

福島第一原子力発電所 1～3号機
原子炉注水停止試験の実施について

2020年7月30日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

【概要】

【2019年度】

- 1～3号機について、冷却設備の運転・保守管理の適正化、緊急時対応手順等の適正化を図ることを目的に原子炉注水の一時的な停止を実施。
- 注水停止による温度上昇は予測の範囲内であることを確認。

| 1号機 | 2号機 | 3号機 |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 2019年10月 (約49時間の注水停止) | 2019年5月 (約8時間の注水停止) | 2020年2月 (約48時間の注水停止) |



【2020年度以降】

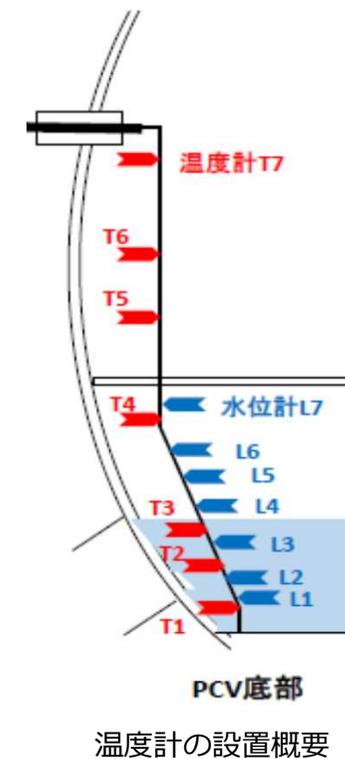
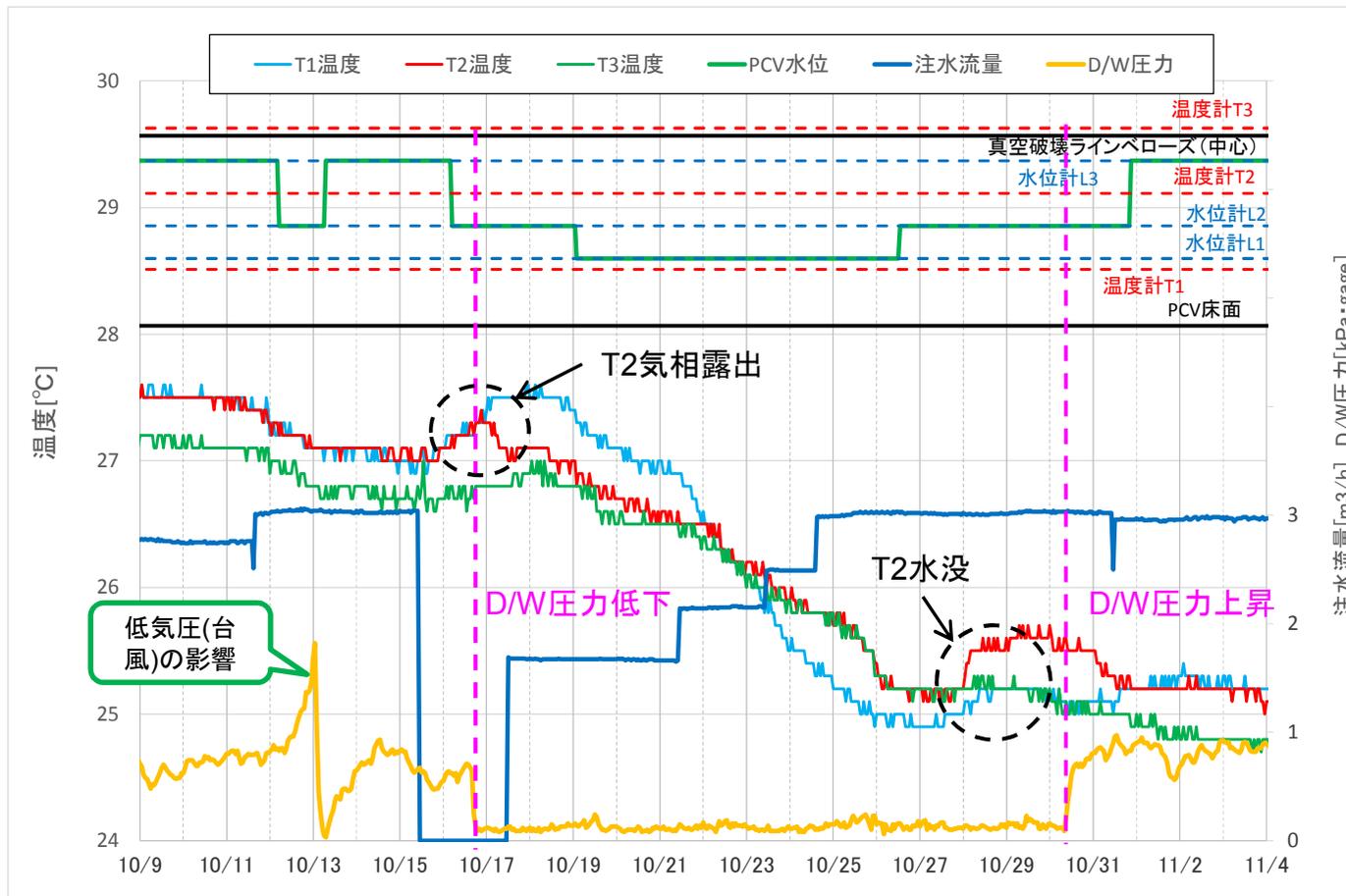
- 2019年度に実施した注水停止試験結果を踏まえ、今後の廃炉に向けて、各号機の状況を踏まえた目的に応じた試験を計画・実施していく。
- 次回注水停止期間（予定）

| | 1号機 | 2号機 | 3号機 |
|--------|-----|-----|-----|
| 注水停止期間 | 5日間 | 3日間 | 7日間 |

【1号機】2019年度に実施した試験で得られた知見

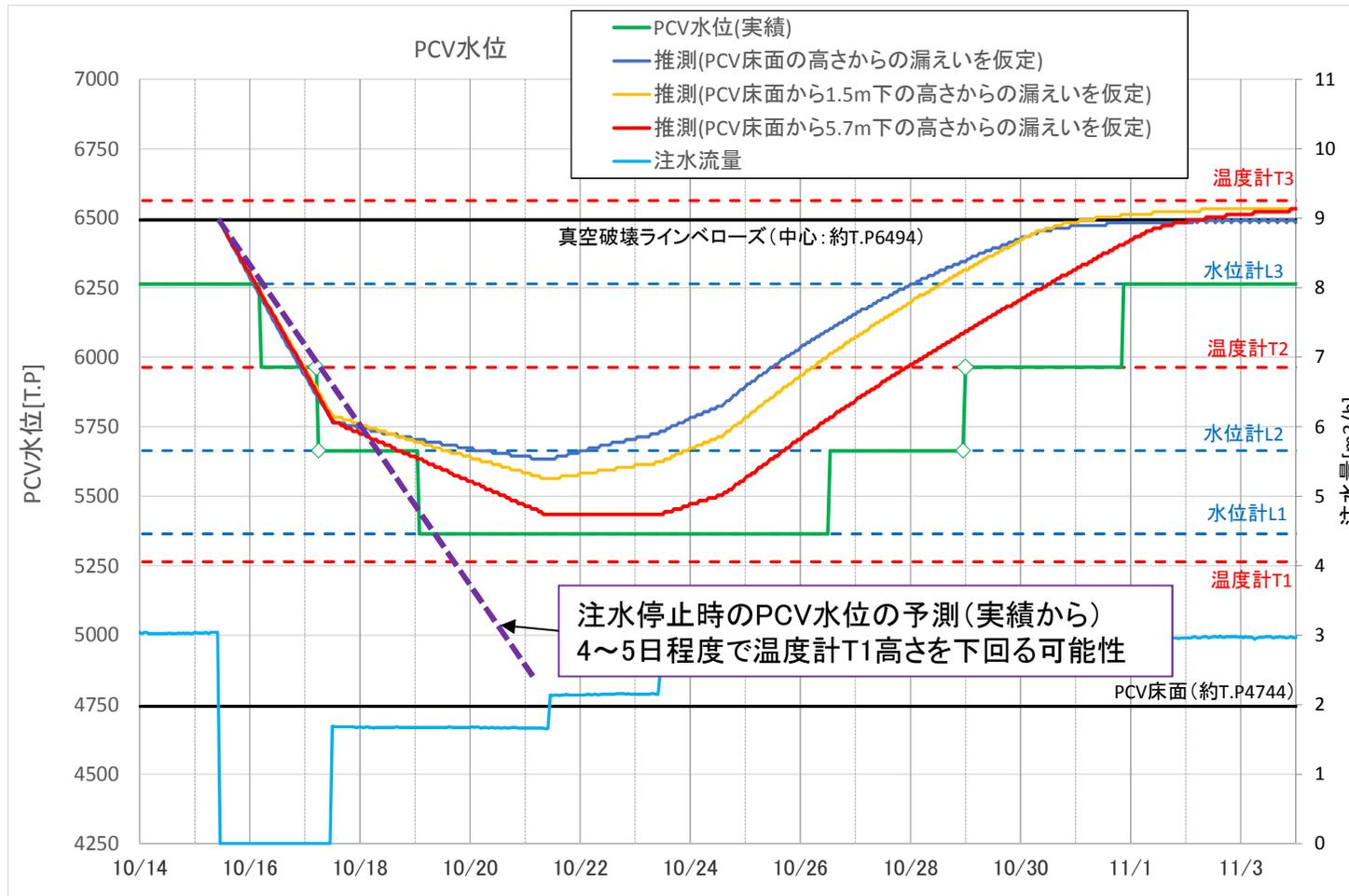
■ 1号機（約49時間の注水停止）

- ・ 温度上昇は小さかった（1℃未満）
- ・ PCV水位低下によりD/W圧力が低下。注水再開後にPCV水位上昇でD/W圧力が上昇。真空破壊ラインベローズ（漏えい箇所）が気中露出・再水没した可能性を確認
- ・ 真空破壊ラインベローズからの漏えいが支配的の可能性があったが、それよりも下の箇所からの漏えいもある程度あることを確認（1.5m³/hでもPCV水位低下）



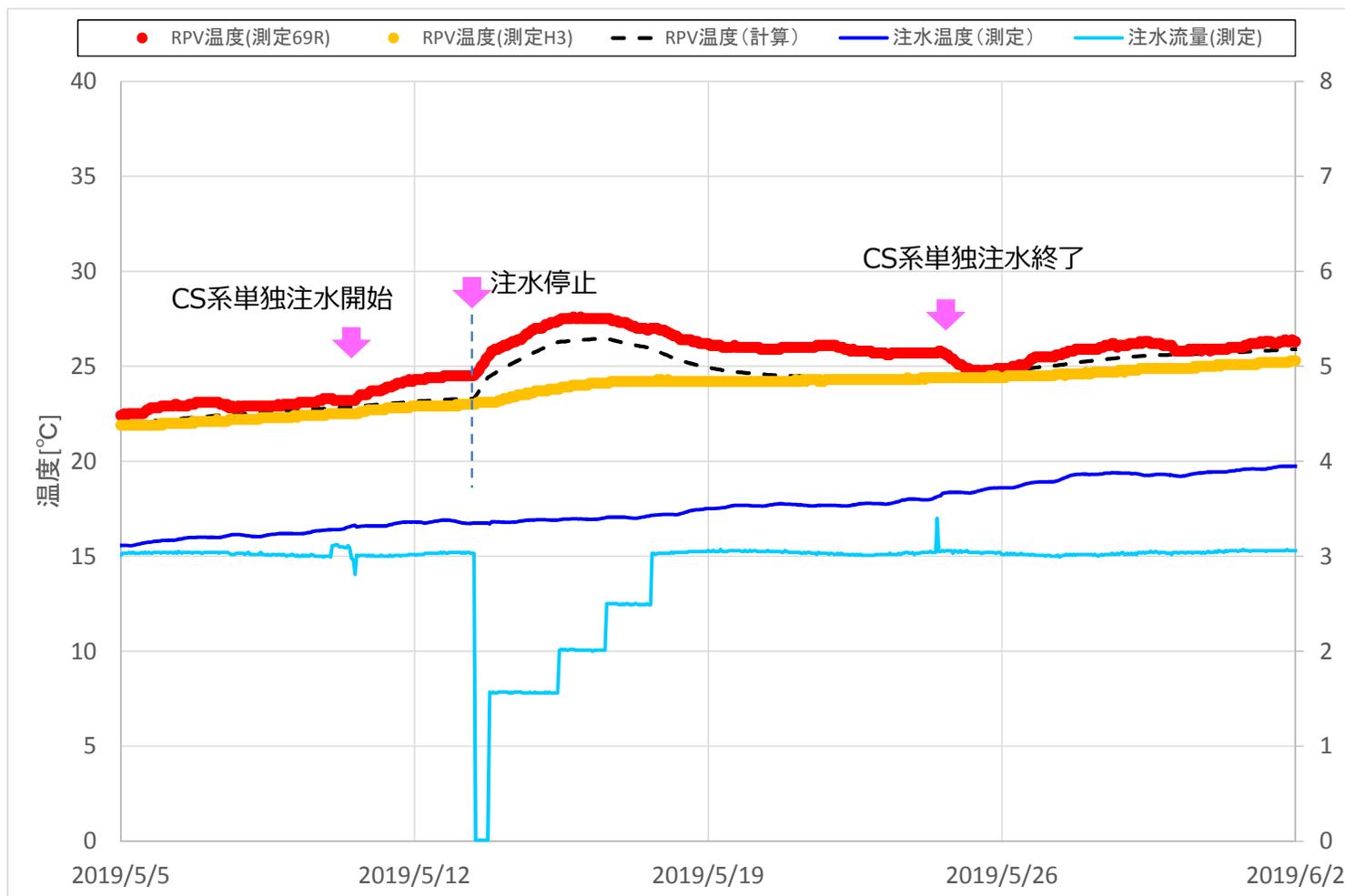
【1号機】次回の注水停止試験

- PCV水位がPCVの新設温度計T1以下となると、得られる情報が少なくなる。注水停止でT1以下に至るかを、ひとつの観点として、試験を計画する。
- 2019年試験実績より、4～5日程度の注水停止で温度計T1に至る可能性。



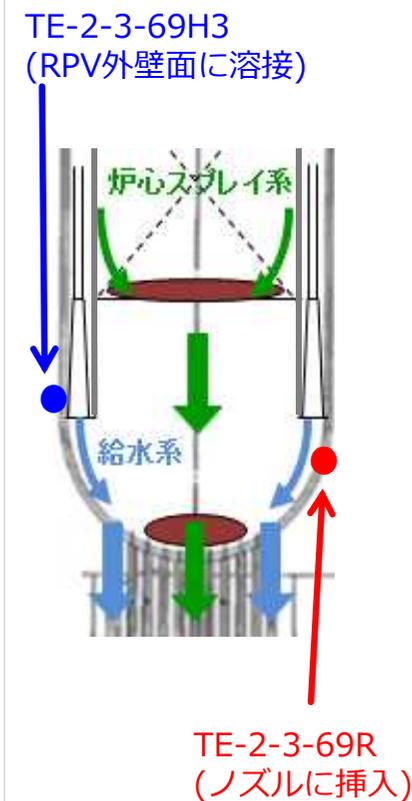
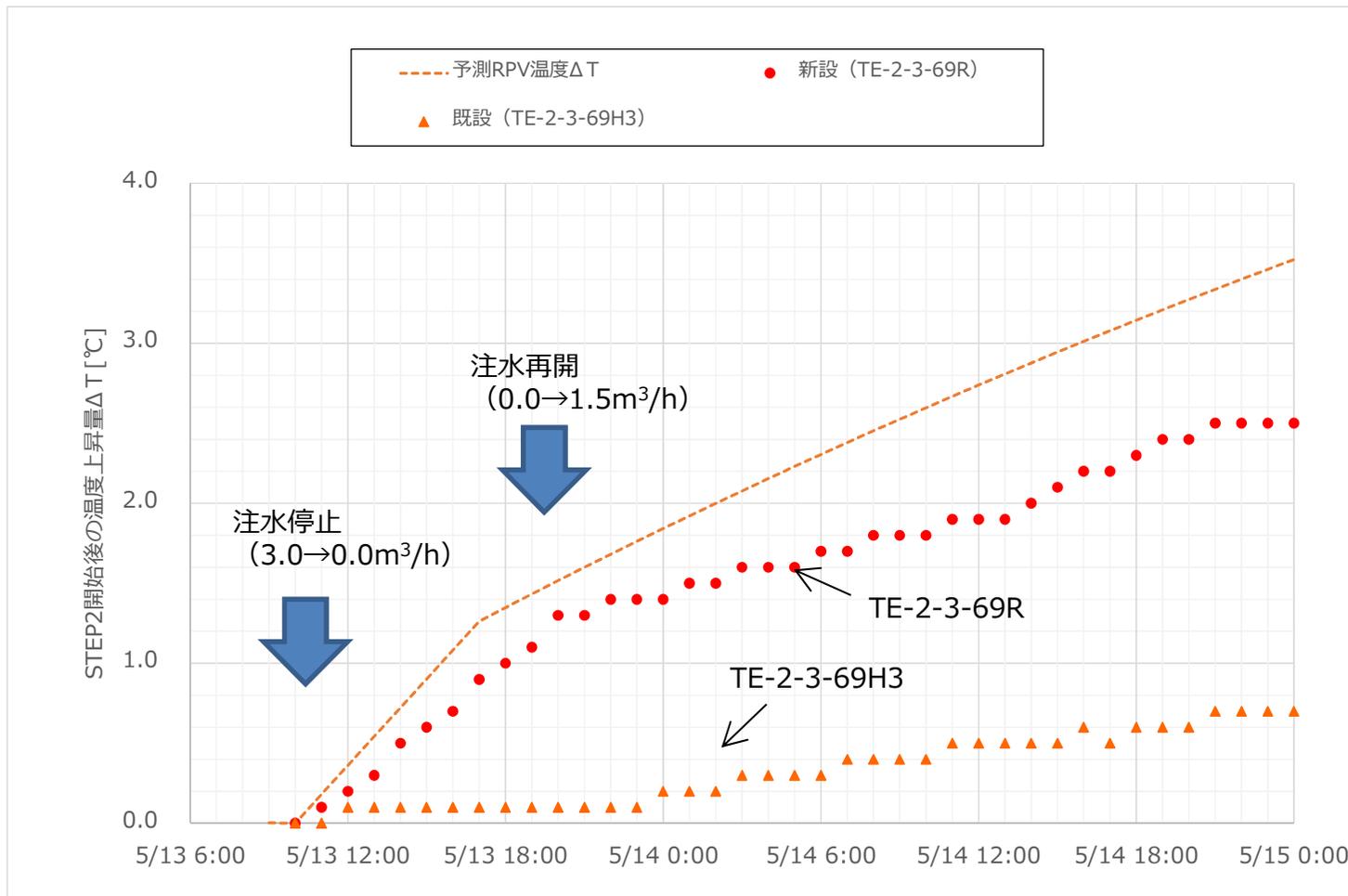
【2号機】2019年度に実施した試験で得られた知見

- 実際の気温や注水温度、崩壊熱等を適用して、試験時のRPV温度を評価。
- 熱バランス評価によって、RPV底部の温度トレンドを概ね再現。TE-2-3-69Rの挙動は良く一致した。



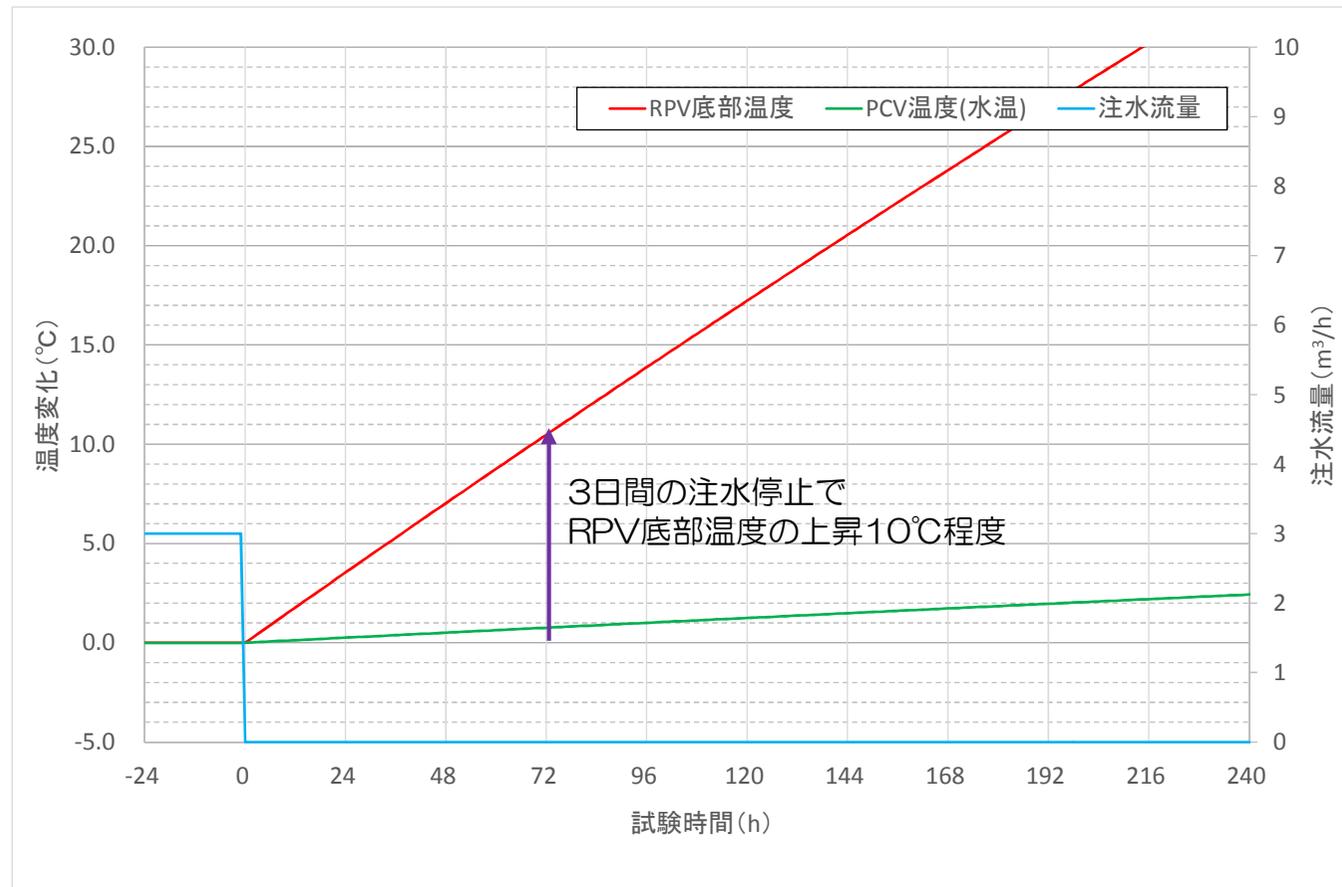
【2号機】RPV底部温度の推移(2019年5月試験)

- 注水停止期間中、RPV底部温度(TE-2-3-69R)は、ほぼ一定で上昇。



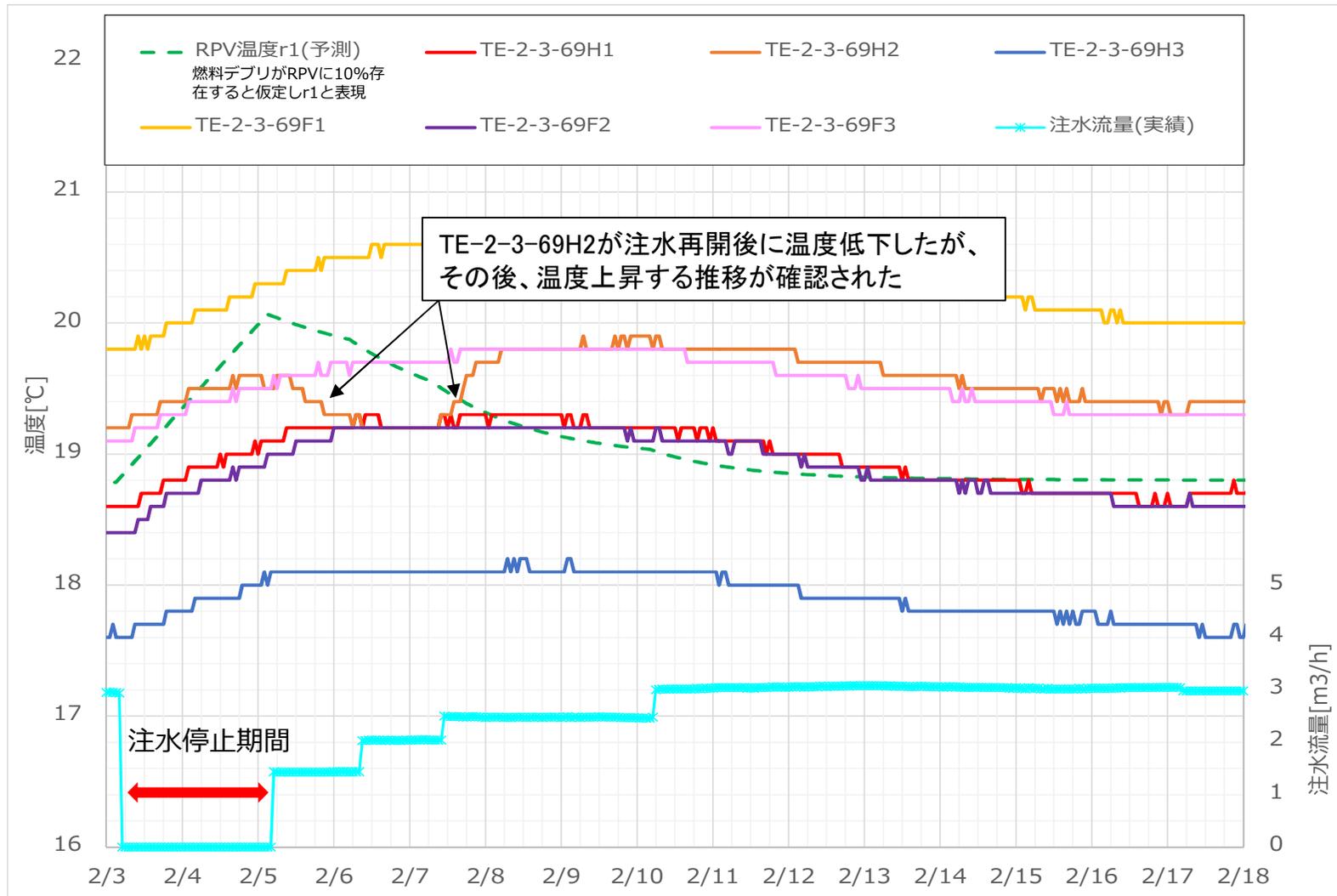
【2号機】次回の注水停止試験

- 2019年度試験よりも長期間の注水停止での温度上昇を確認し、温度評価モデルの検証データを蓄積する。
- 3日間の注水停止で10℃程度の上昇。
- 夏場のRPV底部温度は35℃程度であり、3日間の注水停止で45℃程度と予測。冷温停止以降では55℃程度までの実績があり、その範囲内となる。



【3号機】2019年度に実施した試験で得られた知見①

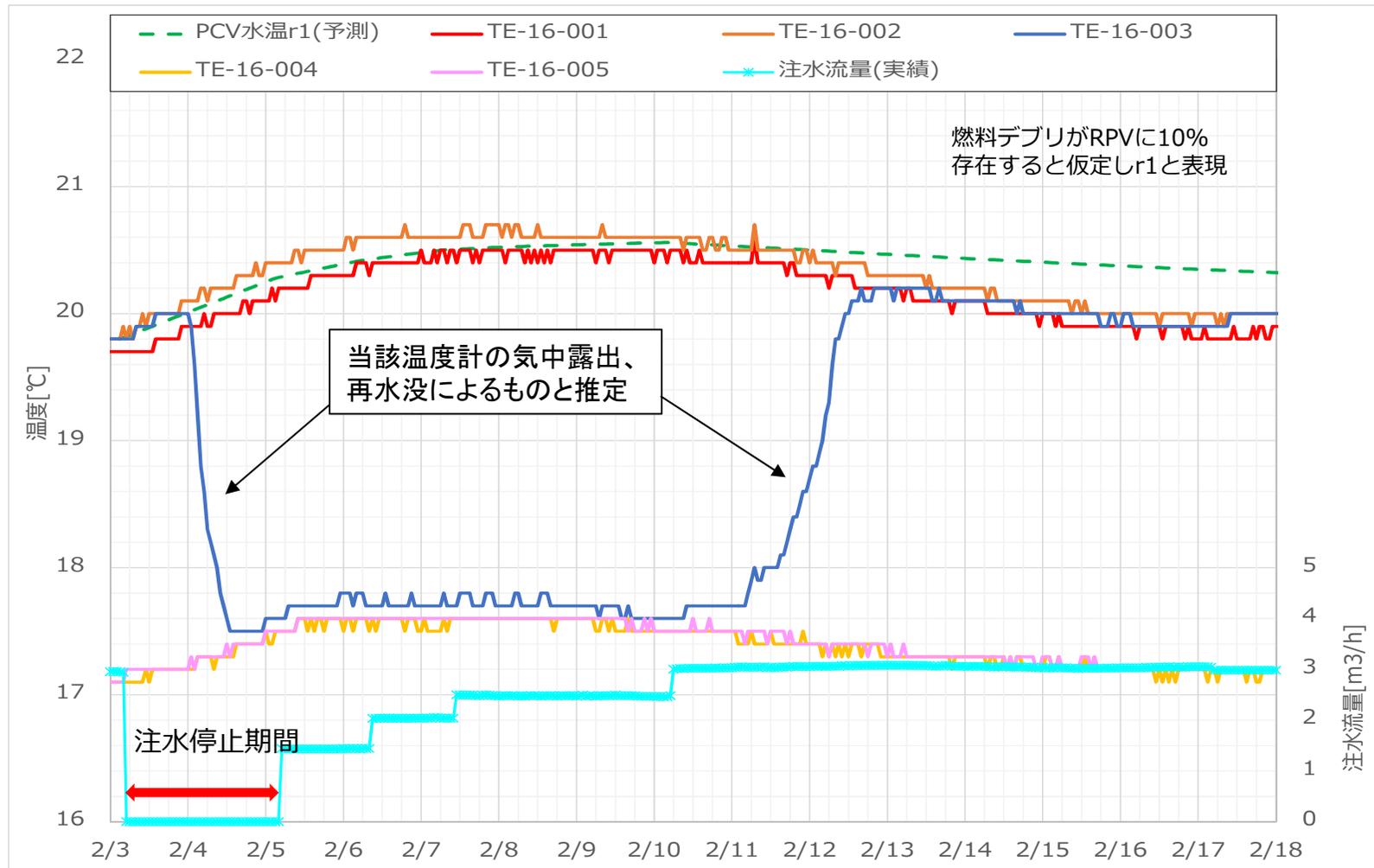
■ R P V底部温度の温度上昇は小さかった



※予測温度は試験開始時の実績温度を基準として記載

【3号機】2019年度に実施した試験で得られた知見②

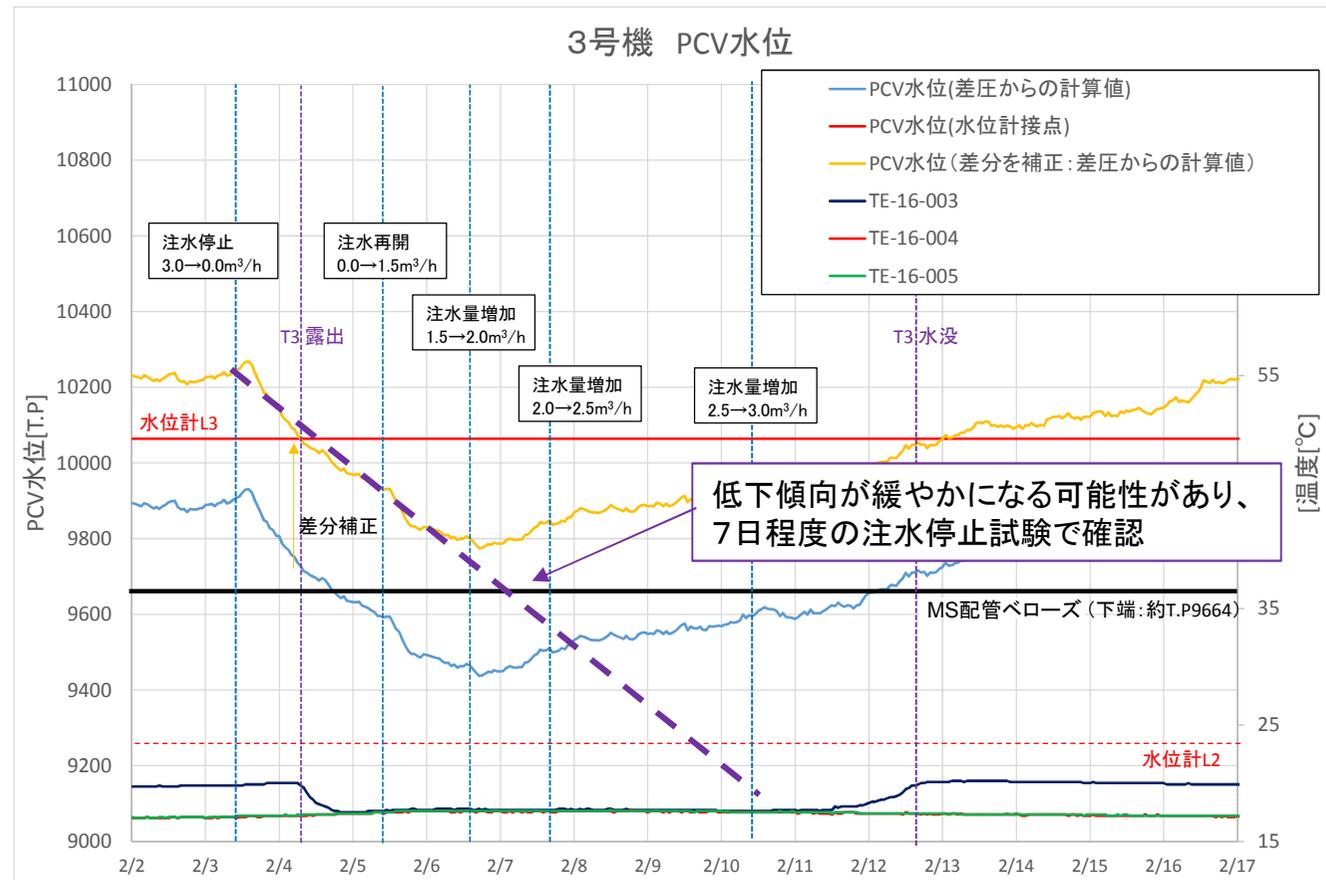
- P C V 温度の温度上昇は小さかった
- P C V の水位低下に伴い、温度計(TE-16-003)が水没から気中露出した

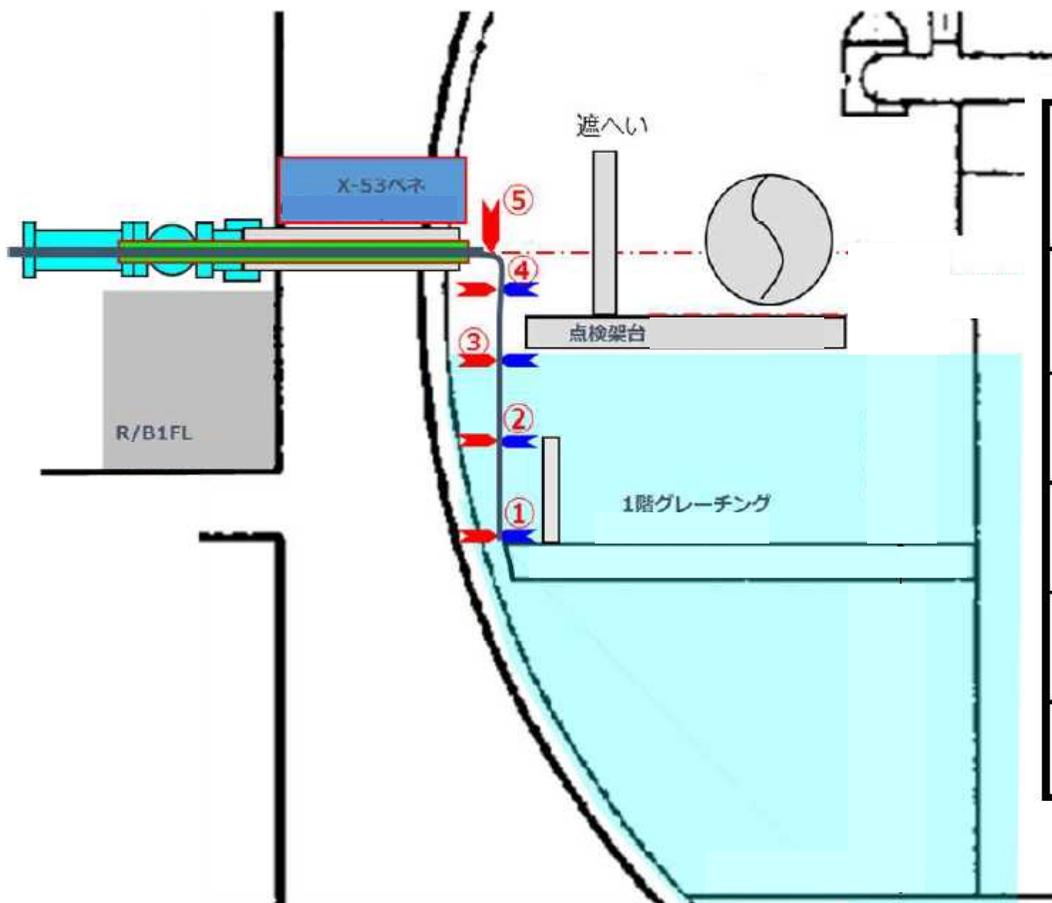


※予測温度は試験開始時の実績温度を基準として記載

【3号機】次回の注水停止試験

- 注水停止によりPCV水位が低下するが、漏えい箇所として確認されているMS配管ベローズよりも低くなるか確認する。
- 2019年度試験のPCV水位低下の状況から、7日間の停止試験を計画する。





| 計器位置 | 設置計器 | | 設置位置 (T.P) |
|------|-----------|-----------|------------|
| | 温度計 | 水位計 | |
| ⑤ | TE-16-005 | — | 約10964 |
| ④ | TE-16-004 | LS-16-004 | 約10714 |
| ③ | TE-16-003 | LS-16-003 | 約10064 |
| ② | TE-16-002 | LS-16-002 | 約9264 |
| ① | TE-16-001 | LS-16-001 | 約8264 |

【まとめ】各号機の次回試験

| | 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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 |

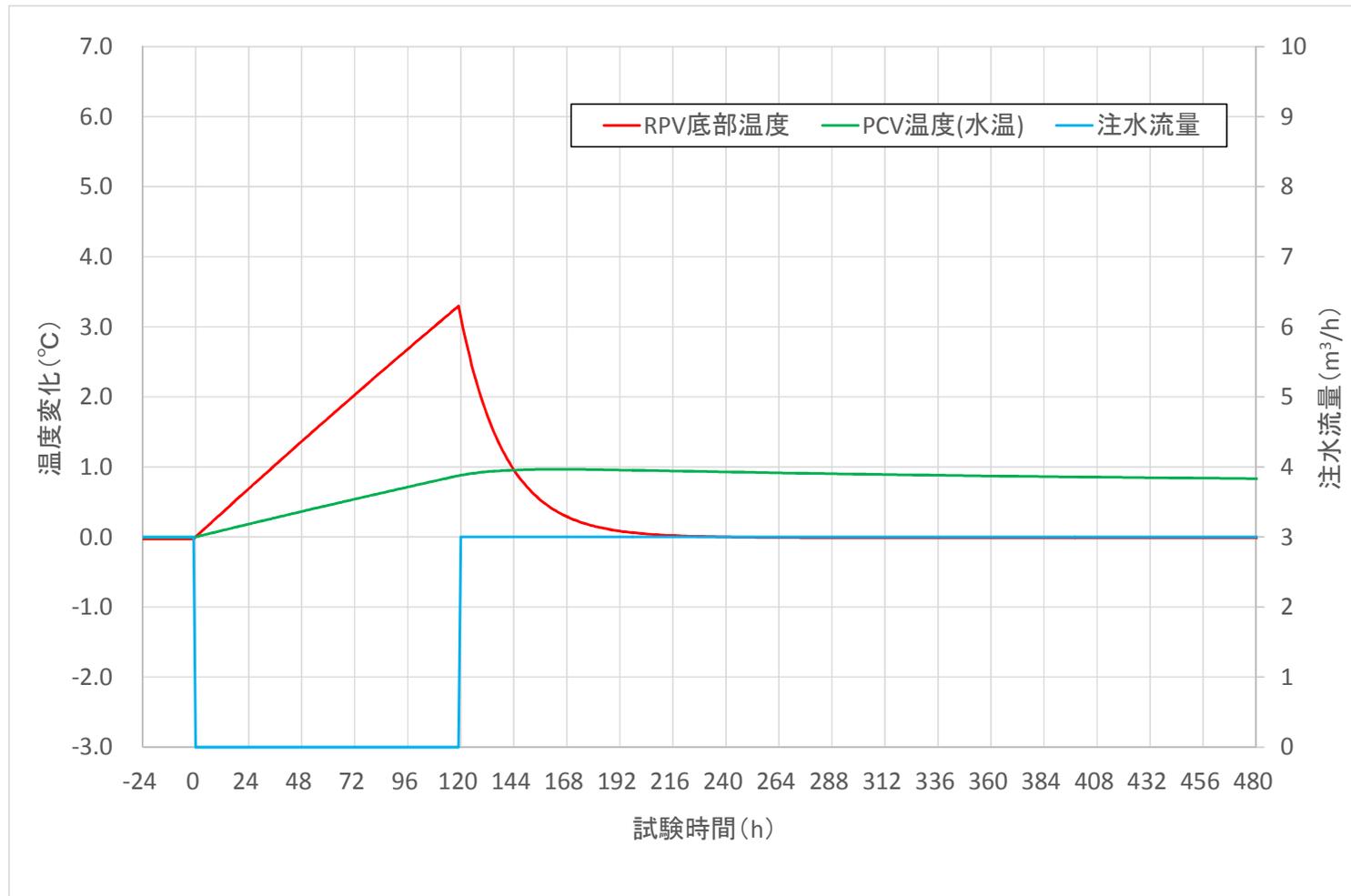
(参考) 試験時期：調整中

| | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 |
|------|---------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------------|----|----|----|
| 試験時期 | 1号機内部調査準備 AWJ作業等 | | 1号機注水停止試験 | 1号機内部調査 (PCV新設温度計・水位計が取り外されているため試験不可) | | | | | |
| | | 2号機注水停止試験 | | 2号機試験的取り出し・内部調査準備 | | (PCV新設温度計・水位計が取り外されているため試験は避けるべき) | | | |
| | | | | | 3号機注水停止試験 | | | | |

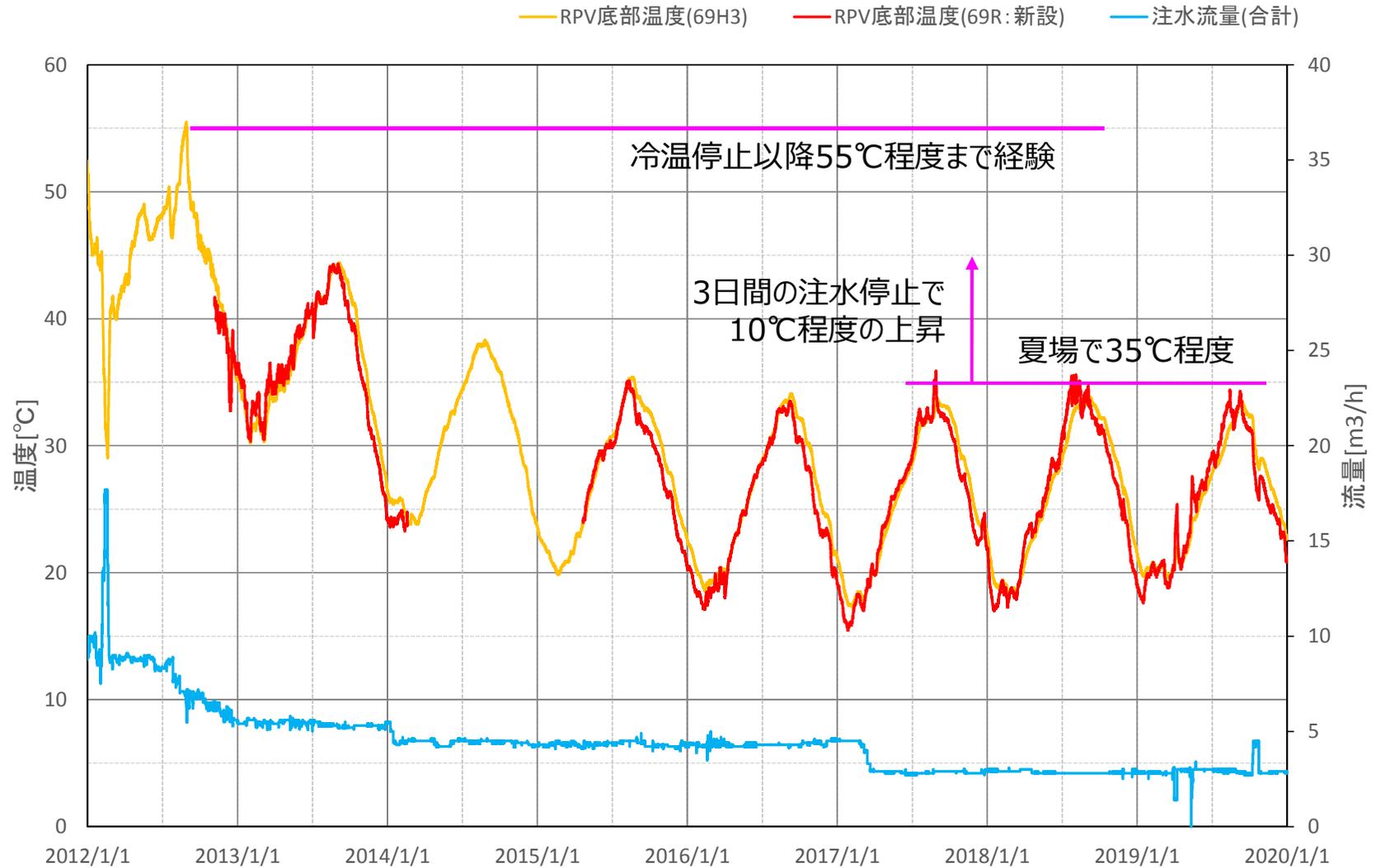
- 2号機の試験を先行して実施（注水停止：8/17～8/20予定）
- 1号機の試験は、内部調査に向けた作業後に実施する計画
- 3号機は今年度中に実施できるように工程を調整していく

(参考) 1号機の注水停止時の温度上昇評価

- 原子炉注水を5日間停止する場合の温度上昇は、PCV温度で1℃程度と評価。
※2019年度の試験実績より、RPV底部温度はPCV温度と同程度の上昇と見込まれる

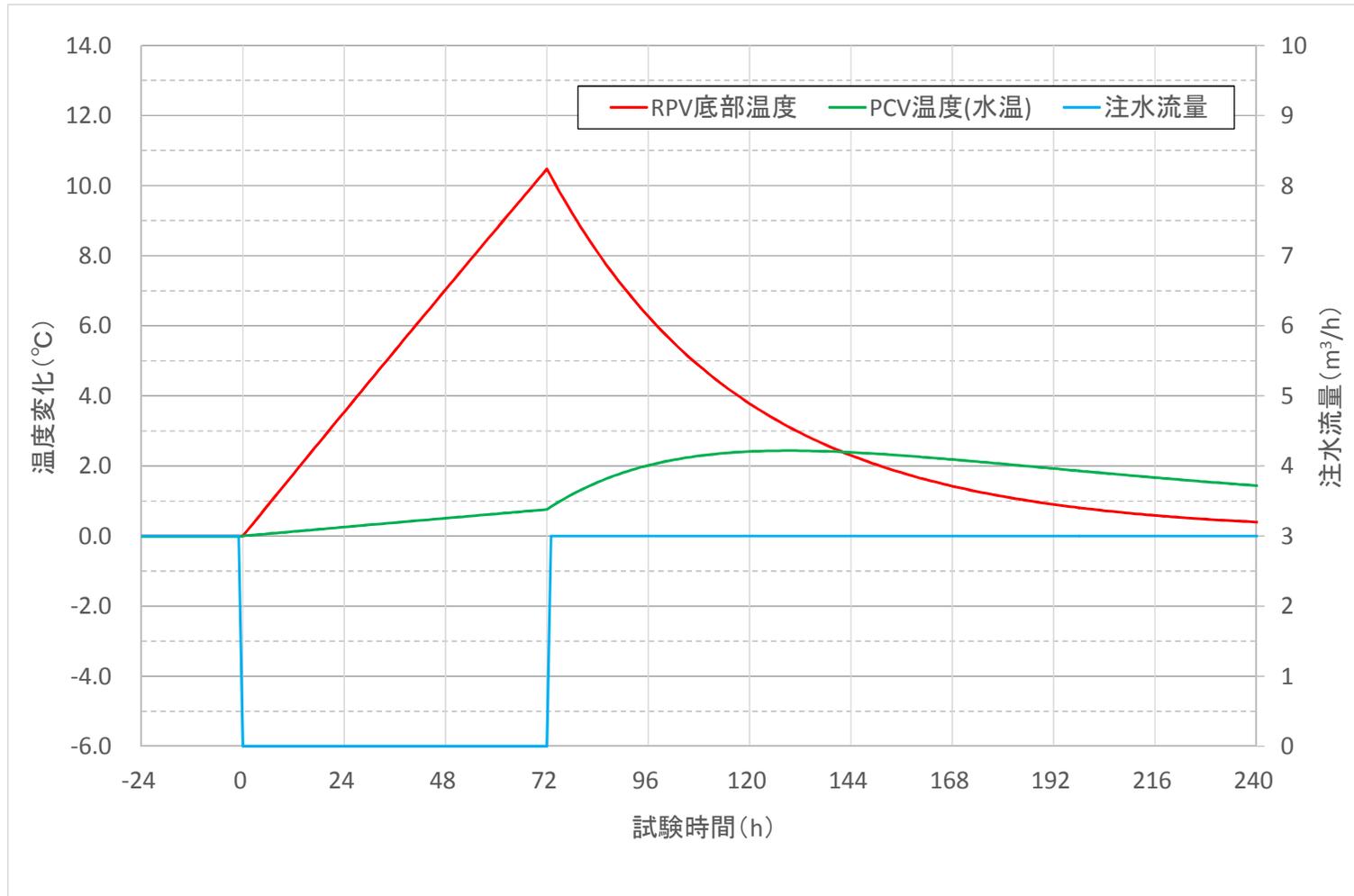


(参考) 2号機のRPV底部温度 長期推移



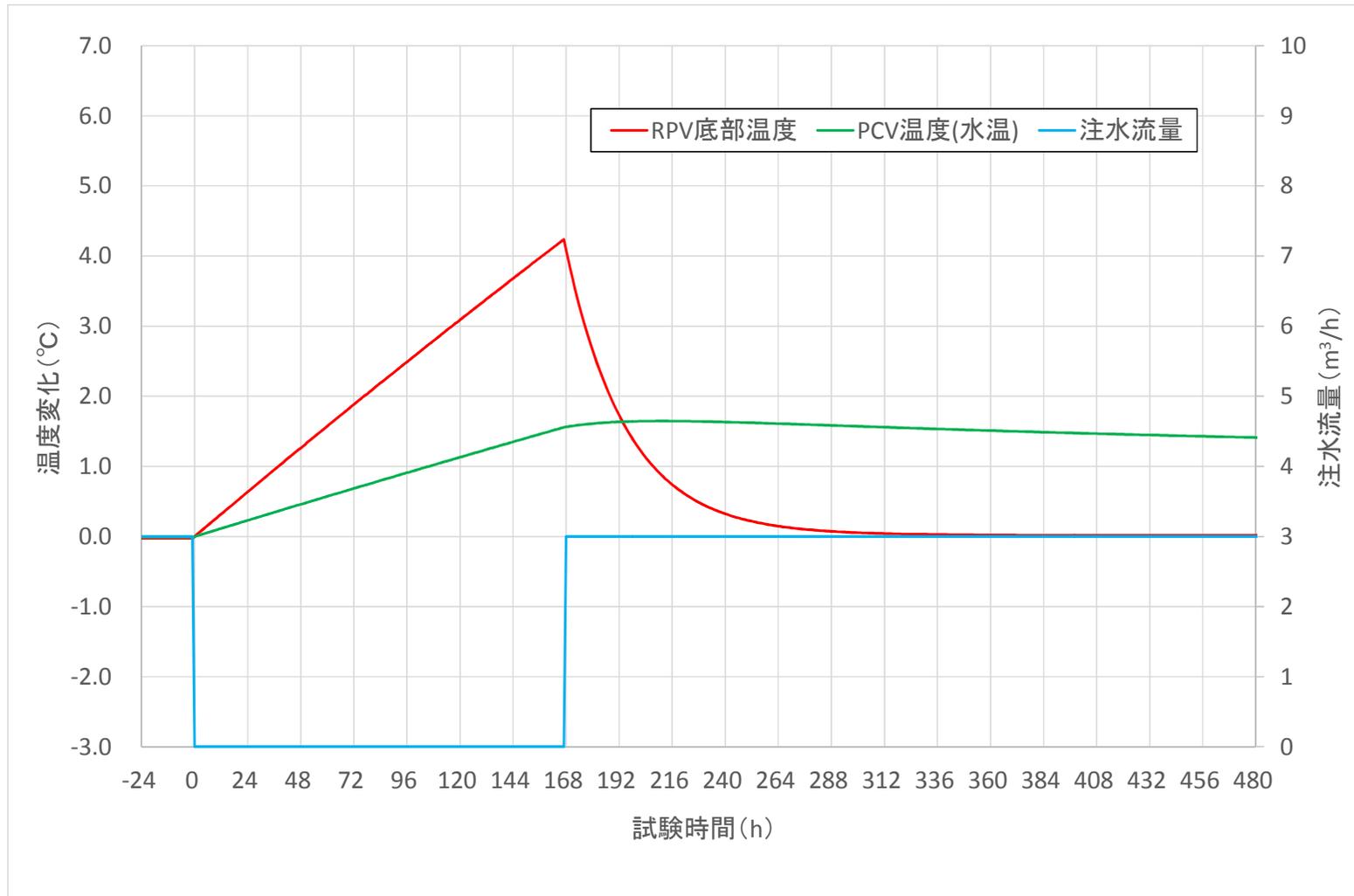
(参考) 2号機の注水停止時の温度上昇評価

- 原子炉注水を3日間停止する場合の温度上昇は、RPV底部で10℃程度、PCV温度で2℃程度と評価。



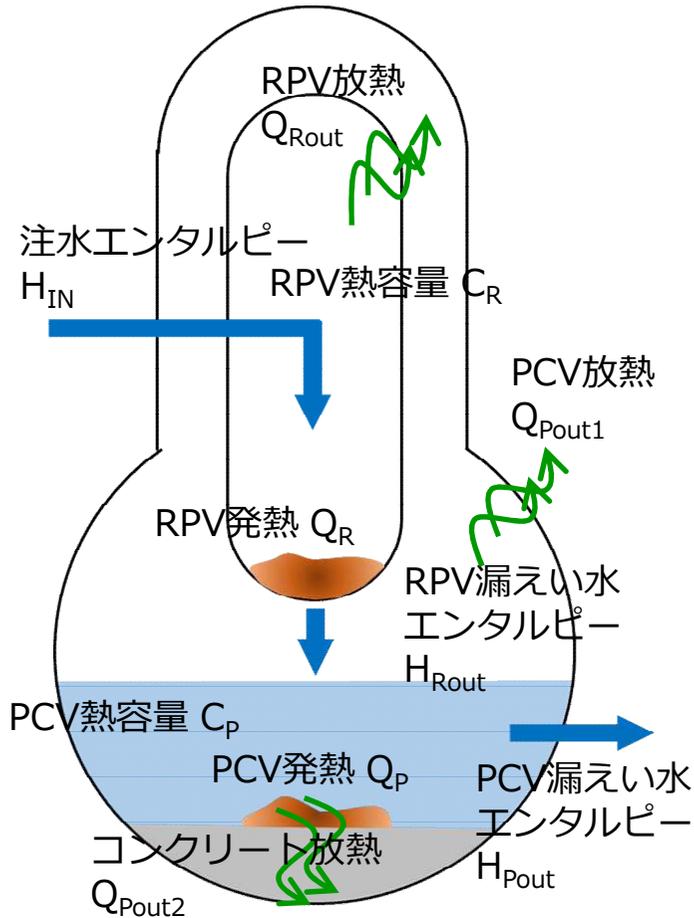
(参考) 3号機の注水停止時の温度上昇評価

- 原子炉注水を7日間停止する場合の温度上昇は、PCV温度で2℃程度と評価。
※2019年度の試験実績よりRPV底部温度はPCV温度と同程度の上昇と見込まれる



(参考) RPV/PCV温度の計算評価 (熱バランス評価)

- 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

$$H_{Rout} + Q_P + Q_{Rout} - Q_{Pout1} - Q_{Pout2} - H_{Pout} - C_P \times \Delta T_P = 0$$

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

(参考) 1～3号機における注水停止試験の手順概要

- 原子炉注水を停止し※1，温度上昇の影響やPCV水位変化を確認。
- CST炉注設備の流量下限や必要注水量を考慮し，3.0m³/hでの注水を再開※2。
 - ・ 1号機で1.5m³/hでPCV水位低下した実績から水位回復には1.5m³/h以上の流量が必要なこと，全体的な現場操作量の低減及び試験期間の短縮を図ることから，注水再開3.0m³/hで計画する。
- 昨年度試験との比較のため，昨年度と同様，1号機はFDW系，2・3号機はCS系の単独注水で試験を実施。



実施計画上の扱い（運転上の制限）

※1 原子炉の冷却に必要な注水量を確保せず，運転上の制限(第18条)を計画的に逸脱することから，第32条第1項を適用。(A)

※2 任意の24時間あたりの注水増加幅を1.0m³/hに制限する運転上の制限(第18条)を計画的に逸脱することから，実施計画第32条第1項を適用。(B)

(A) 原子炉注水の停止

原子炉の冷却に必要な注水量を確保せず、運転上の制限(第18条)を計画的に逸脱することから、第32条第1項の適用が必要。

| | |
|---|---|
|  安全措置(A) | <ul style="list-style-type: none">• 温度監視の強化• 異常な温度上昇に備えた、速やかな注水再開の準備 |
|---|---|

(B) 原子炉注水の再開

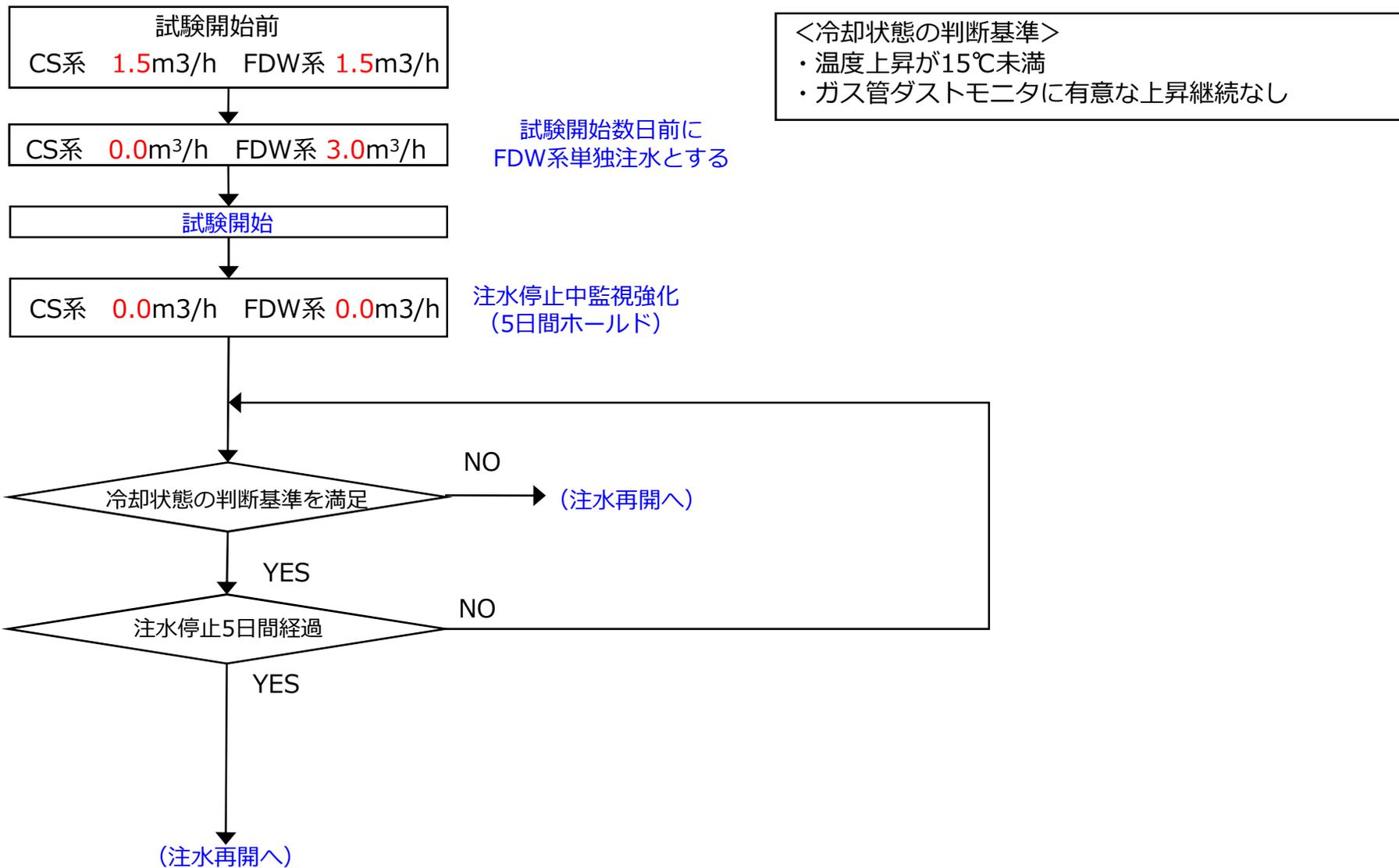
注水再開時に任意の24時間あたりの注水増加幅を1.0m³/hに制限する運転上の制限(第18条)を計画的に逸脱することから、第32条第1項の適用が必要。

| | |
|---|---|
|  安全措置(B) | <ul style="list-style-type: none">• ガス管理設備希ガスモニタによる未臨界の監視• ホウ酸水注入の準備• Xe-135濃度の上昇/検知を確認した場合、注水再開前の状態に戻し、ホウ酸水を注入 |
|---|---|

(参考) 注水停止の影響評価 (温度変化, 未臨界, ダスト)

| 影響評価 | | 影響緩和策 |
|------------|---|---|
| 温度変化 | <ul style="list-style-type: none"> 注水停止に伴う除熱減少により, RPVやPCVの温度が上昇する 熱バランス評価により温度上昇は最大10℃程度と評価しており, 注水停止試験による温度上昇は限定的 | <ul style="list-style-type: none"> 想定外の温度上昇に備え, RPV, PCVの温度変化を慎重に監視。 異常な温度上昇を確認した場合, 速やかな注水再開や注水量増加等の措置を実施。 |
| 再臨界 | <ul style="list-style-type: none"> 注水再開時に1m³/hを超える注水増加を伴うものの, 注水量を現在の状態に戻す操作であり, 未臨界維持に与える影響はない | <ul style="list-style-type: none"> ガス管理設備の希ガスモニタを監視。 Xe-135の濃度の上昇/検知を確認した場合, 注水再開前の状態に戻し, ほう酸水の注入等の措置を実施。 |
| ダスト等の放出量増加 | <ul style="list-style-type: none"> ガス管理設備においてフィルタを通して排気していることや, 湿潤環境が維持されていることにより, 注水停止試験による放出量増加はない | <ul style="list-style-type: none"> ガス管理設備のダストモニタを監視。 異常なダスト上昇を確認した場合, 速やかな注水再開や注水量増加等の措置を実施。 |

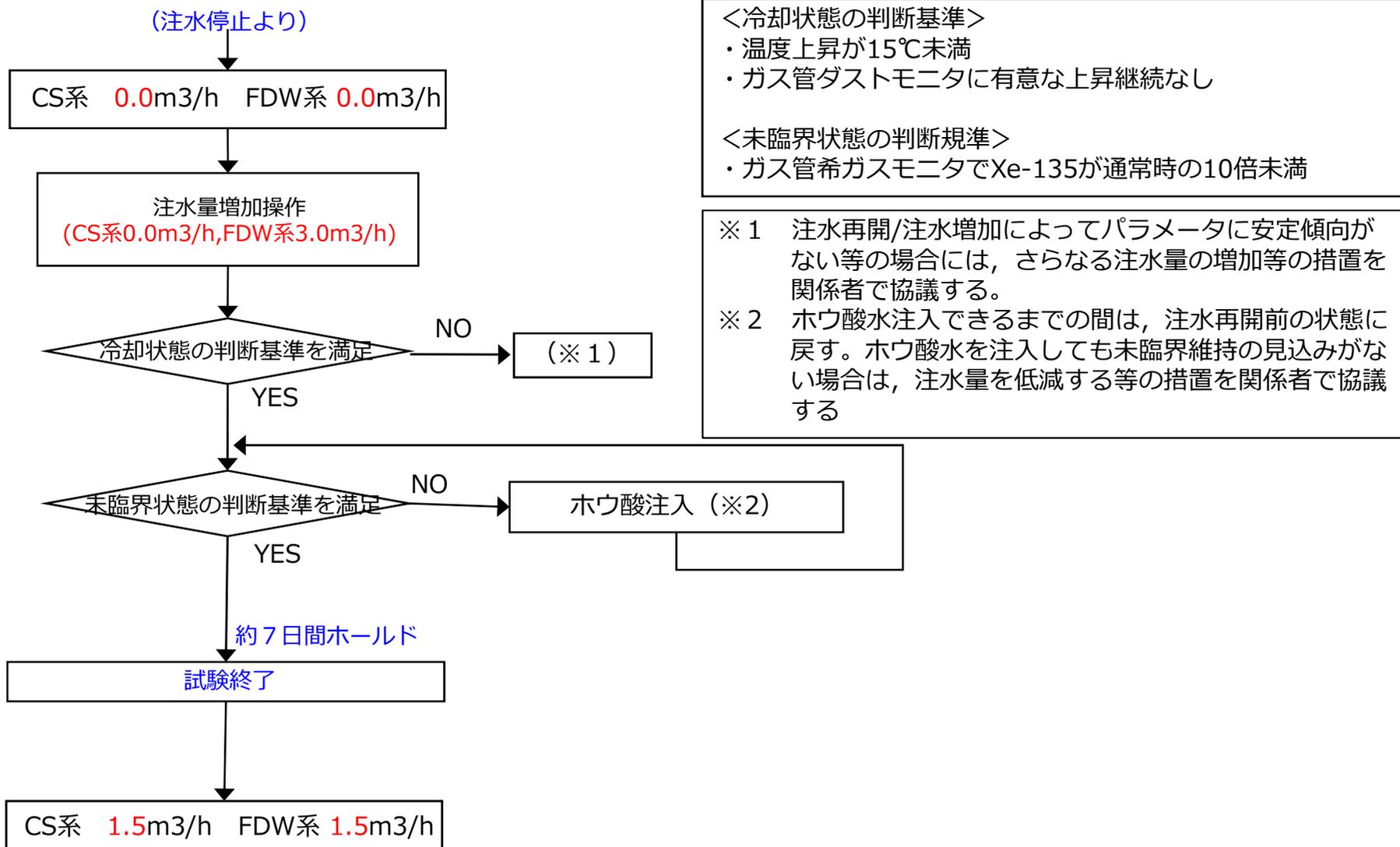
(参考) 注水停止フロー (1号機)



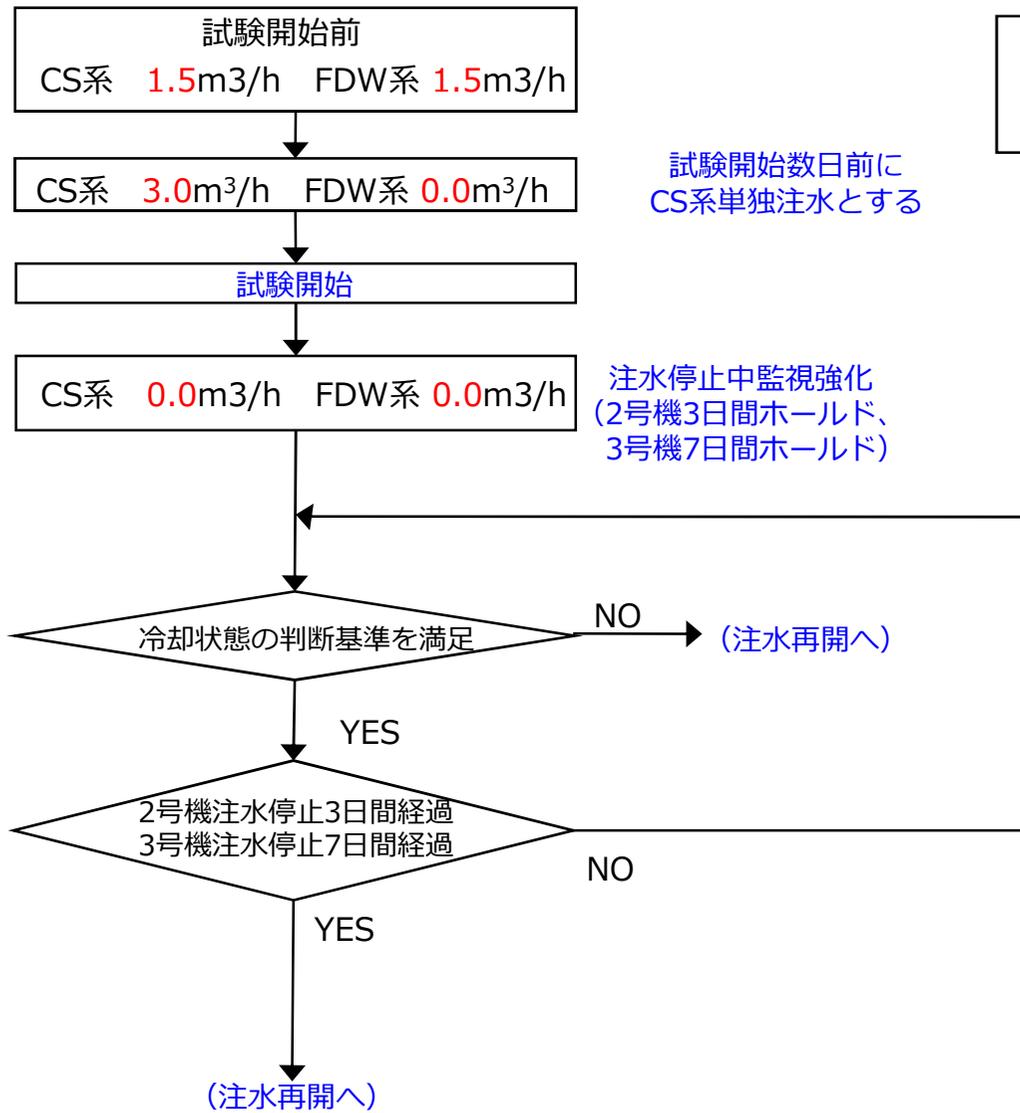
<冷却状態の判断基準>

- ・ 温度上昇が15℃未満
- ・ ガス管ダストモニタに有意な上昇継続なし

(参考) 注水再開フロー (1号機)

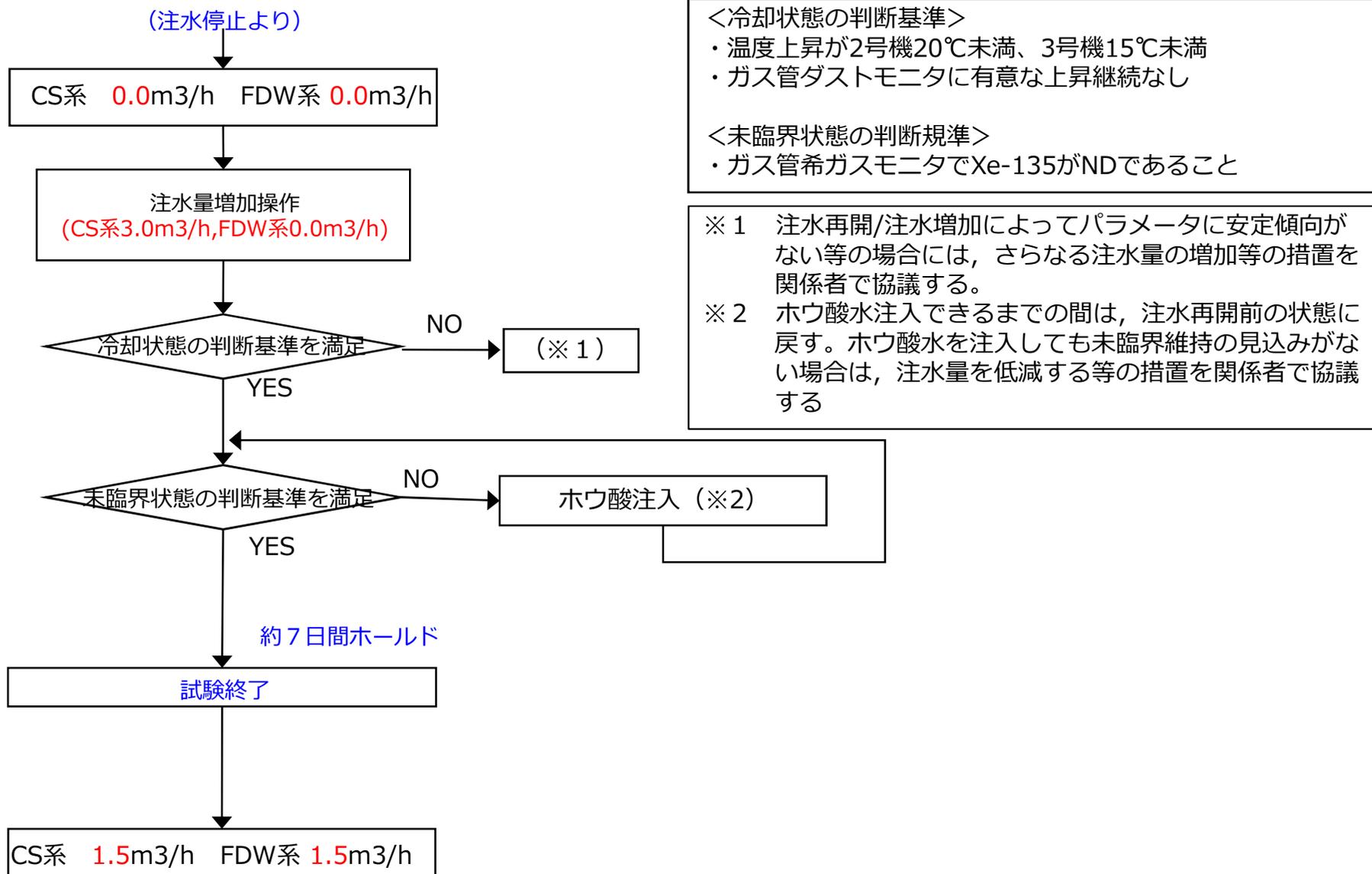


(参考) 注水停止フロー (2・3号機)



<冷却状態の判断基準>
・温度上昇が2号機20℃未満、3号機15℃未満
・ガス管ダストモニタに有意な上昇継続なし

(参考) 注水再開フロー (2・3号機)



(参考) 監視パラメータと判断基準 (注水停止時)

(1) 冷却状態の監視 (注水量停止時)

| 監視パラメータ | 監視頻度 | | 注水停止時の判断基準 |
|----------------------|-------|----------------|--|
| | 注水停止中 | (参考) 通常監視頻度 | |
| 原子炉压力容器底部温度 | 毎時 | 毎時 | 1・3号機：温度上昇が15℃未満 ※1 2号機：温度上昇が20℃未満 ※1 |
| 原子炉格納容器内温度 | 毎時 | 6時間 | 1・3号機：温度上昇が15℃未満 ※1 2号機：温度上昇が20℃未満 ※1 |
| 原子炉への注水量 | 毎時 | 毎時 | 原子炉に注水されていないこと |
| 格納容器ガス管理設備 ダストモニタ | 毎時 | 6時間 | 有意な上昇が継続しないこと |

※1 1・3号機15℃以上、2号機20℃以上の温度上昇があった際には、
流量を3.0m³/hに増やす (注水を再開する)。

(2) その他の傾向監視パラメータ

- ・原子炉压力容器上部温度、格納容器圧力、格納容器内水位

(参考) 監視パラメータと判断基準 (注水再開時)

(1) 冷却状態の監視 (注水量増加時)

- 注水変更操作から24時間の監視強化とし、冷却状態に異常が無い場合には、24時間以降は通常頻度での監視に移行。

| 監視パラメータ | 監視頻度 | | 注水再開時の判断基準 |
|----------------------|---------|--------------------|--|
| | 操作後24時間 | 24時間以降 (通常監視頻度) | |
| 原子炉圧力容器底部温度 | 毎時 | 毎時 | 1・3号機：温度上昇が15℃未満 ※1 2号機：温度上昇が20℃未満 ※1 |
| 原子炉格納容器内温度 | 毎時 | 6時間 | 1・3号機：温度上昇が15℃未満 ※1 2号機：温度上昇が20℃未満 ※1 |
| 原子炉への注水量 | 毎時 | 毎時 | (必要な注水量が確保されていること) |
| 格納容器ガス管理設備 ダストモニタ | 6時間 | 6時間 | 有意な上昇が継続しないこと |

※1 注水変更後、1・3号機10℃以上、2号機15℃以上の温度上昇があった際には、関係者間で情報共有・監視強化を継続する。

(2) 未臨界状態の監視

- 注水変更操作から24時間は速やかにホウ酸水を注入できる体制を維持

| 監視パラメータ | 監視頻度 | | 注水再開時の判断基準 |
|------------------------|---------|--------------------|---------------------------------------|
| | 操作後24時間 | 24時間以降 (通常監視頻度) | |
| 格納容器ガス管理設備 Xe-135濃度 | 毎時 | 毎時 | 1号機：通常値の10倍未満であること 2・3号機：NDであること※2 |

※2 Xe-135の通常値は1号機は $1.0 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$ 程度、2・3号機は検出限界未満(ND)である。運転上の制限である 1Bq/cm^3 に余裕があっても、2系同時に有意に上昇・検知された場合には、確実な未臨界維持のためホウ酸水を注入する。(片系のみ場合は、計器故障の可能性も含めて判断する)

(3) その他の傾向監視パラメータ

- 原子炉圧力容器上部温度、格納容器内水位

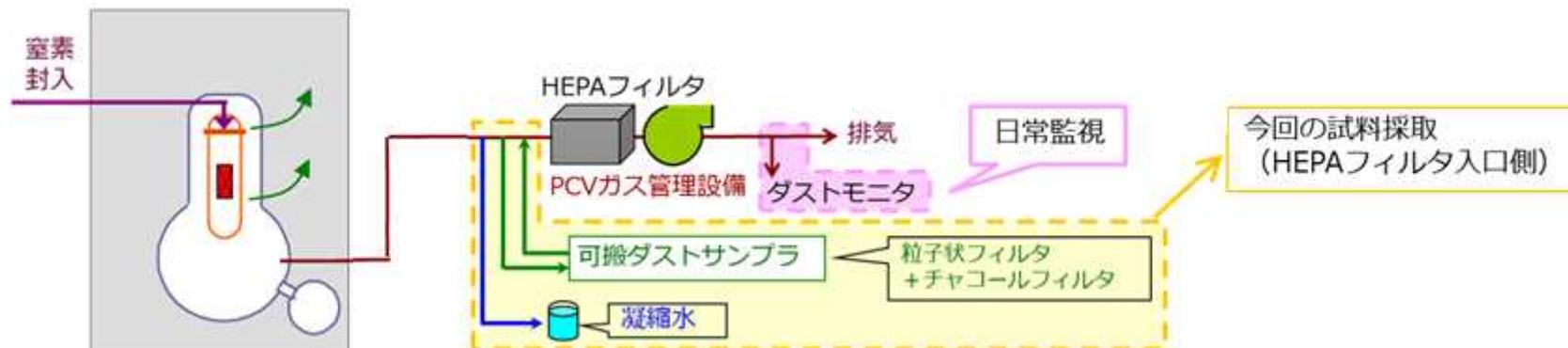
(参考) 監視パラメータ逸脱時の対応

| 監視パラメータ | | 判断基準を満たさない場合の対応 |
|----------|----------------------|--|
| 原子炉への注水量 | | <ul style="list-style-type: none"> 目標注水量を目安に、原子炉注水量を調整する |
| 冷却状態の監視 | 原子炉圧力容器底部温度 | <ul style="list-style-type: none"> 3.0m³/hで原子炉注水を再開する。 注水再開/注水増加によってパラメータに安定傾向がない等の場合には、さらなる注水量の増加等の措置を関係者で協議する。 (温度上昇が急であり、1m³/hを超える注水量の急増が必要と判断される場合にはホウ酸水を注入したうえで、注水量を増加する) |
| | 原子炉格納容器内温度 | |
| | 格納容器ガス管理設備 ダストモニタ | |
| 未臨界状態の監視 | 格納容器ガス管理設備 希ガスモニタ | <ul style="list-style-type: none"> 注水再開前の状態に戻す。 ホウ酸水を注入する。 ホウ酸水を注入しても未臨界維持の見込みがない場合は、注水量を低減する等の措置を関係者で協議する。 |

(参考) その他採取するデータ等

- 原子炉冷却状態や炉内挙動などの評価に資するデータ拡充の観点から、追加的に関連するプラントパラメータの取得と、試料採取・分析を検討中。

| | 追加的に取得する項目 (案) |
|-----------|---|
| プラントパラメータ | [PCVガス管理設備] <ul style="list-style-type: none">• HEPAフィルタユニット表面線量率 |
| 試料採取・分析 | [PCVガス管理設備] <ul style="list-style-type: none">• HEPAフィルタ入口側抽気ガス(フィルタ通過前)のダスト• HEPAフィルタ入口側抽気ガス(フィルタ通過前)の凝縮水 |



(参考) 注水停止試験に伴う、試験号機以外の原子炉注水量

- 昨年度の試験では、システムの圧力上昇防止を目的に注水停止試験号機以外の注水量を増加※（ $3.0\text{m}^3/\text{h}$ から $4.5\text{m}^3/\text{h}$ ）させて、試験を実施していた。

※炉注停止/再開時に、どの程度、CST戻り流量を確保できるか事前確認することができず、系統圧力に与える影響が未知数だったため、予め停止号機の注水流量を他号機に分配することで系統全体の流量を一定に保ち、系統圧力上昇防止を図っていたもの。（ポンプ供給圧力高トリップ防止）

- 2020年3月に実施した、CST炉注系統試験（水源：2号CST）において、系統圧力が最も高くなると想定される運転状態として、1～3号機同時にCST循環運転を行っている。結果として、ポンプ定格流量 $20\text{m}^3/\text{h}$ （合計 $60\text{m}^3/\text{h}$ ）を戻り配管に流すことが可能であること、また、通常運転号機におけるポンプ切替時の2台目追加起動に伴う系統圧力上昇を考慮しても、供給圧力高トリップ値までは余裕があることを確認できたことから、試験号機以外の注水量増加を行う必要がない。

