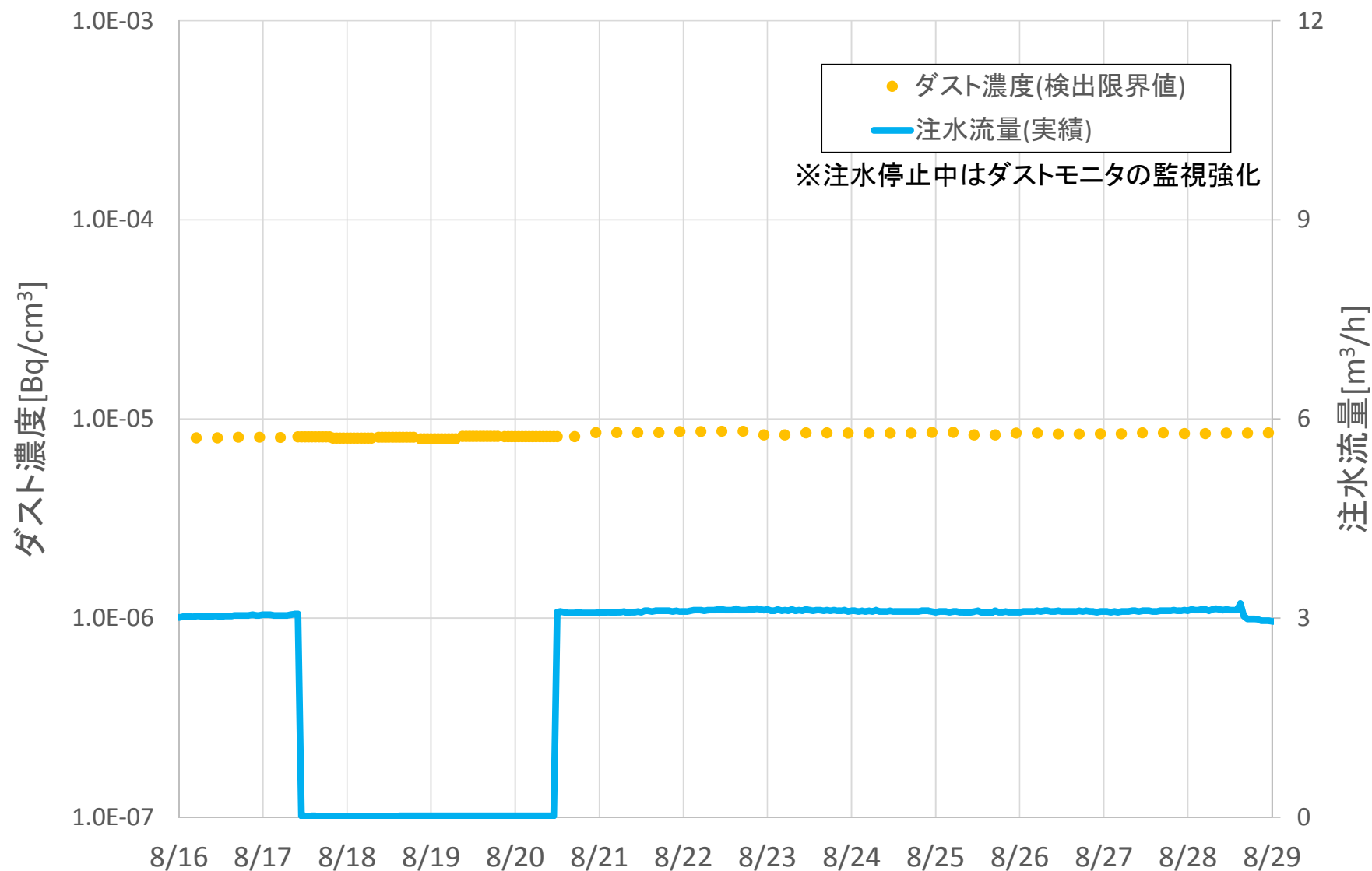


2019年

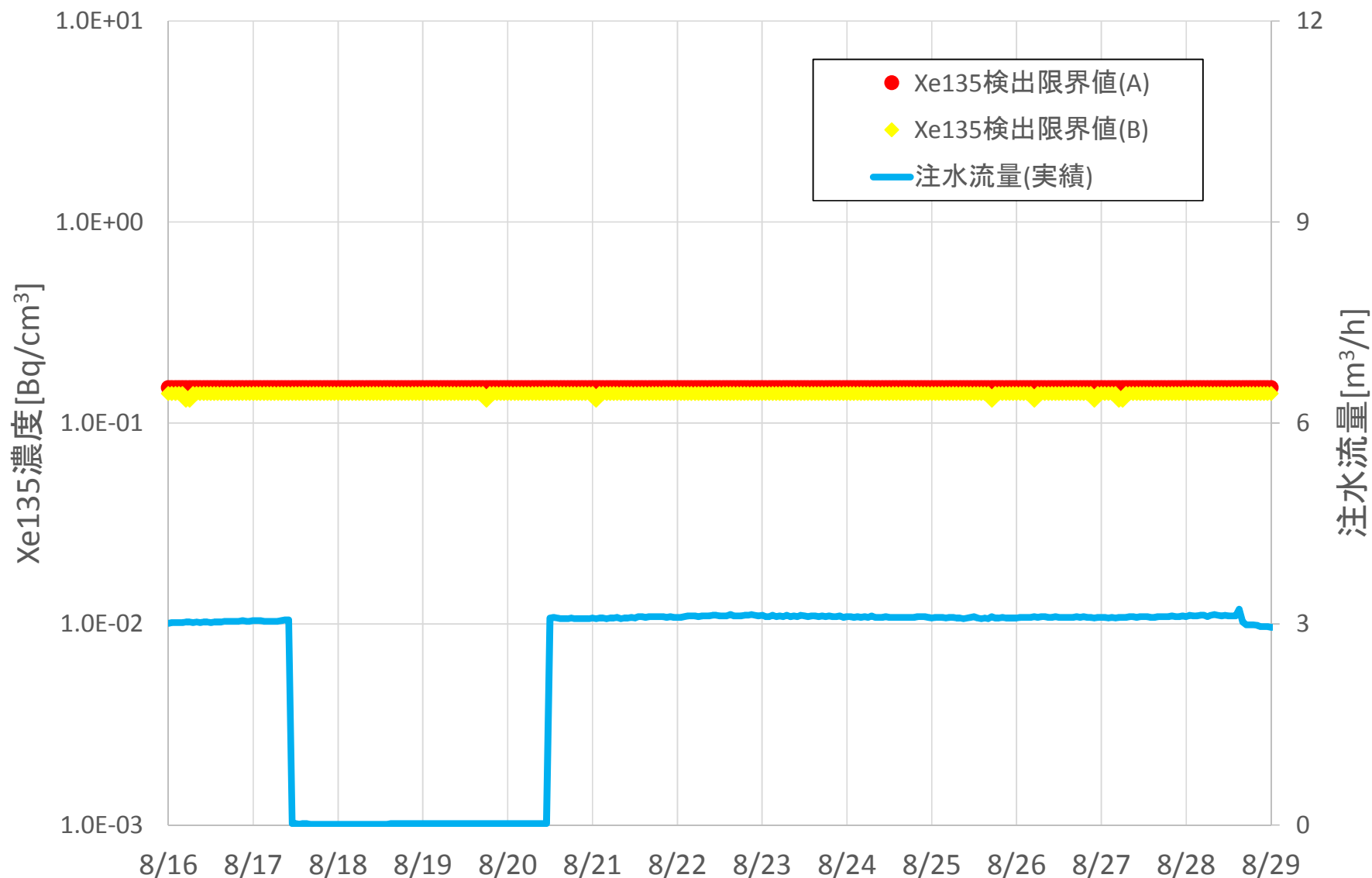
■ STEP 2（注水停止）：注水停止に伴うD/W圧力変動は認められず。



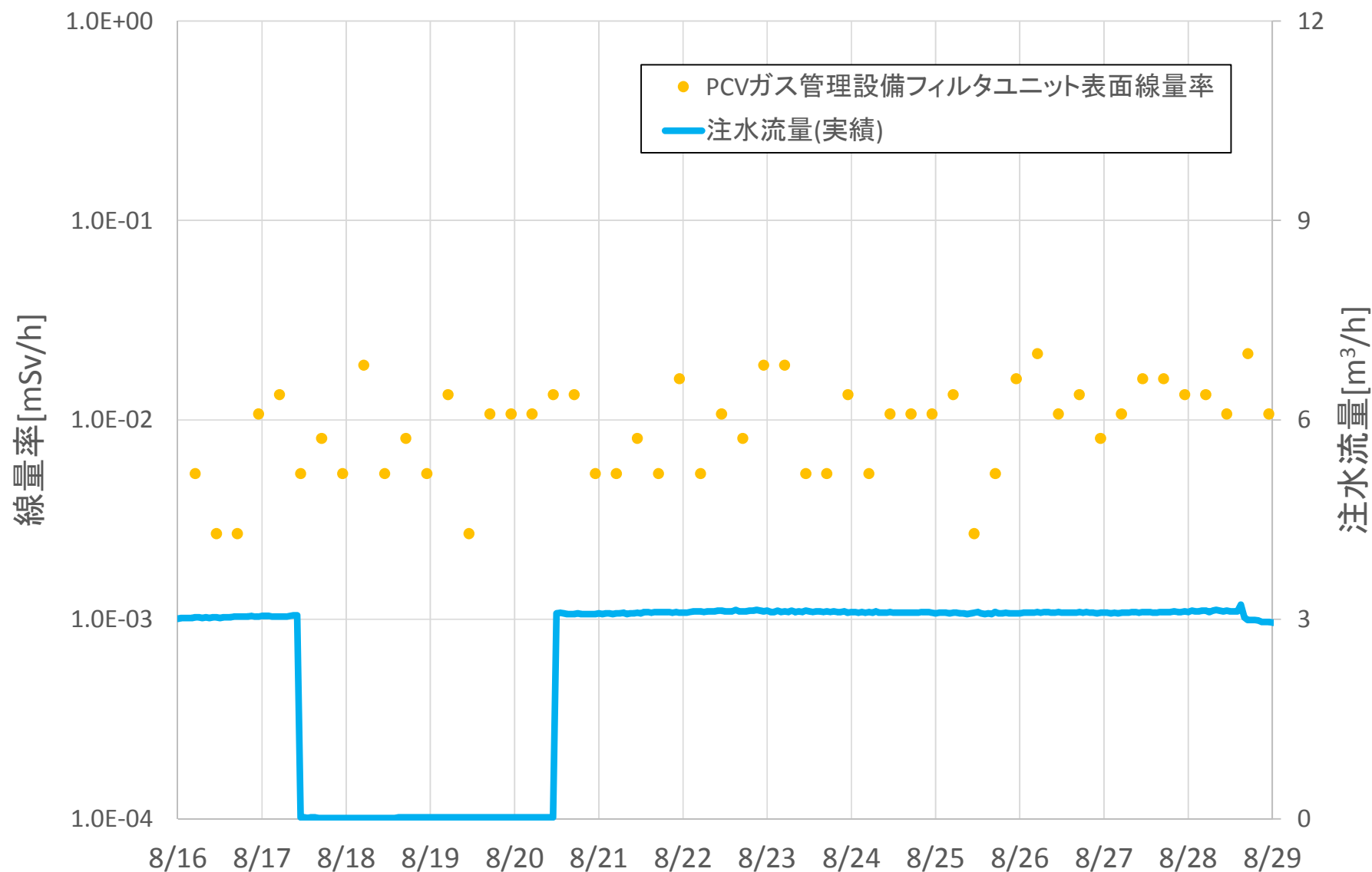
- ダストモニタの指示値に有意な上昇なし。
(期間中、検出限界未満であり検出限界値をプロット)



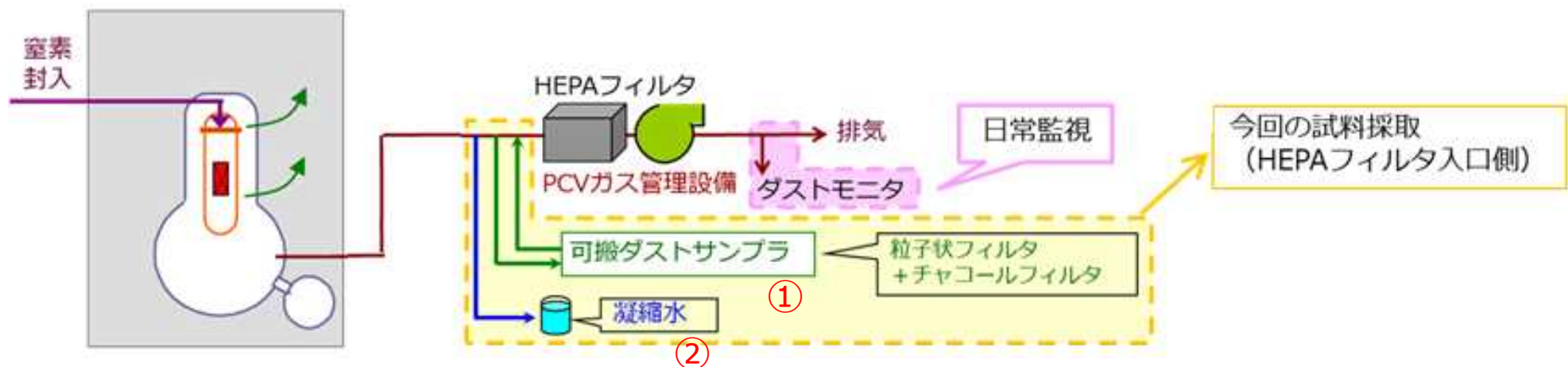
- Xe135の指示値に有意な上昇なし。
(期間中、検出限界未満であり検出限界値をプロット)



- フィルタユニット表面線量率に有意な変動なし。



- 炉内挙動を評価するためのデータ拡充の観点から、原子炉注水停止前及び注水停止中に、PCVガス管理設備のHEPAフィルタを通過する前のダスト等を採取し分析した。
- ①HEPAフィルタ入口側のダスト、②凝縮水ともに、注水停止中に採取した試料で全α核種等の濃度上昇を確認。
- HEPAフィルタ通過後のダストモニタの指示値に有意な上昇なし。（14ページ）
- 注水停止中の濃度上昇は、D/W内の相対湿度の低下に伴いPCVからのダスト放出が増加した可能性や、過去に測定した値と同程度であり、変動の範囲内である可能性。



採取試料の分析結果 ①HEPAフィルタ入口側ダスト

- 2号PCVガス管理設備HEPAフィルタ入口側ダストを採取。
- 注水停止試験中に、ダストの全α、Cs濃度の上昇を確認。
- HEPAフィルタ通過後のダストモニタの指示値に有意な上昇なし。（14ページ）

(単位 : Bq/cm³)

分析項目	半減期	過去の採取 (注水量低減後 4.5→3.0m ³ /h)	昨年度試験 (注水停止:8時間)	今年度試験前	注水停止試験中
		2017.5.17採取	2019.5.13採取	2020.8.6採取	2020.8.19採取
全α	—	3.7E-08	ND (< 5.6E-09)	ND (< 5.8E-09)	1.4E-08
全β	—	3.9E-04	ND (< 4.8E-08)	7.6E-05	4.2E-04
Cs-134	約2年	4.5E-06※ ¹	ND (< 4.5E-07)	ND (< 2.2E-07)	1.8E-05
Cs-137	約30年	2.8E-05	ND (< 5.5E-07)	1.8E-06	3.1E-04
その他γ 核種※ ²	—	Co-60 3.4E-7 ※ ¹	ND	ND	Sb-125 8.0E-06

※ 1 未検証の測定結果であるため参考値

※ 2 Cr-51、Mn-54、Co-58、Fe-59、Co-60、Ag-110m、Sb-125、I-131、Ce-144、Eu-154、Am-241

- 2号PCVガス管理設備HEPAフィルタ入口側凝縮水を採取。
- 注水停止試験中における、全αの上昇を確認。γ核種等は若干の上昇。
- HEPAフィルタ通過後のダストモニタの指示値に有意な上昇なし。（14ページ）
（単位：Bq/cm³）

分析項目	半減期	過去の採取 (注水量低減後 4.5→3.0m ³ /h)	昨年度試験 (注水停止:8時間)	今年度試験前	注水停止試験中
		2017.5.17採取	2019.5.13採取	2020.8.6採取	2020.8.19採取
全α	—	ND ($< 8.6\text{E}-03$)	2.5 E -02	ND ($<4.3\text{E}-03$)	4.2E-02
全β	—	(分析未実施)	1.1 E + 02	2.3E+01	3.1E+01
H-3	約12年	8.1E+02	1.2E+03	5.7E+02	5.7E+02
Sr-90	約29年	2.1E+01	4.6E+01	1.3E+01	2.0E+01
Cs-134	約2年	6.0E-01※1	3.5E+00	1.5E-01	2.6E-01
Cs-137	約30年	4.2E+00	4.4E+01	2.8E+00	4.6E+00
Sb-125	約3年	3.4E-01※1	3.7E-01	1.5E-01	4.8E-01
Co-60	約5年	2.7E-02※1	7.7E-02	1.9E-02	1.1E-01
その他γ 核種※2	—	ND※1	ND	ND	ND

※1 未検証の測定結果であるため参考値

※2 Cr-51、Mn-54、Co-58、Fe-59、Ag-110m、I-131、Ce-144、Eu-154、Am-241

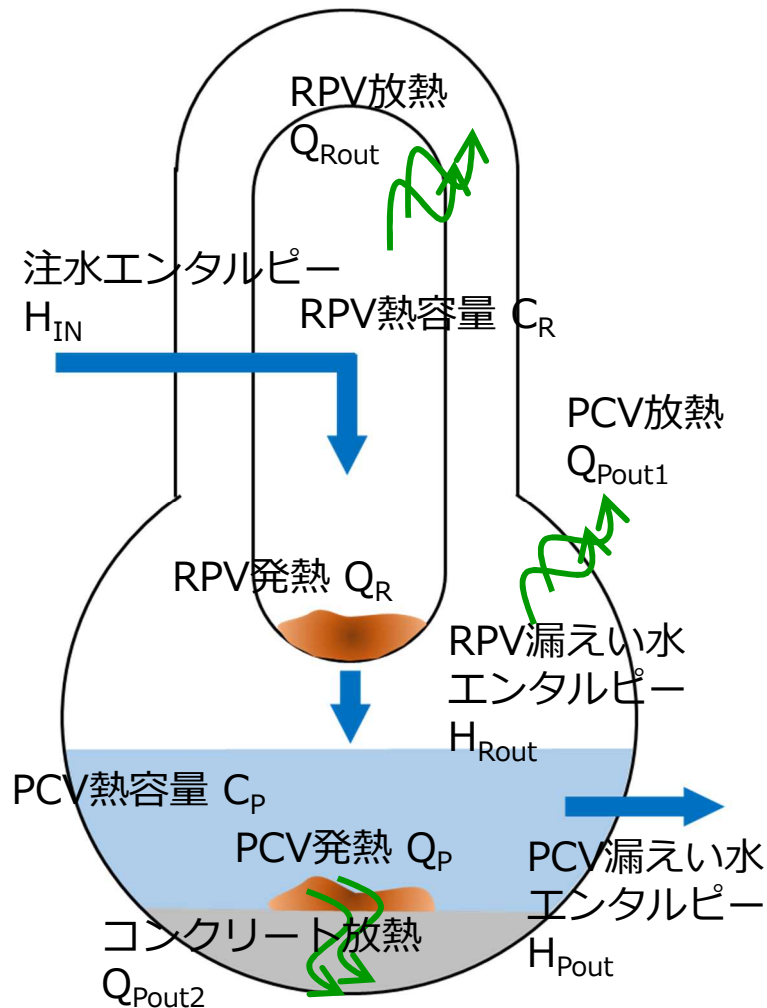
【試験結果】

- 3日間の注水停止では、RPV底部温度（TE-2-3-69R）の温度上昇率はほぼ一定。この範囲では、熱バランス評価による計算値は実測値をよい精度で再現。
- 注水停止中にD/W圧力の低下、注水再開後にD/W圧力の上昇を確認。D/W圧力の低下量は約1kPaであったが、圧力変化がPCV内の乾燥によるものであれば、20%程度の相対湿度の変化に相当。
- 注水停止中に採取した、HEPAフィルタ入口側のダスト、凝縮水で濃度上昇を確認。
 - D/W内の相対湿度低下によるダスト放出増加の可能性
 - 過去に測定した値と同程度であり、変動の範囲内である可能性

【今後】

- 注水停止中の熱バランス評価による計算値は実測値をよい精度で再現しており、本結果を踏まえて、今後の注水のあり方（注水量の更なる低減など）を検討していく。

- 燃料デブリの崩壊熱、注水流量、注水温度などのエネルギー収支から、RPV、PCVの温度を簡易的に評価。
- RPV/PCVの燃料デブリ分布や冷却水のかかり方など不明な点が多く、評価条件には仮定を多く含むものの、単純化したマクロな体系で、過去の実機温度データを概ね再現可能



- タイムステップあたりのエネルギー収支から、RPV/PCVの温度挙動を計算

(1) RPVのエネルギー収支と温度変化の計算式

$$H_{IN} + Q_R - Q_{Rout} - H_{Rout} - C_R \times \Delta T_R = 0$$

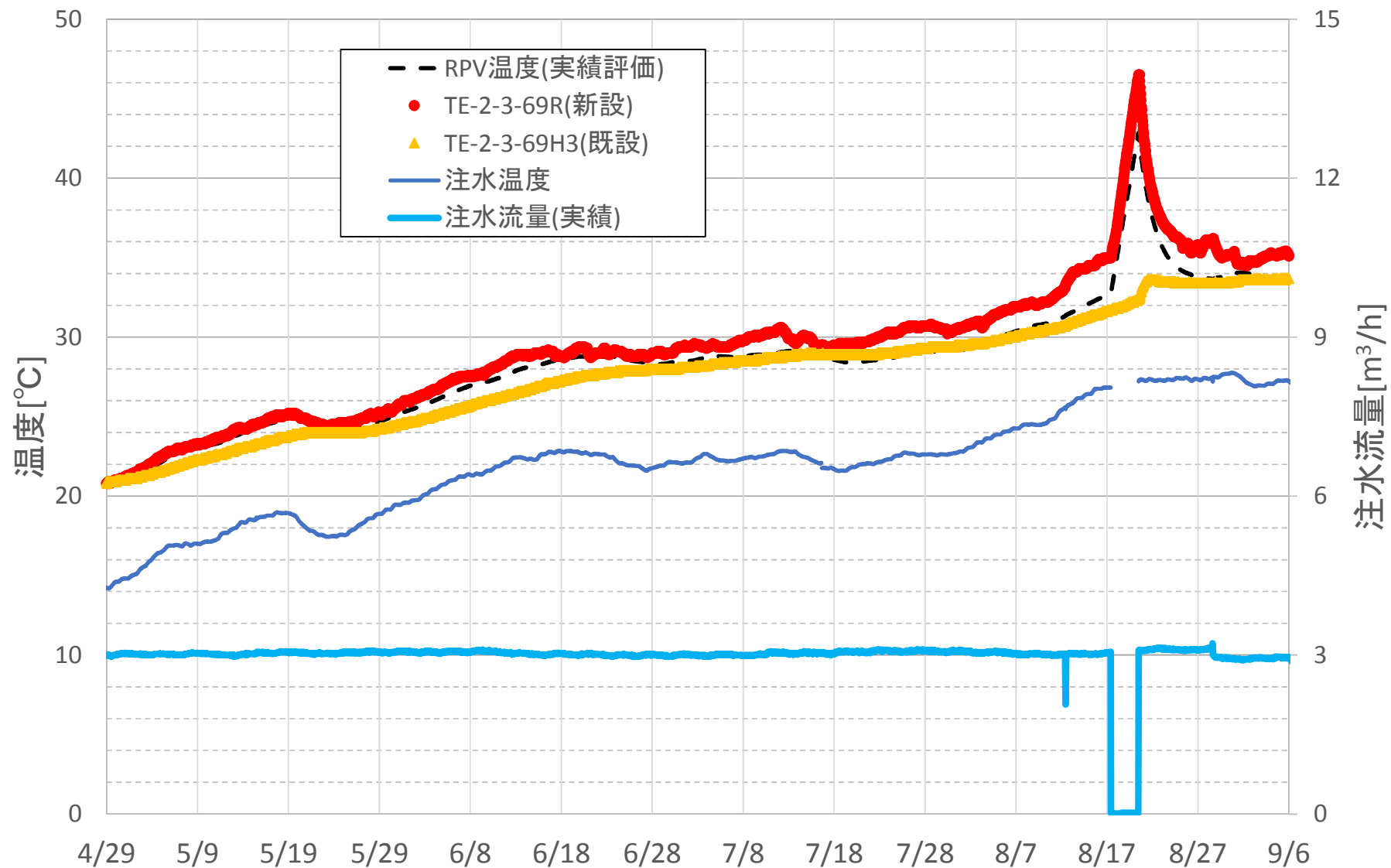
$$T_{RPV}(i+1) = T_{RPV}(i) + \Delta T_R$$

(2) PCVのエネルギー収支と温度変化の計算式

$$H_{Rout} + Q_p + Q_{Rout} - Q_{Pout1} - Q_{Pout2} - H_{Pout} - C_p \times \Delta T_p = 0$$

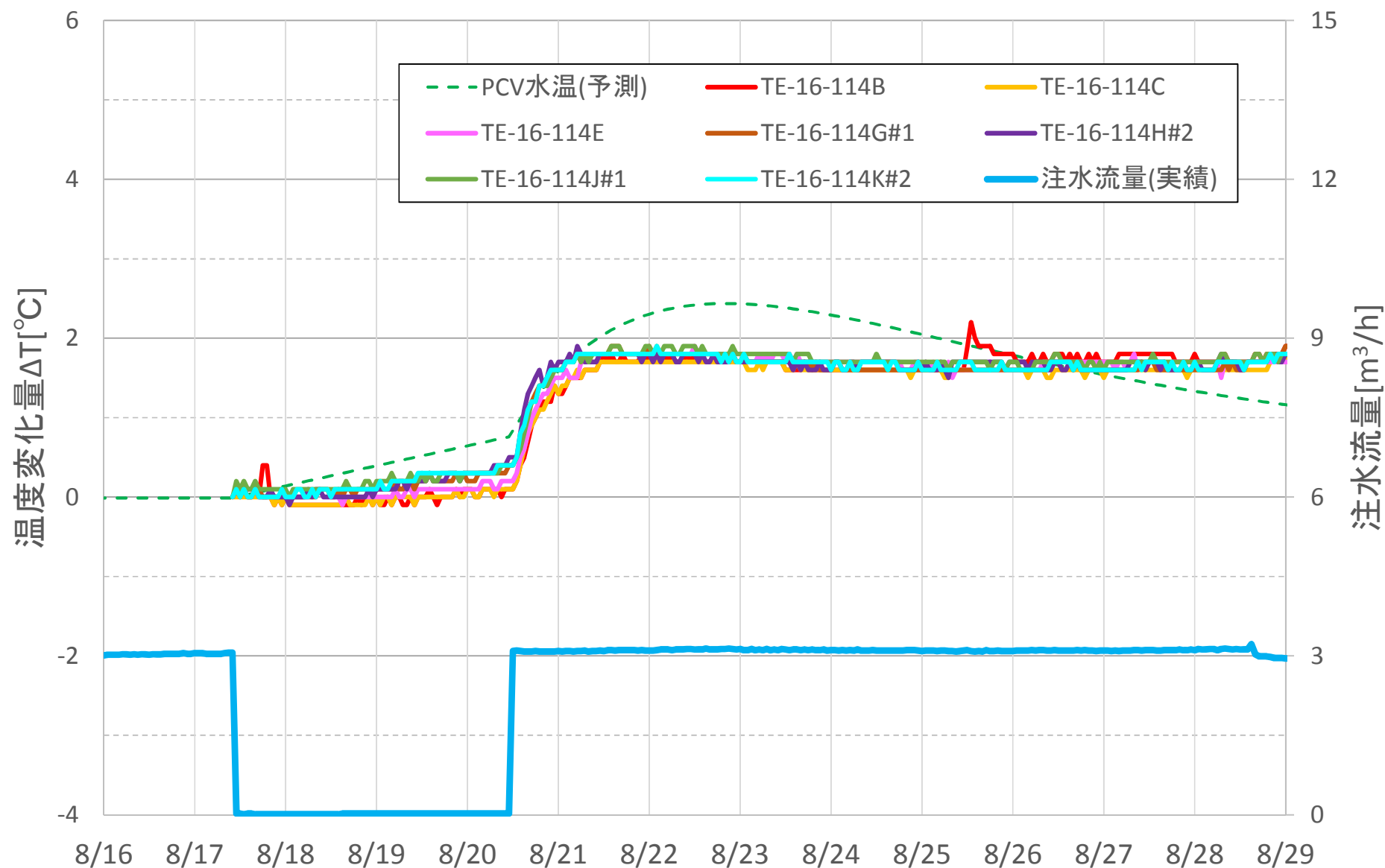
$$T_{PCV}(i+1) = T_{PCV}(i) + \Delta T_p$$

- より長期間のRPV底部温度の挙動も再現できている。

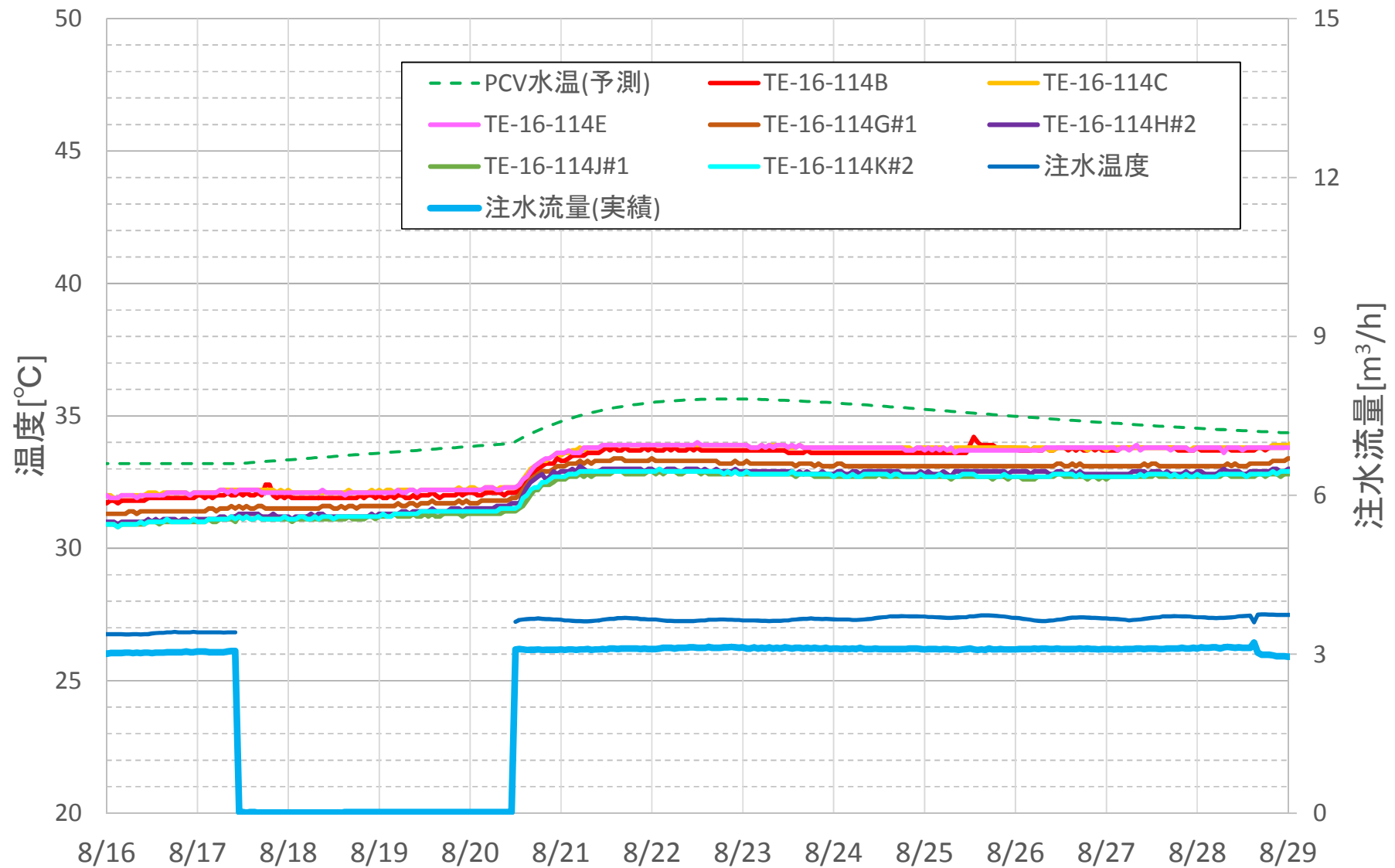


(参考) PCV温度(既設)の推移 (試験開始からの温度変化量)

- PCV新設温度計のTE-16-007、008と同様の傾向であった。

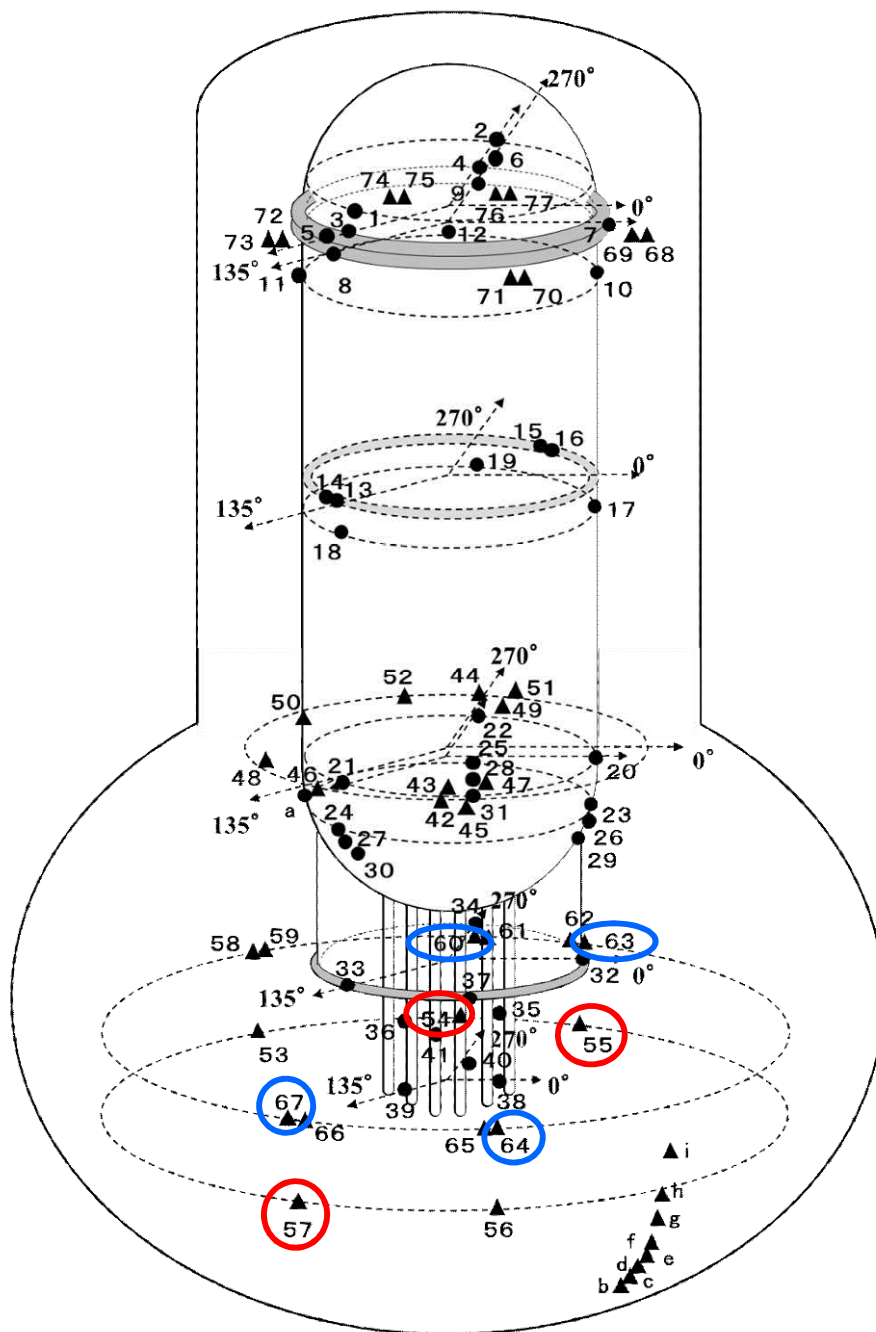


(参考)PCV温度(既設)の推移 (実測値)



※予測温度は試験開始時の実績温度(TE-16-001)を基準としている

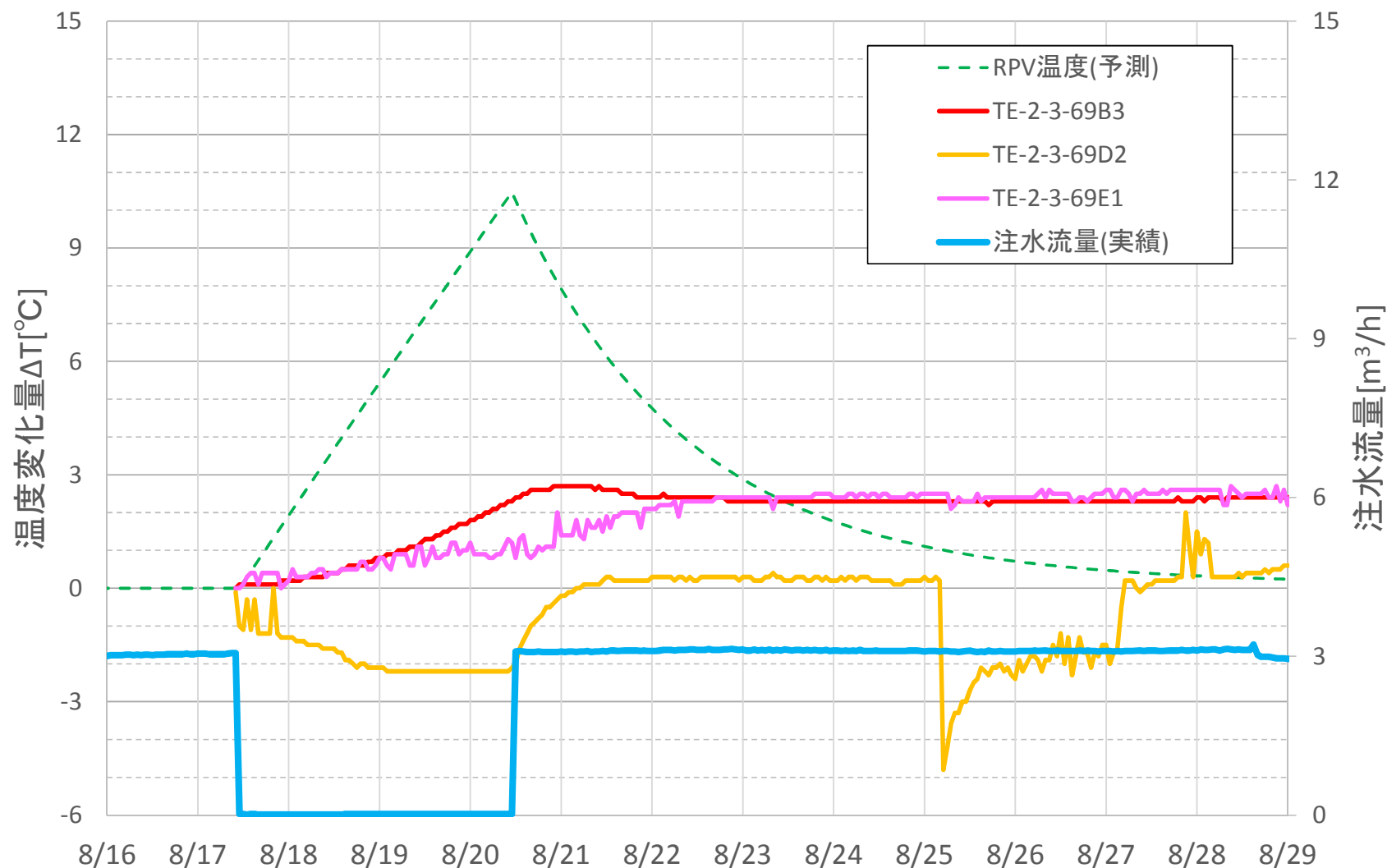
(参考) PCV温度計(既設)設置位置



サービス名称	Tag No.	No.
RETURN AIR DRYWELL COOLER	TE-16-114B、C、E	54、55、 57
SUPPLY AIR D/W COOLER	TE-16-114G#1、 H#2、J#1、K#2	60、63、 64、67

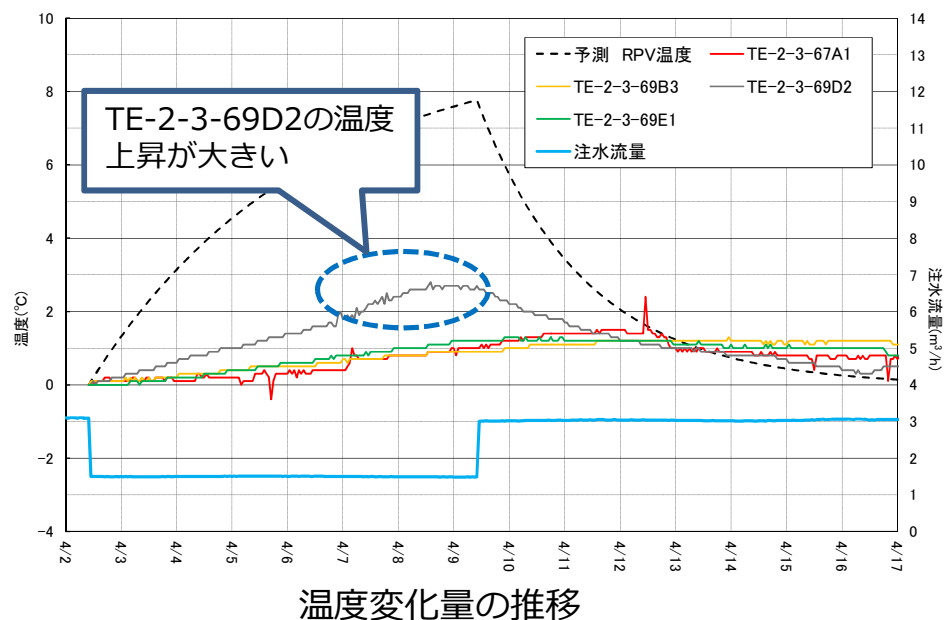
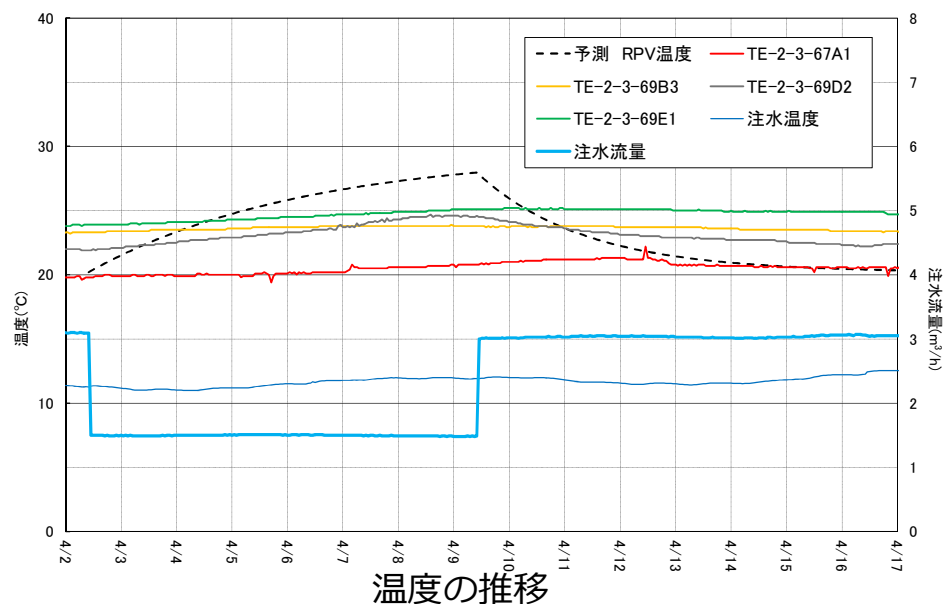
(参考) RPV上部温度の推移 (試験開始からの温度変化量)

- TE-2-3-69B3 : 温度上昇が大きい。
- TE-2-3-69D2 : 注水停止中は温度低下し、注水再開で温度上昇。8/25以降に特異的な挙動あり。

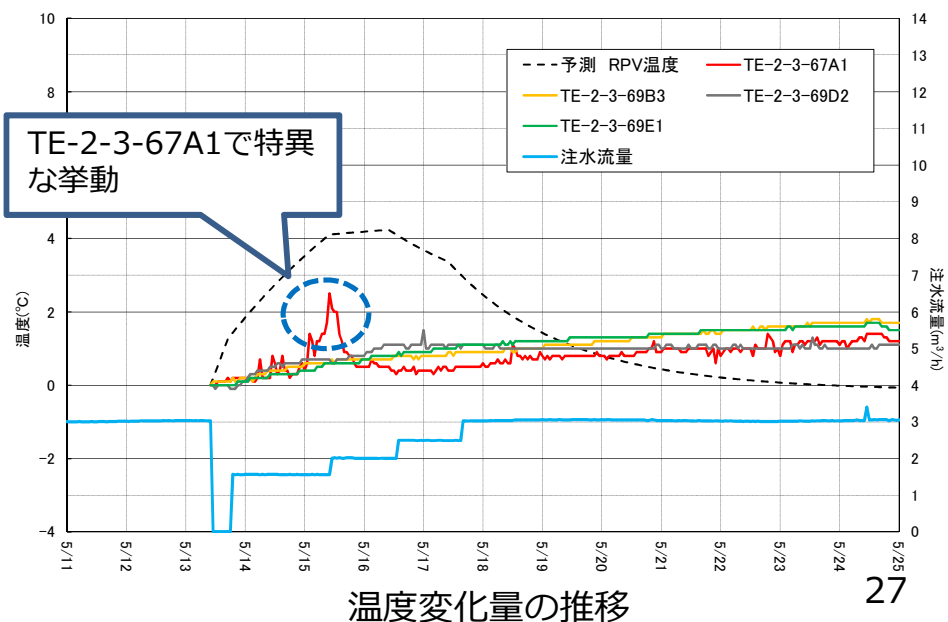
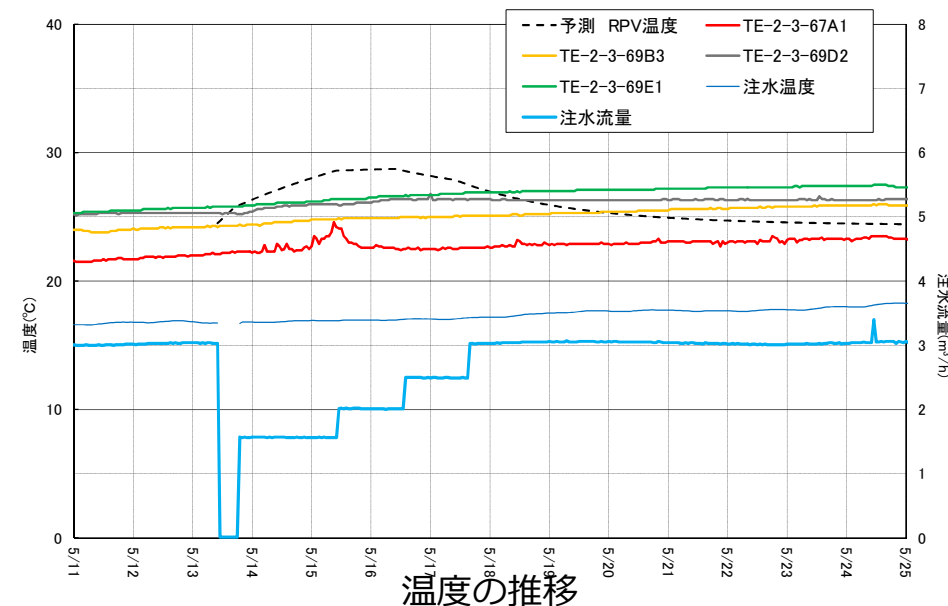


(参考) 昨年度試験時挙動：RPV上部温度

STEP1(注水量低減)



STEP2(注水停止)



(参考) RPV上部温度の挙動に関する考察

- 69D2は、昨年度試験の注水量低減で温度上昇が大きく、下記のとおり考察。下記の考察に基づく、注水停止で温度上昇すると考えられるが、異なる傾向であり、引き続き検討していく。
- 69B3、69E1については、温度上昇しており、RPVの温度上昇による影響の可能性。

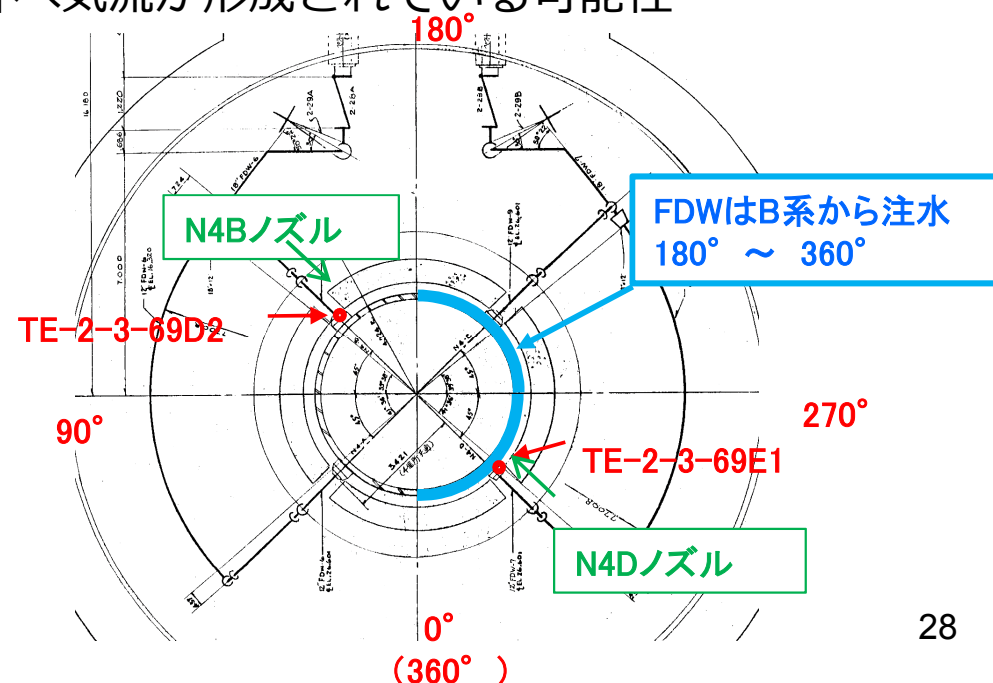
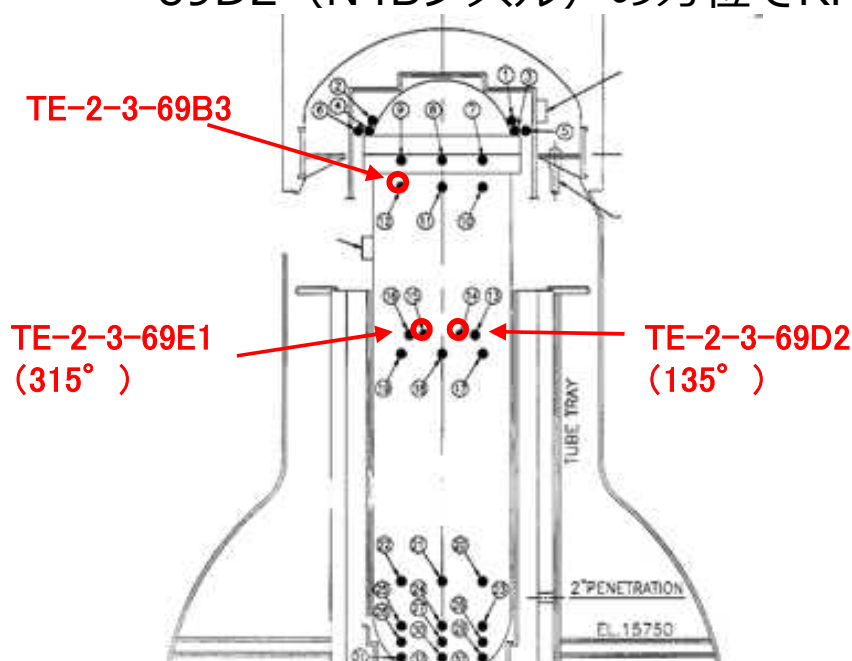
(昨年度考察)

■ 特徴

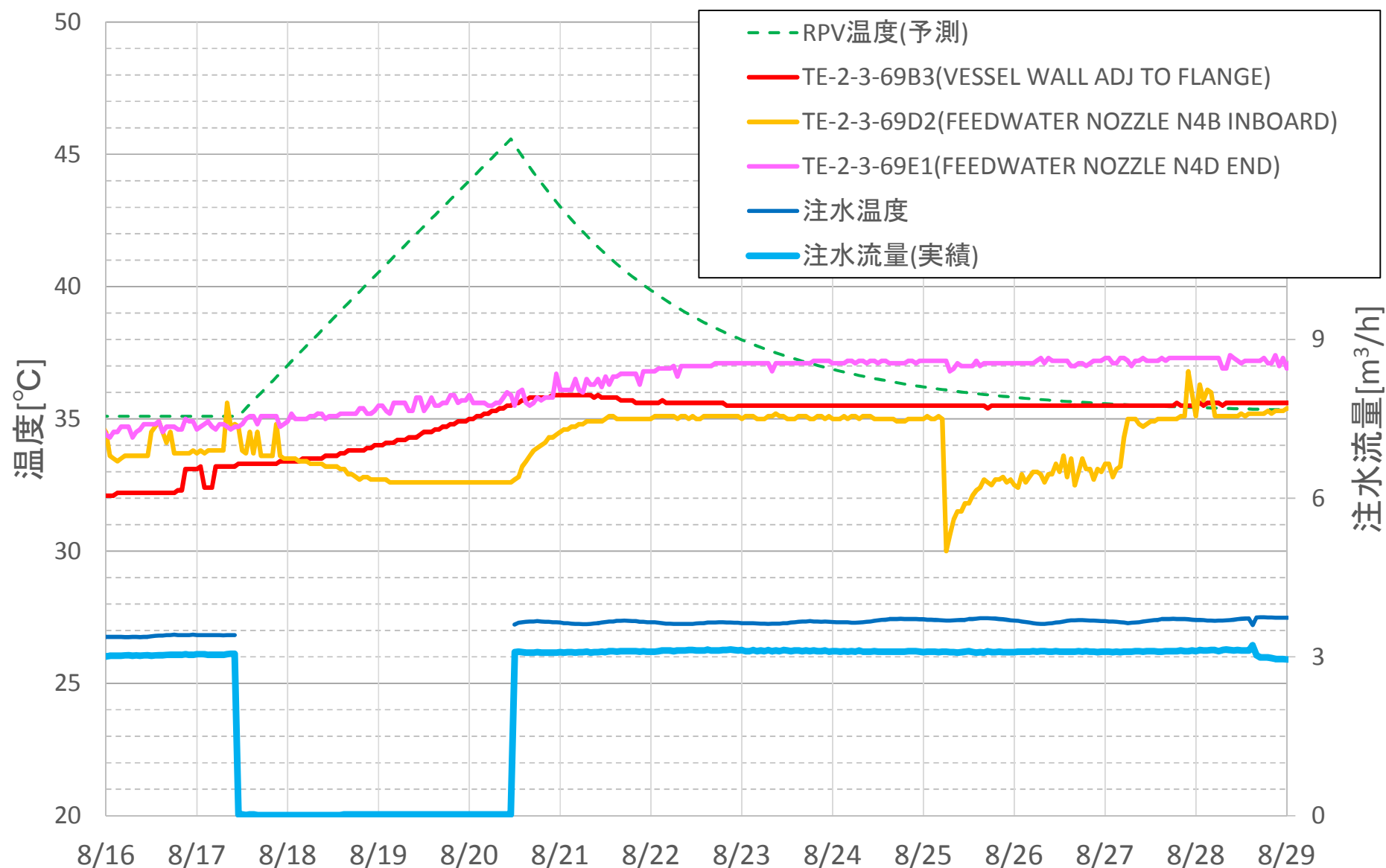
- ✓ STEP1の69D2の温度上昇幅が大きい
- ✓ STEP1で、69D2以外は、PCV気中温度よりも温度上昇は小さかった

■ 考察

- ✓ 69D2の温度変化が、他の温度計と比較して大きいことについては、69D2の方位に熱源（燃料デブリ、FPの付着等）が存在している可能性
- ✓ 69D2（N4Bノズル）の方位でRPV内外へ気流が形成されている可能性



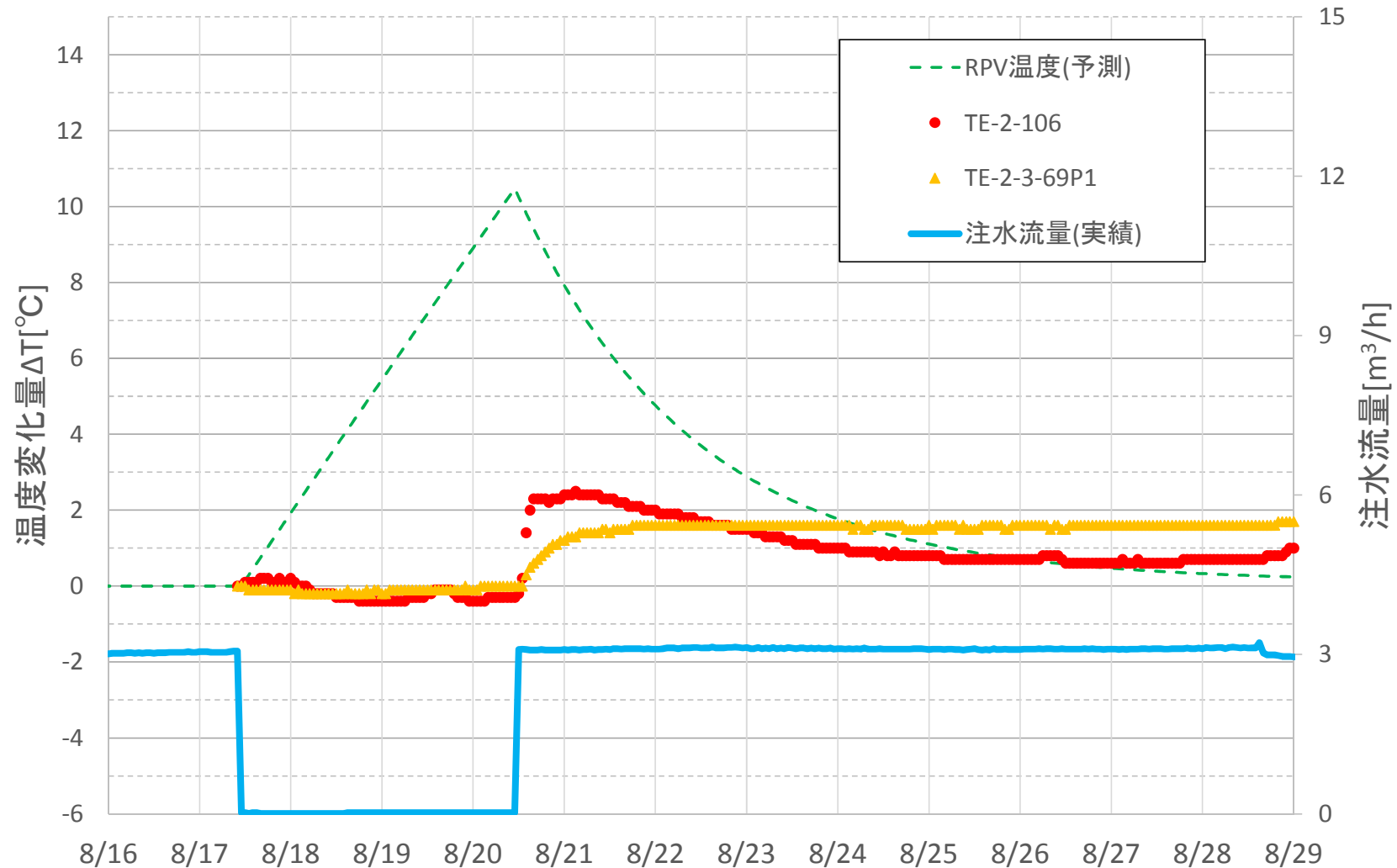
(参考) RPV上部温度の推移 (実測値)



※予測温度は試験開始時の実績温度(TE-2-3-69R)を基準としている

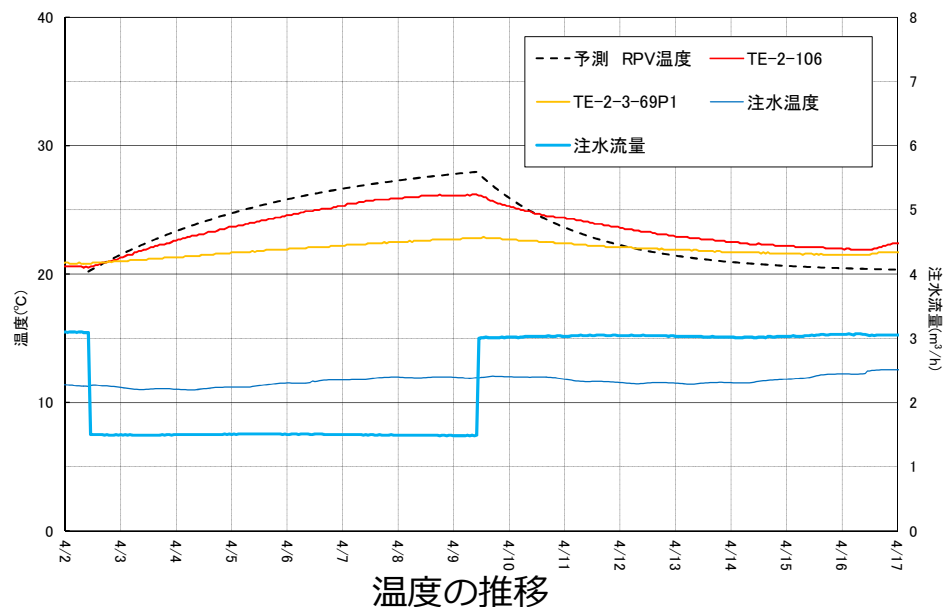
(参考) その他のRPV温度の推移 (試験開始からの温度変化量) **TEPCO**

- TE-2-106 : 注水再開後にステップ状の温度上昇 (約2℃)。
- TE-2-3-69P1 : PCV温度等と同様の傾向。

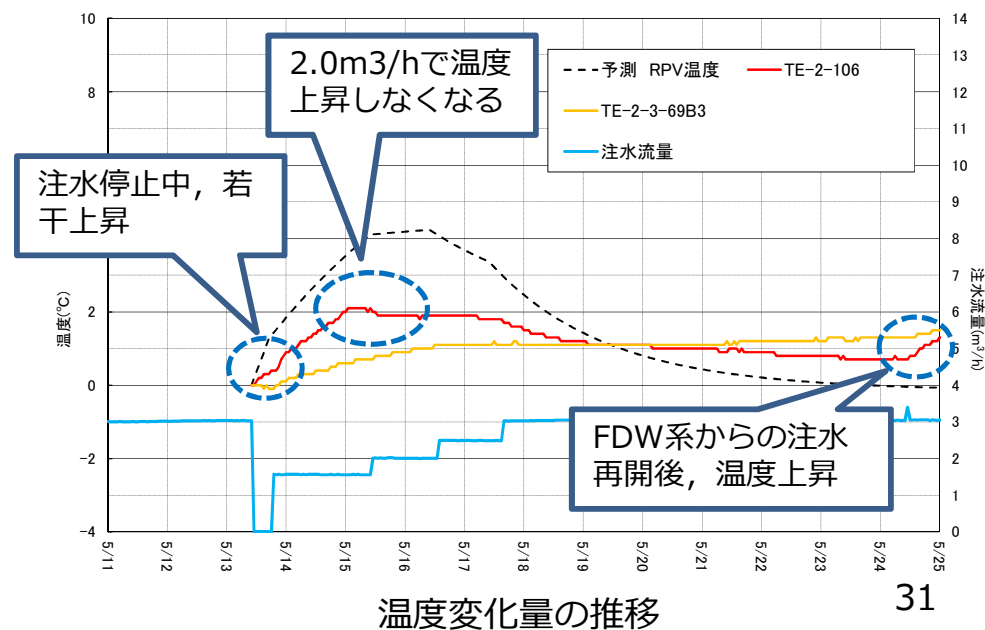
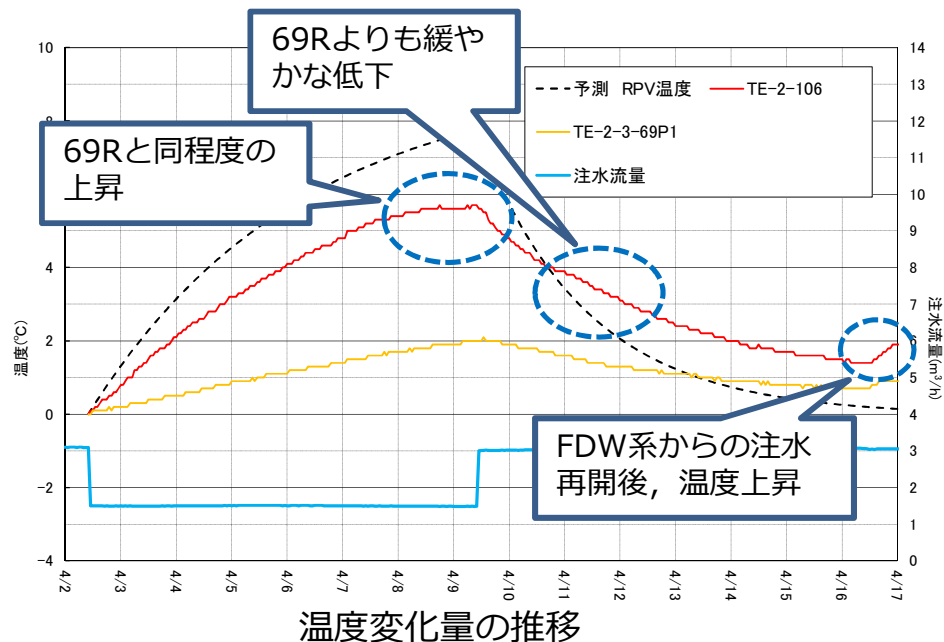
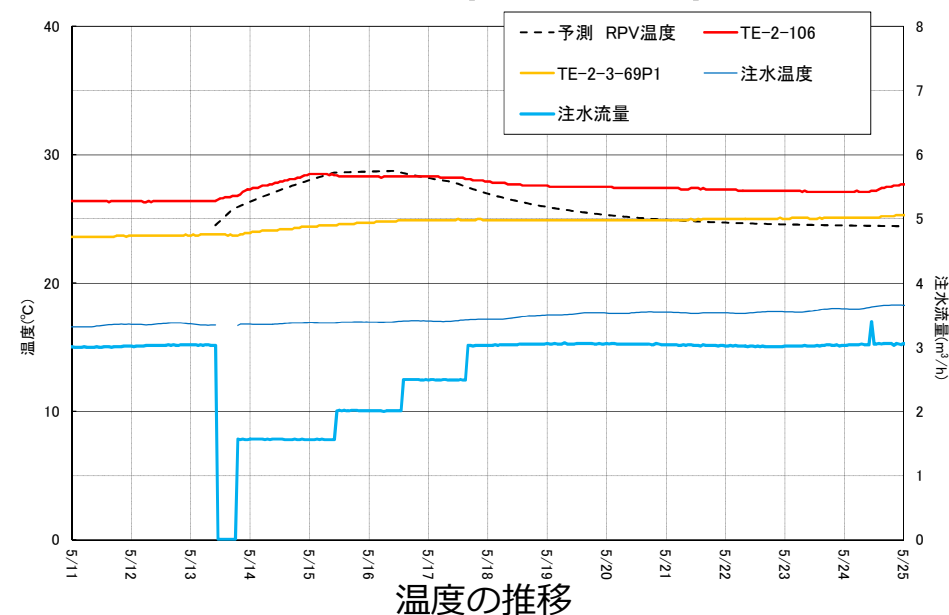


(参考) 昨年度試験時挙動：その他のRPV温度

STEP1(注水量低減)



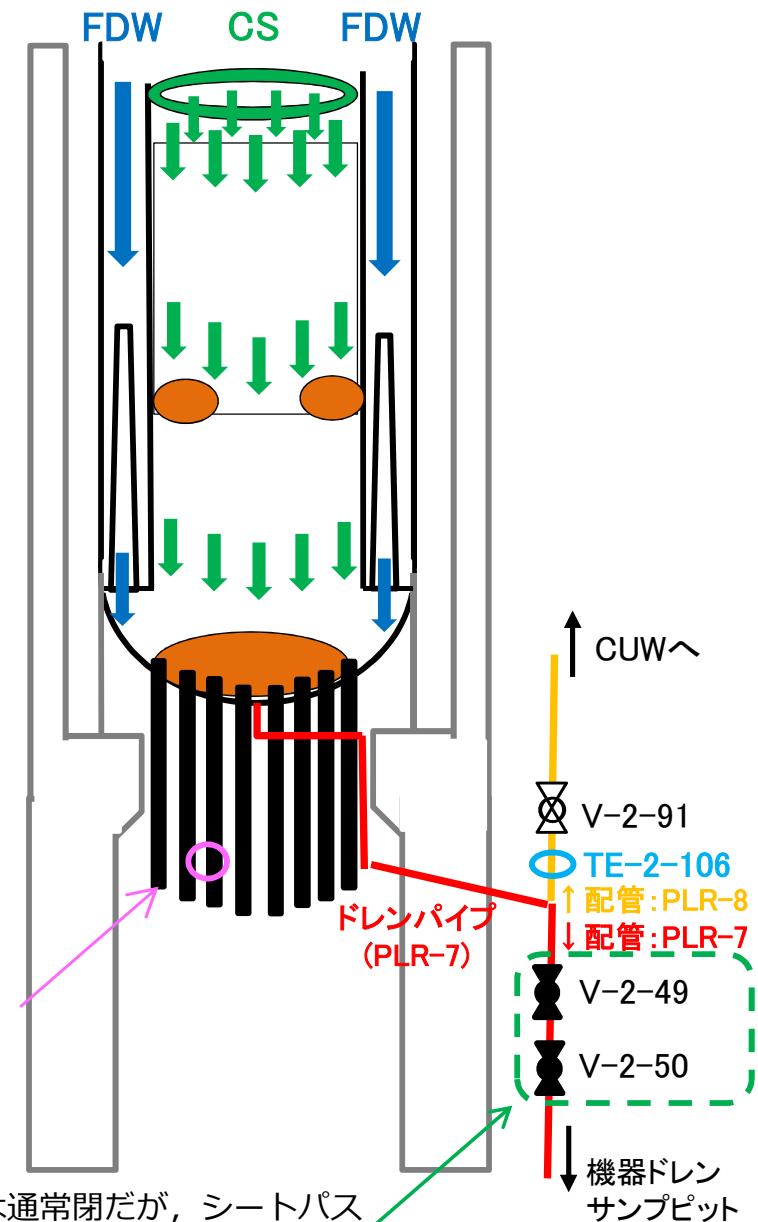
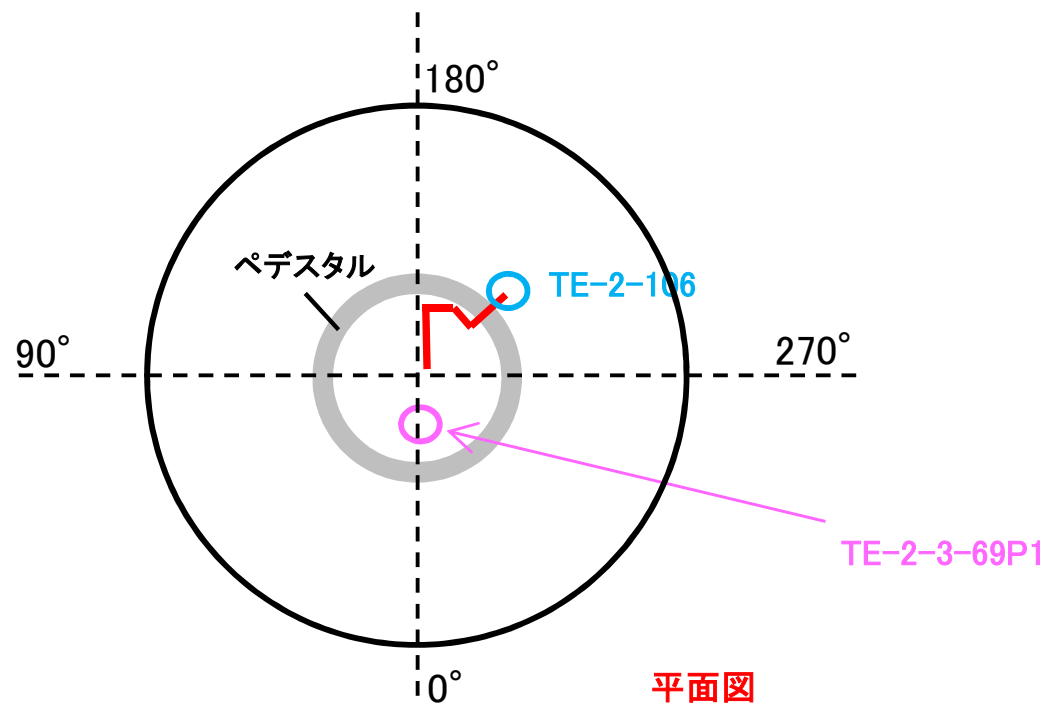
STEP2(注水停止)



(参考) その他のRPV温度

TE-2-106 (VESSEL BOTTOM DRAIN)

- RPV下部のドレンパイプは、RPVノズル（N15）から配管PLR-7（配管サイズ：2B=内径約5cm）を經由しており、ペデスタルの外側で、配管PLR-7とPLR-8へ分岐する。
- TE-2-106は、分岐した配管PLR-8の弁（V-2-91）手前に設置されている（分岐点から18cm程度上側）。
- 測定位置は、方向（233°）、高さ（約TP9960）



V-2-49,50は通常閉だが、シートパスなどで水の流れが生じる可能性

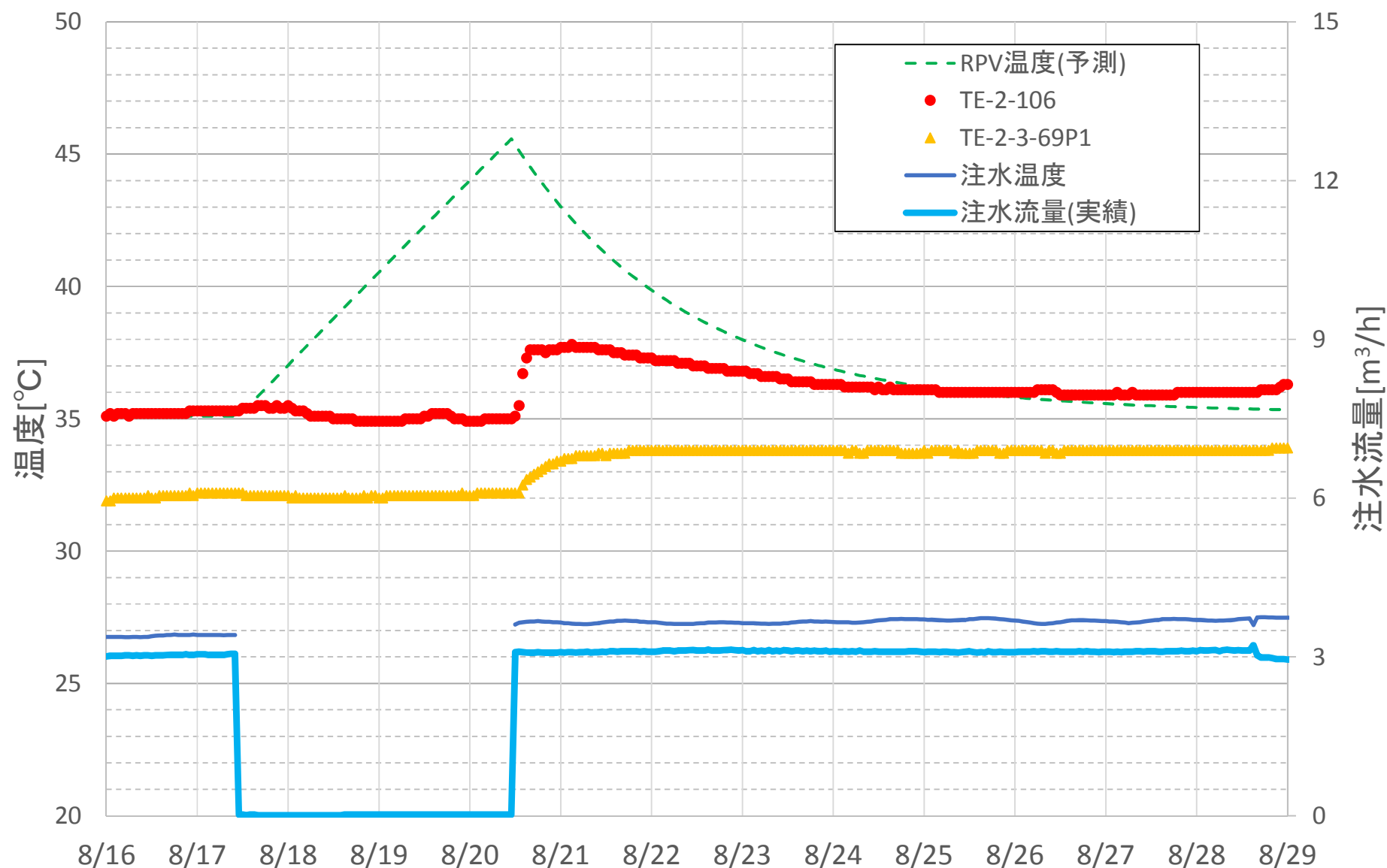
- TE-2-106は、下記のとおり、RPV下部ドレンから流れてくる水の影響を受けると推定していた。今回の注水再開時に、ステップ状の温度上昇が確認されており、同様に影響を受けた可能性あり。
- TE-2-3-69P1は、昨年度試験と同じく、PCV温度と同様の推移。

(昨年度考察)

■ 考察

- ✓ TE-2-106は、RPV下部ドレンから流れてくる水の温度の影響を受けている可能性がある。
- ✓ STEP1で注水再開後の温度低下が、TE-2-3-69Rよりも緩やかなのは、RPV下部ドレン配管内に流れる水が一定量と想定され、流量を増やしても配管内の水の置換が制限され、温度低下が遅くなっている可能性。
- ✓ TE-2-106は、FDW系注水再開後温度上昇しているのは、CS系からの水が減り、RPV下部の中心付近にあるRPV下部ドレンに流れる水の温度が上昇している可能性
- ✓ TE-2-106は、注水停止中は、水の流れがなくなり、温度があまり変化せず、注水再開で、温められていた水が流れ、温度が上昇した可能性。

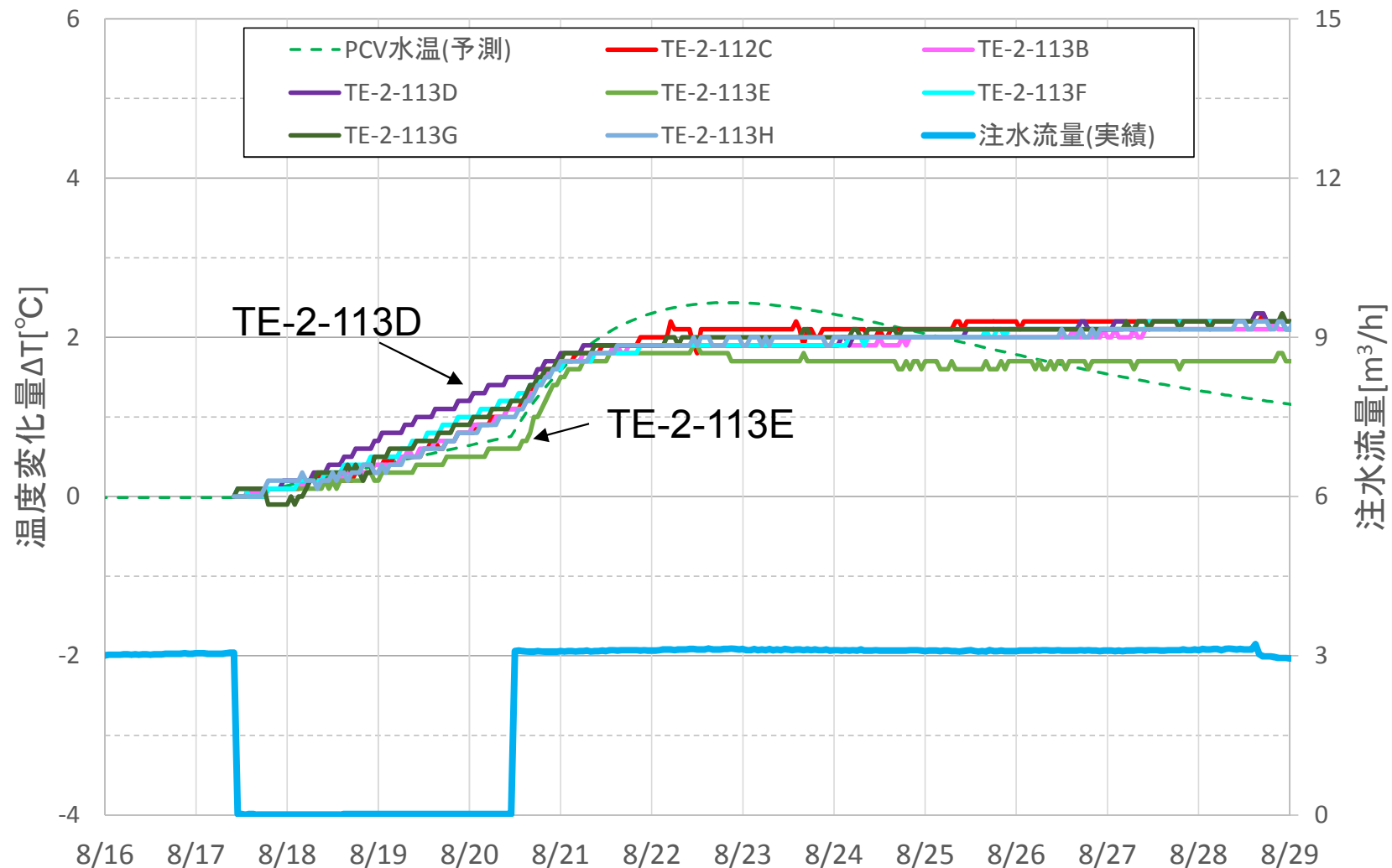
(参考) その他RPV温度の推移 (実測値)



※予測温度は試験開始時の実績温度(TE-2-3-69R)を基準としている

(参考) その他PCV温度の推移 (試験開始からの温度変化量)

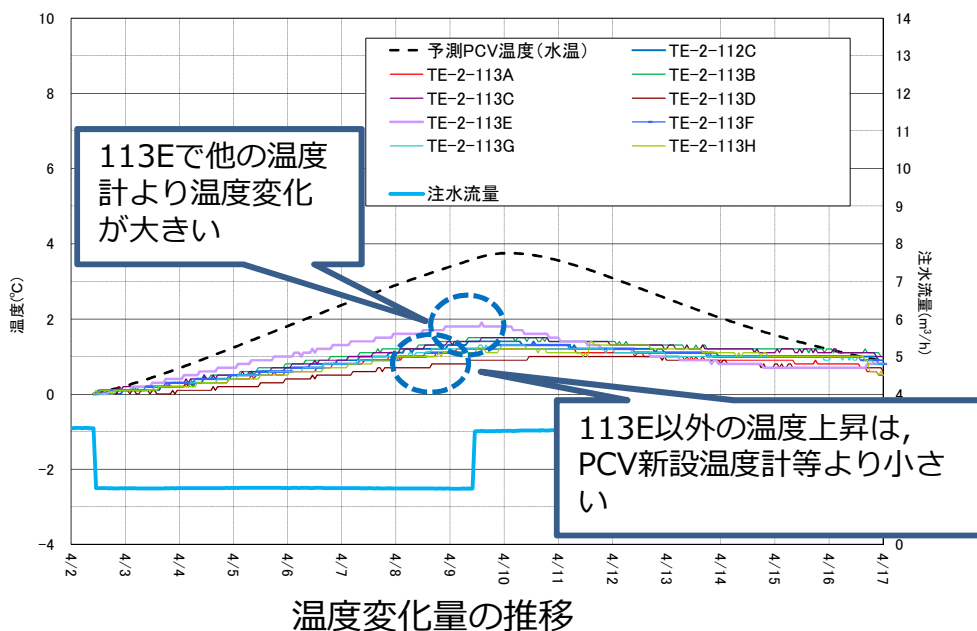
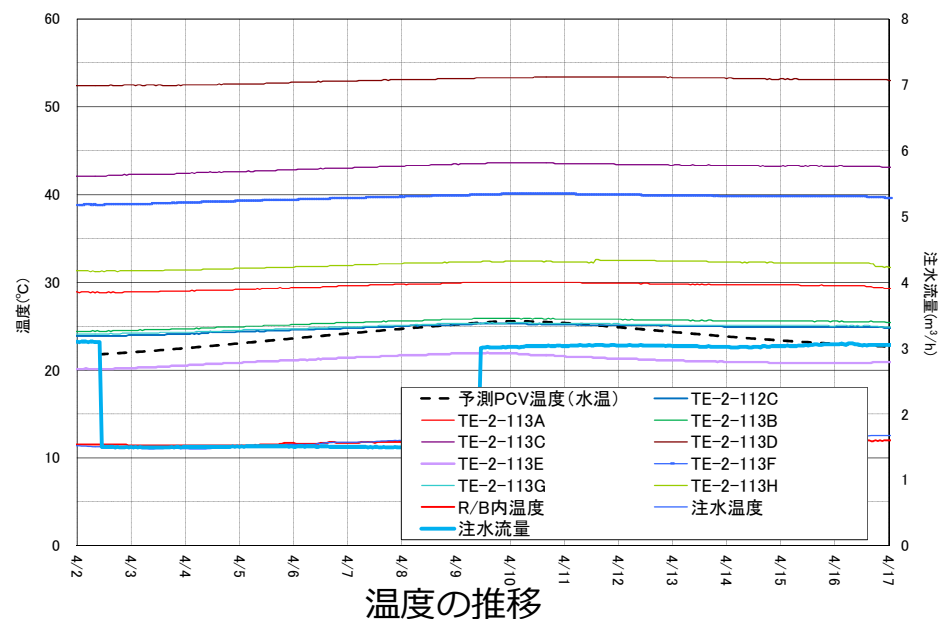
- 注水停止中に温度が上昇。
- TE-2-113D：他の温度計と比較して温度上昇が大きい。
- TE-2-113E：他の温度計と比較して温度上昇が小さい。



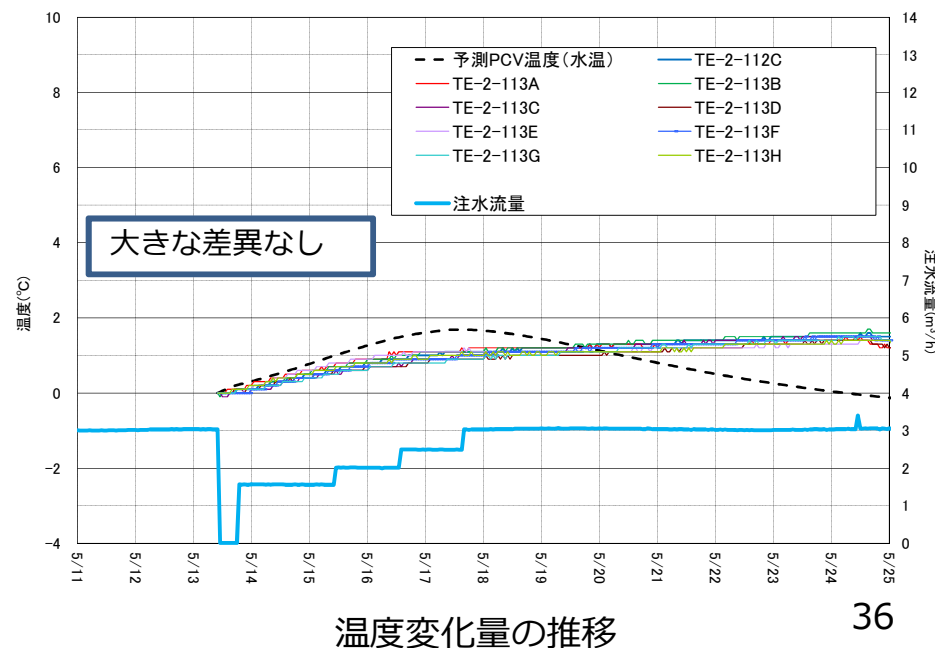
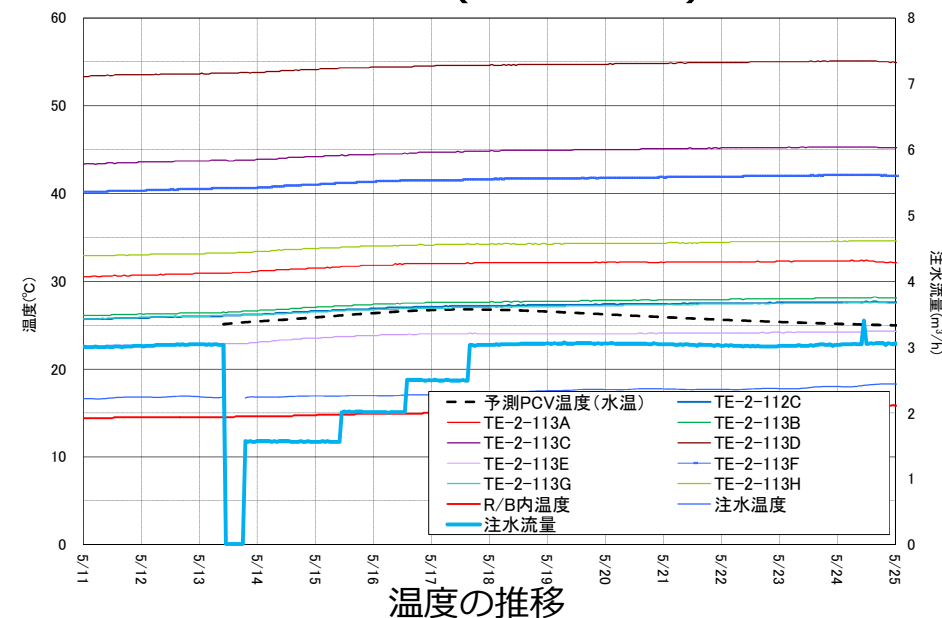
※TE-2-113A、TE-2-113Cは、特異な挙動があり、見難くなるため本グラフ(ΔT)では未掲載。

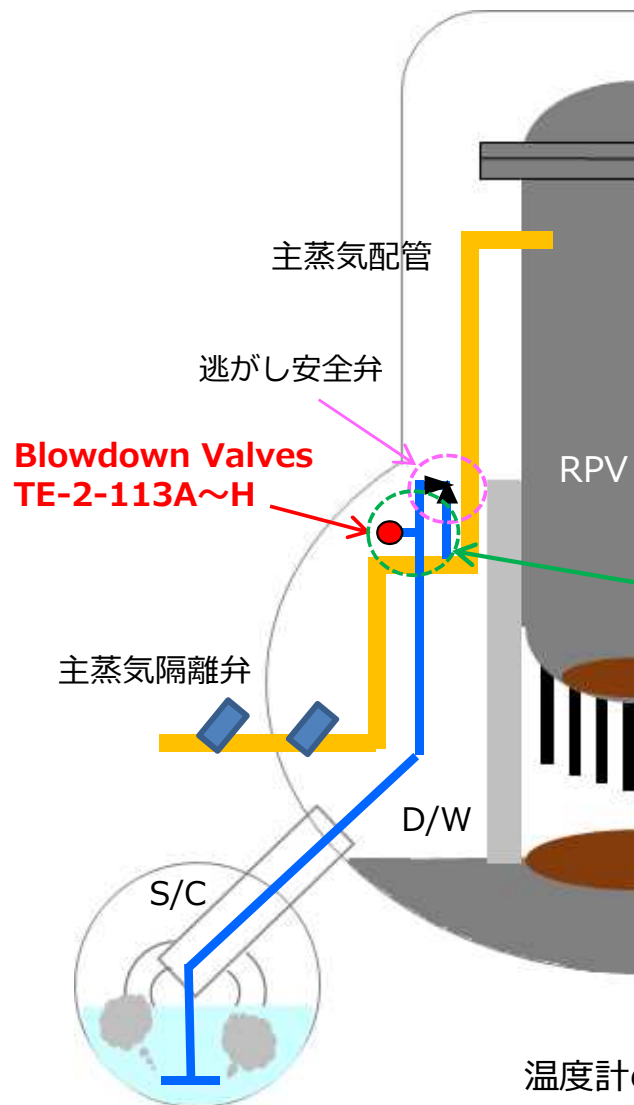
(参考) 昨年度試験時挙動：その他PCV温度の挙動

STEP1(注水量低減)

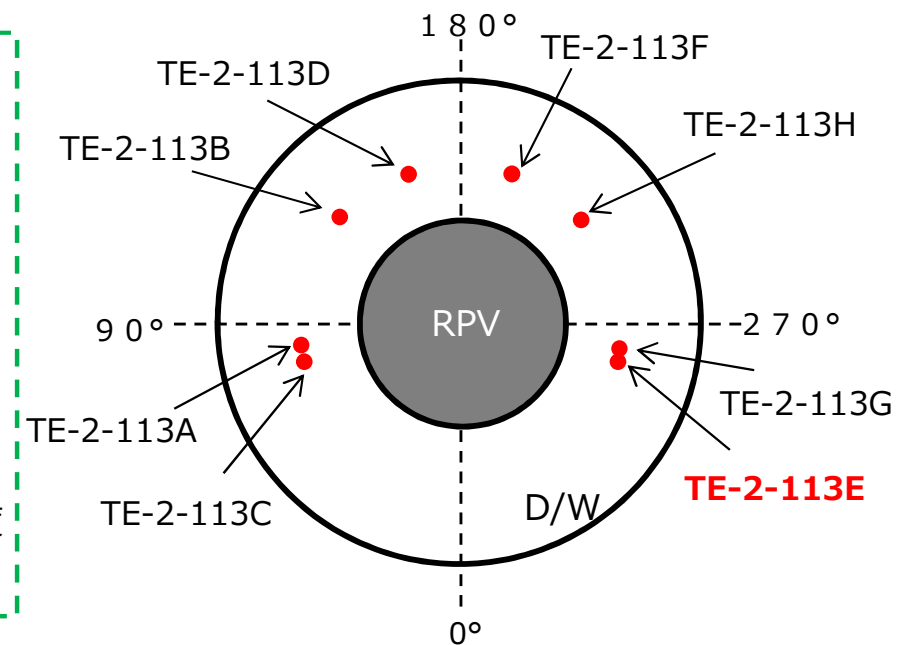
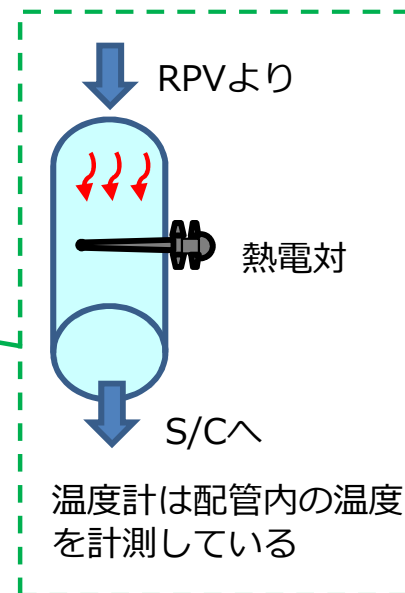


STEP2(注水停止)





温度計の設置位置概要



水平方向の配置
(T.P. 16064)

D/W : ドライウェル, S/C : サプレッションチャンバー (圧力抑制室)

- TE-2-113Eは、PCV気中温度(新設、HVVH温度計)に近い挙動であり、昨年度考察「配管内とD/W連通の可能性」と同様の傾向であった。
- TE-2-113Dの温度上昇が大きかった要因としては、放射性物質の付着状況などが挙げられるが、引き続き検討していく。

(昨年度考察)

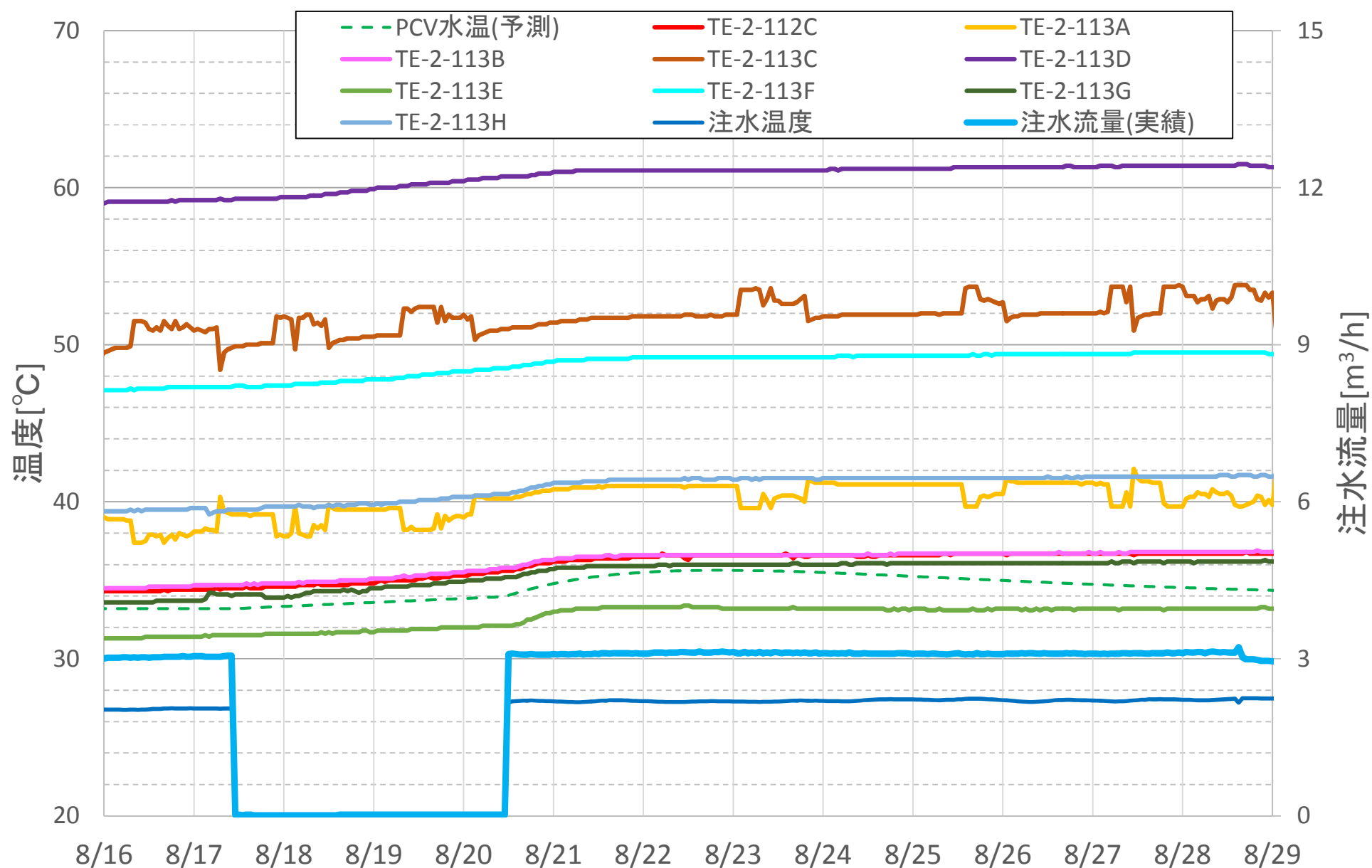
■ 特徴

- ✓ STEP1でTE-2-113Eで他の温度計よりも温度変化が大きく、PCV気中温度（新設温度計、HVVH温度計）と同様の推移
- ✓ STEP1でTE-2-113E以外の温度上昇幅はPCV気中温度（新設温度計、HVVH温度計）よりも小さい。
- ✓ Blowdown Valvesの温度は全体的にRPV底部温度よりも指示値が高いものがある。

■ 考察

- ✓ TE-2-113A～H（Blowdown Valves A～H）は、逃し安全弁（SRV）からS/Cへの経路にある温度計であり、配管内の気体は、D/Wと直接連通しておらず、S/C側も連通していない。
→113E以外の挙動は、温められた周囲のD/W温度により、配管内が温められた結果、温度上昇していると考えられる。そのため、上昇幅も小さく、その後の温度低下の追従も追いつかず、上昇後の低下傾向はほとんどなかったものと考えられる。
- ✓ TE-2-113Eは、絶対値の温度もHVVH温度と同等であり、配管内とD/W内が連通している可能性がある。
- ✓ TE-2-113A～H（Blowdown Valves A～H）には、全体的にRPV底部温度よりも指示値が高いものがある。これは事故時のSRVの動作に伴い、放射性物質が配管内（温度計付近）に付着したことによる影響の可能性があると推定。

(参考) その他PCV温度の推移 (実測値)



※予測温度は試験開始時の実績温度(TE-16-001)を基準としている

(参考) 各号機の試験目的等

	1号機	2号機	3号機
試験目的	注水停止により、PCV水位が水温を測定している下端の温度計(T1)を下回るかどうかを確認する	2019年度試験(約8時間)より長期間の注水停止時の温度上昇を確認し、温度評価モデルの検証データ等を蓄積する	PCV水位がMS配管ベローズを下回らないことを確認する
補足	- 昨年度試験では、PCV水温を測定している温度計は露出しなかった - より長期間の停止で温度計が露出するか確認し、今後の注水量低減・停止時に考慮すべき監視設備に関する知見を拡充する - PCV水位低下状況を踏まえ、今後の注水のありかたを検討していく	- 昨年度試験での注水停止期間、RPV底部温度はほぼ一定で上昇することを確認 - より長期間の停止で、温度上昇の傾きに変化が生じるか確認し、評価モデルを検証する	- 昨年度試験では、PCVからの漏えいを確認しているMS配管ベローズまでPCV水位は低下しなかった - PCV水位の低下有無や低下速度等を踏まえ今後の注水のありかたを検討していく
停止期間	5日間	3日間	7日間
試験時期	時期調整中	2020年8月実施済	時期調整中