

福島第一原子力発電所1号機
PCV閉じ込め機能強化に向けた試験の結果について

2024年2月19日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

試験の概要（1）

■ 背景

原子炉格納容器（以降、PCV）については、水の放射線分解により発生する水素や事故時の滞留水素による水素爆発を防止するため、窒素を封入することで不活性状態を維持している。

また、窒素封入には、PCV損傷箇所等からの酸素流入を防止し、PCV内の腐食を抑制する効果もある。

2022年、2023年に実施した1号機PCV内部調査において、原子炉圧力容器（以降、RPV）の土台であるペDESTルに損傷を確認した。

仮にRPV等の傾斜・沈降が生じ、PCV内で放射性ダストの舞上がりが発生したとしても、周辺の公衆に対し著しい放射線被ばくリスクを与えることはないと評価しているが、PCV内の放射性ダストの舞上がりが想定される状況（燃料デブリ取り出し等の廃炉を進める上で必要な作業時（通常時）や地震等を起因とする異常事象時）に対し、以下の対策を検討中。

- ・通常時 : 舞い上がった放射性ダストの放出リスクを抑制するためのPCV給排気流量差管理（窒素封入量 \geq 排気量、又は窒素封入量 $<$ 排気量）
- ・異常事象時 : 地震等により放射性ダストが舞い上がった場合を想定し、異常事象時には窒素封入を停止することにより、放射性ダストの放出リスクを抑制

通常時の対策についてはその実現性を確認するため、また、異常事象時の対策については机上検討を元に先行実施しているがその適正化を図るため、PCV給排気流量の変更(窒素封入量 \geq 排気量、窒素封入量 $<$ 排気量)、及び窒素封入を停止した場合におけるPCVの状態や監視計器等への影響を確認するための試験を11月1日から11月28日にかけて実施しており、その結果を速報する。

試験の概要（2）

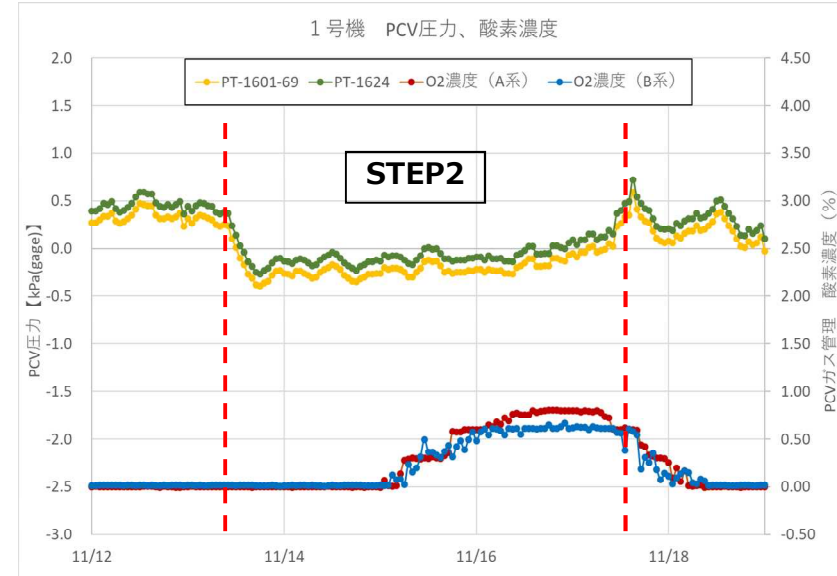
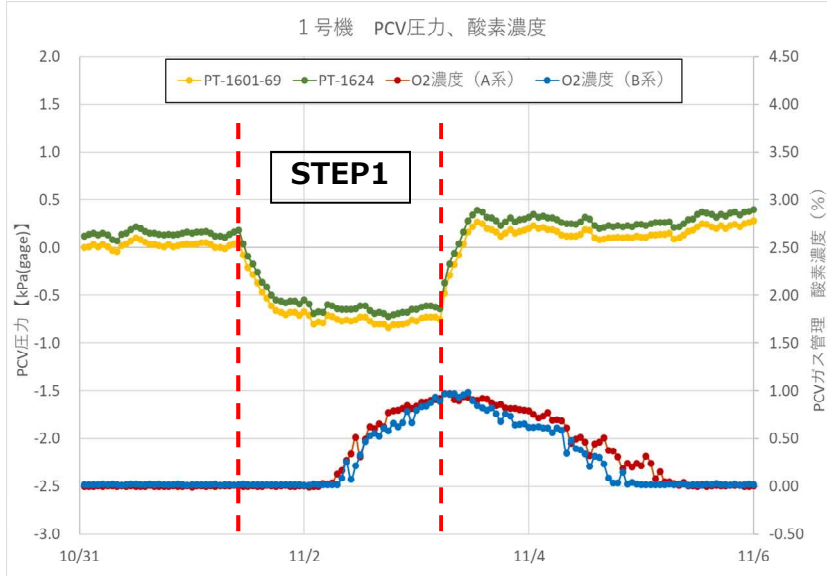
- STEP1：給排気流量が多い状態でPCV給排気流量差を変更（窒素封入量≒排気量、又は窒素封入量<排気量）シプラントパラメータ変化を確認
- STEP2：給排気流量が少ない状態でPCV給排気流量差を変更（窒素封入量≒排気量、又は窒素封入量<排気量）シプラントパラメータ変化を確認
- STEP3：窒素封入を停止した状態でプラントパラメータ変化を確認

STEP	ライン	窒素封入量	合計窒素封入量	排気量	流量差	PCV圧力
通常時	RVH	約16.5Nm ³ /h	約32Nm ³ /h	約18Nm ³ /h	約14Nm ³ /h	約+0.3kPa
	JP	約14.5Nm ³ /h				
	S/C	約1Nm ³ /h				
STEP1	RVH	約9.5Nm ³ /h	約25Nm ³ /h	約23Nm ³ /h	約2Nm ³ /h	約-0.8kPa
	JP	約14.5Nm ³ /h				
	S/C	約1Nm ³ /h				
STEP2	RVH	約8.5Nm ³ /h	約24Nm ³ /h ※STEP1を踏まえPCV圧力を均圧にするため、窒素を増量	約17Nm ³ /h	約7Nm ³ /h	約-0.3kPa
	JP	約14.5Nm ³ /h				
	S/C	約1Nm ³ /h				
STEP3	RVH	0Nm ³ /h	0Nm ³ /h	約18Nm ³ /h	約18Nm ³ /h	約-1.2kPa ※終了時の圧力
	JP	0Nm ³ /h				
	S/C	0Nm ³ /h				

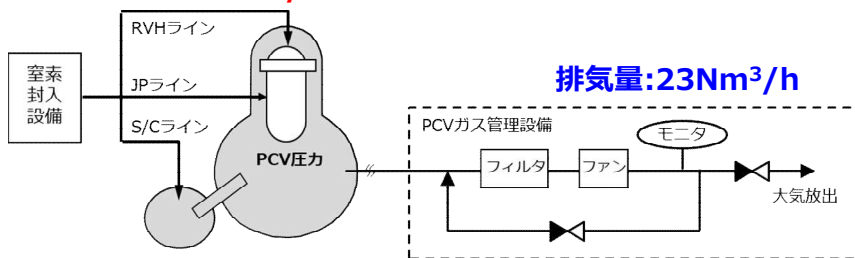
監視パラメータ（1/6）：PCV圧力・酸素濃度



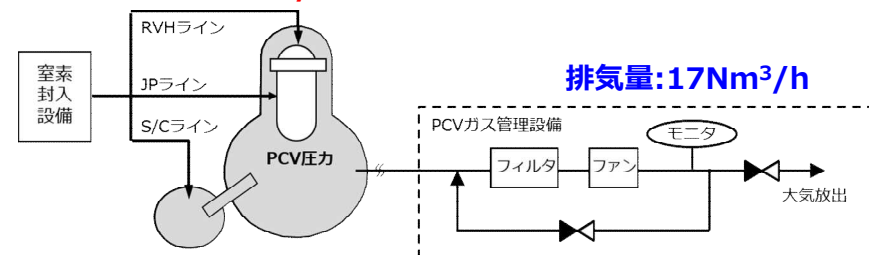
- STEP1 :
 - ✓ PCV均圧に向け、窒素封入量と排気量をほぼ同量に調整したところ、PCV圧力が約-0.8kPa迄低下
 - ✓ 酸素濃度も上昇したことからPCVにインリークがあることを確認
- STEP2 :
 - ✓ PCV均圧に向け、STEP1の結果を踏まえ窒素封入量を調整したものの、PCV圧力が約-0.3kPa迄低下
 - ✓ 酸素濃度は約0.8%で平衡状態になった



窒素封入量: 25Nm³/h



窒素封入量: 24Nm³/h

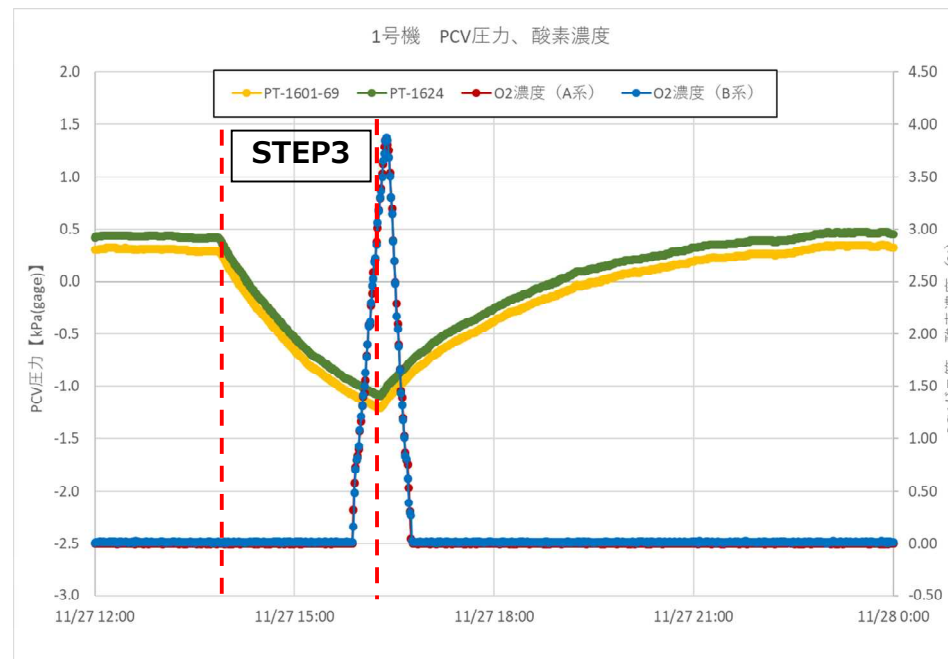


監視パラメータ（2/6）：PCV圧力・酸素濃度

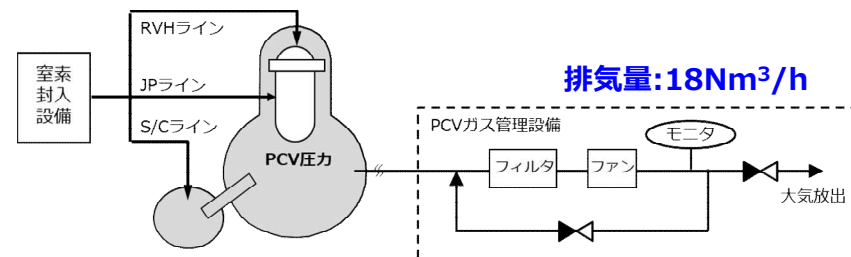


STEP3 :

- ✓ 異常事象時のダスト飛散抑制対策として運用を開始した、AL地震時の窒素封入停止におけるプラントパラメータ挙動を確認
- ✓ PCV圧力は、ほぼ想定通り低下
- ✓ 酸素濃度は試験開始2時間後に上昇を開始した



窒素封入量: 0Nm³/h

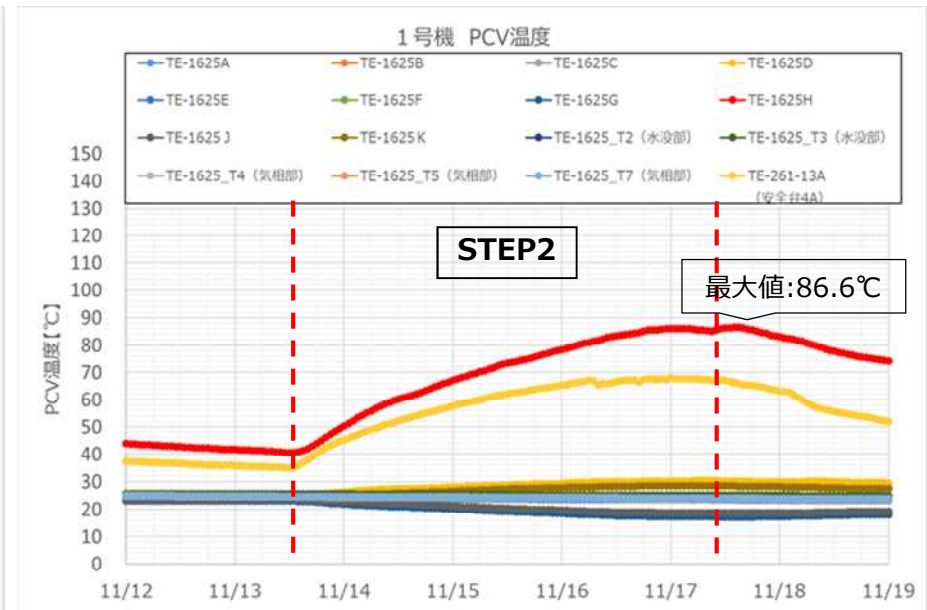
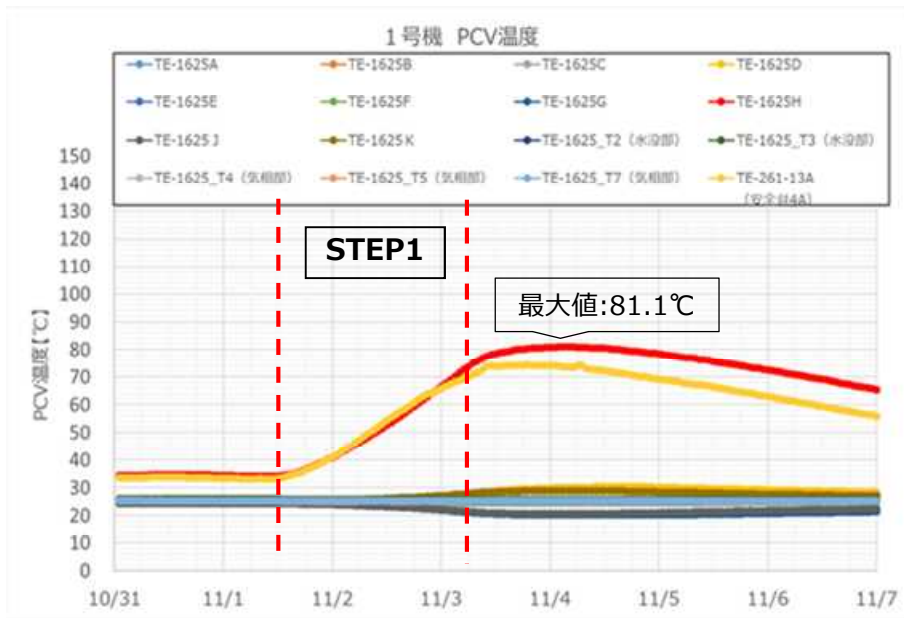


監視パラメータ（3/6）：PCV温度

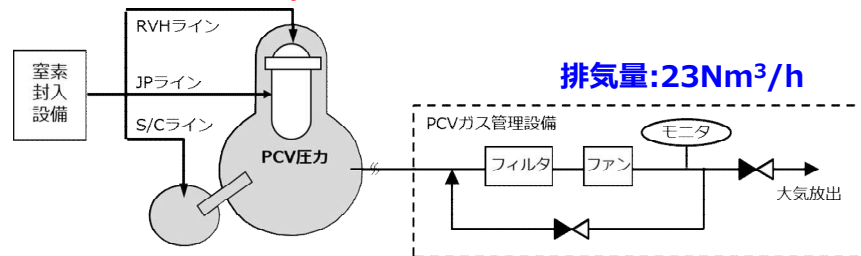


■ STEP1, 2 :

- ✓ 共に同様の变化傾向を示した
- ✓ 一部に大きく温度上昇するものが見られたが、中にはわずかだが温度低下するものもあった
- ✓ 新設温度計※は温度変化していない

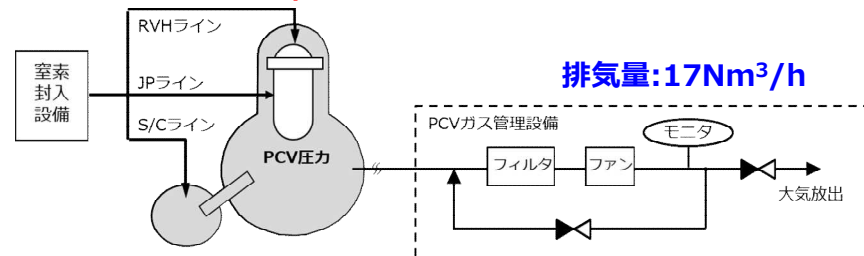


窒素封入量: 25Nm³/h



排気量: 23Nm³/h

窒素封入量: 24Nm³/h



排気量: 17Nm³/h

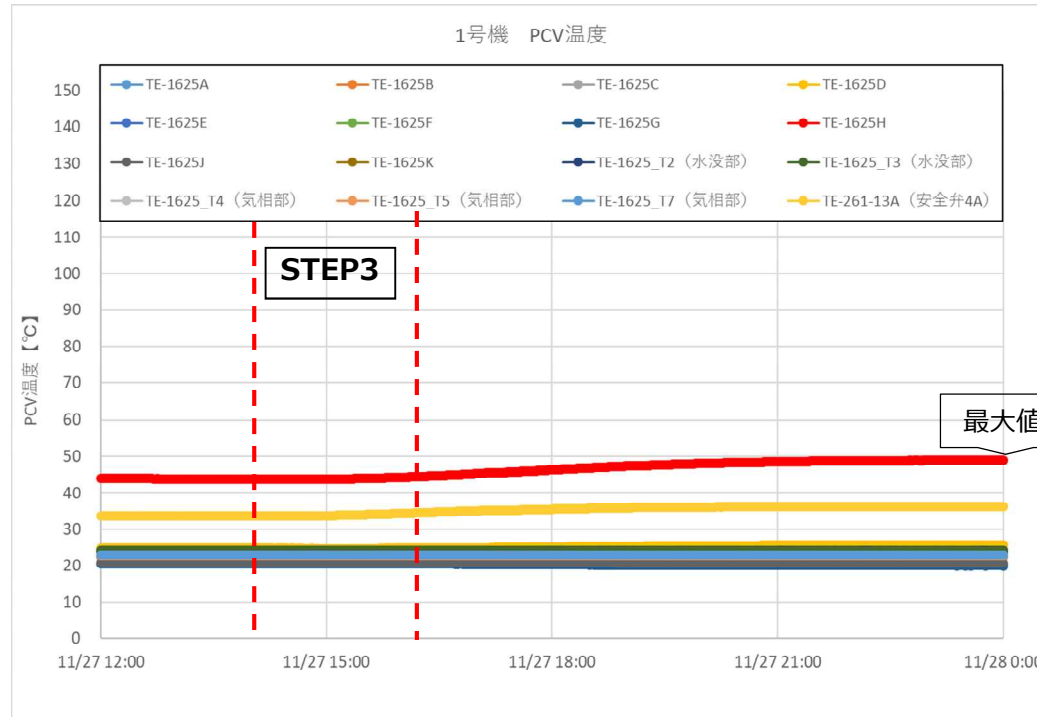
※新設温度計とは、震災後に取り付けた吊り下げ式のPCV温度計のこと

監視パラメータ（4/6）：PCV温度

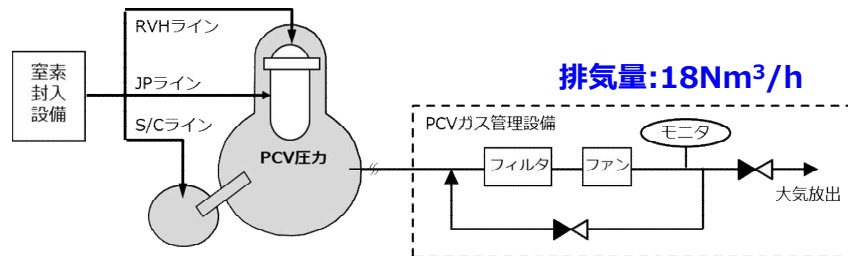


STEP3 :

- ✓ STEP1,2に比べ緩やかに上昇し、試験終了後約8時間上昇を継続
- ✓ 新設温度計※は温度変化していない



窒素封入量:0Nm³/h



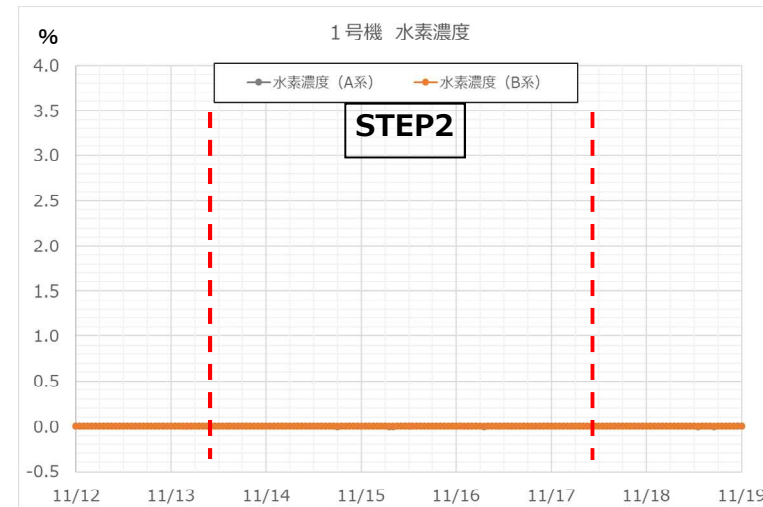
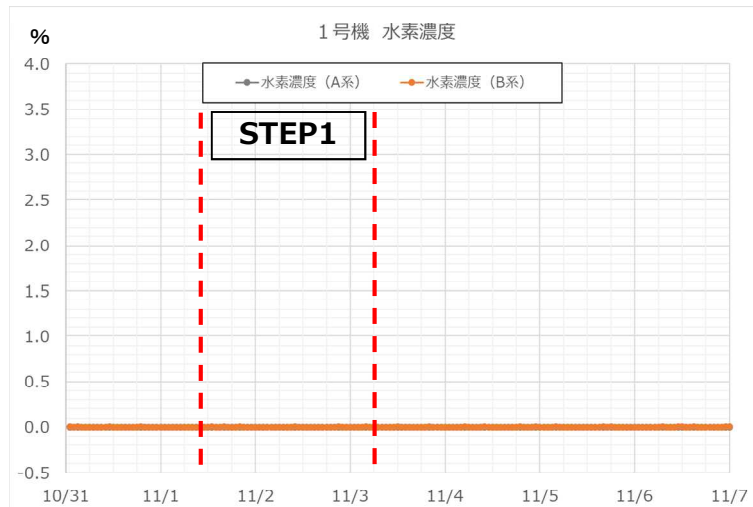
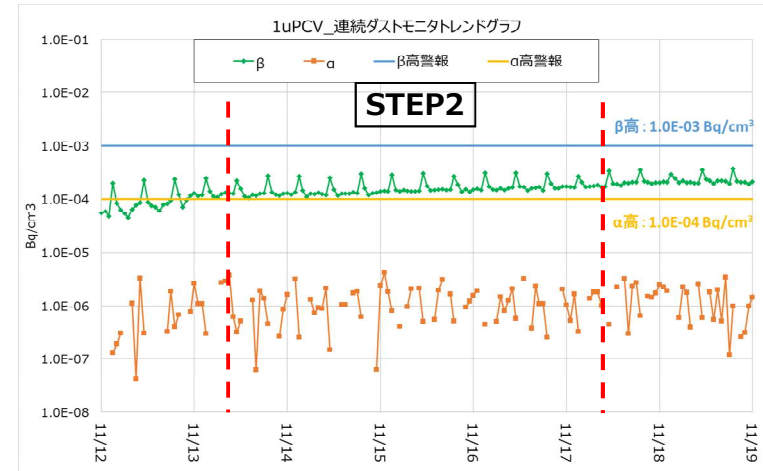
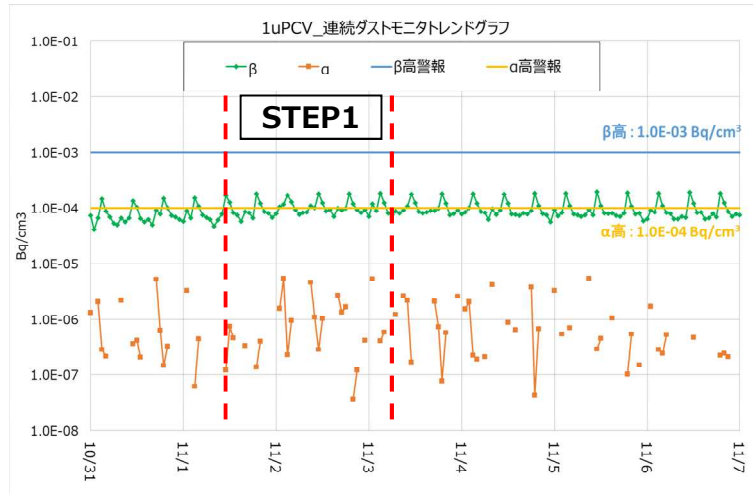
※新設温度計とは、震災後に取り付けた吊り下げ式のPCV温度計のこと

監視パラメータ（5/6）：放射能濃度/水素濃度



STEP1,2 :

- ✓ 共に仮設ダストモニタの放射能濃度は試験に伴う有意な変化は確認できなかった
- ✓ 共に水素濃度は変化していない

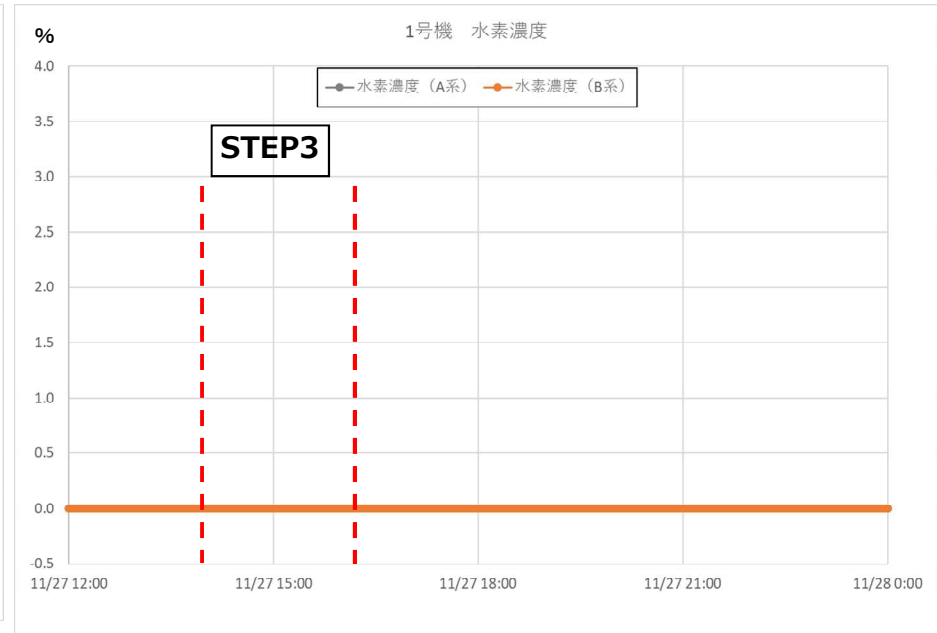
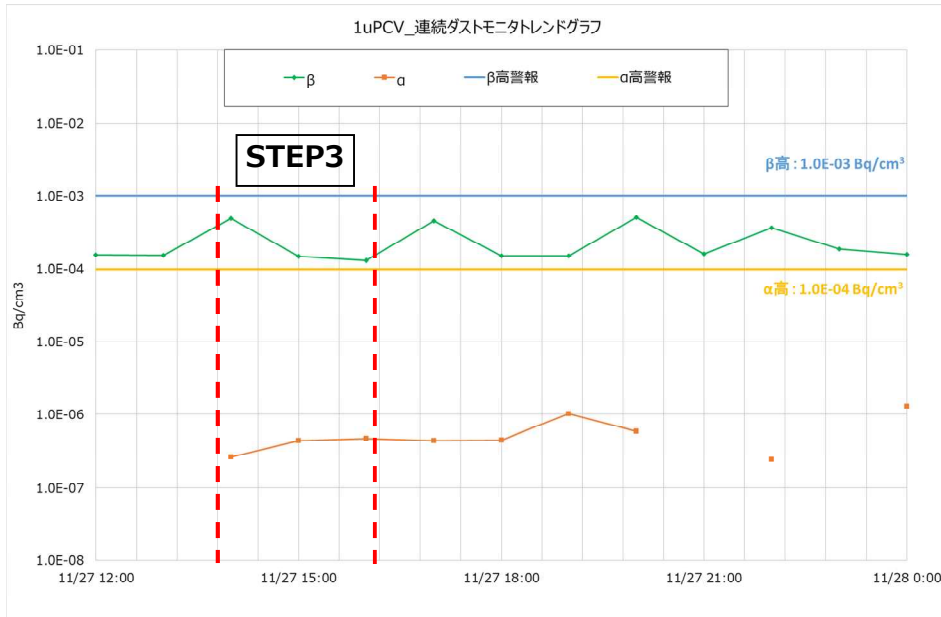


監視パラメータ（6/6）：放射能濃度/水素濃度



STEP3 :

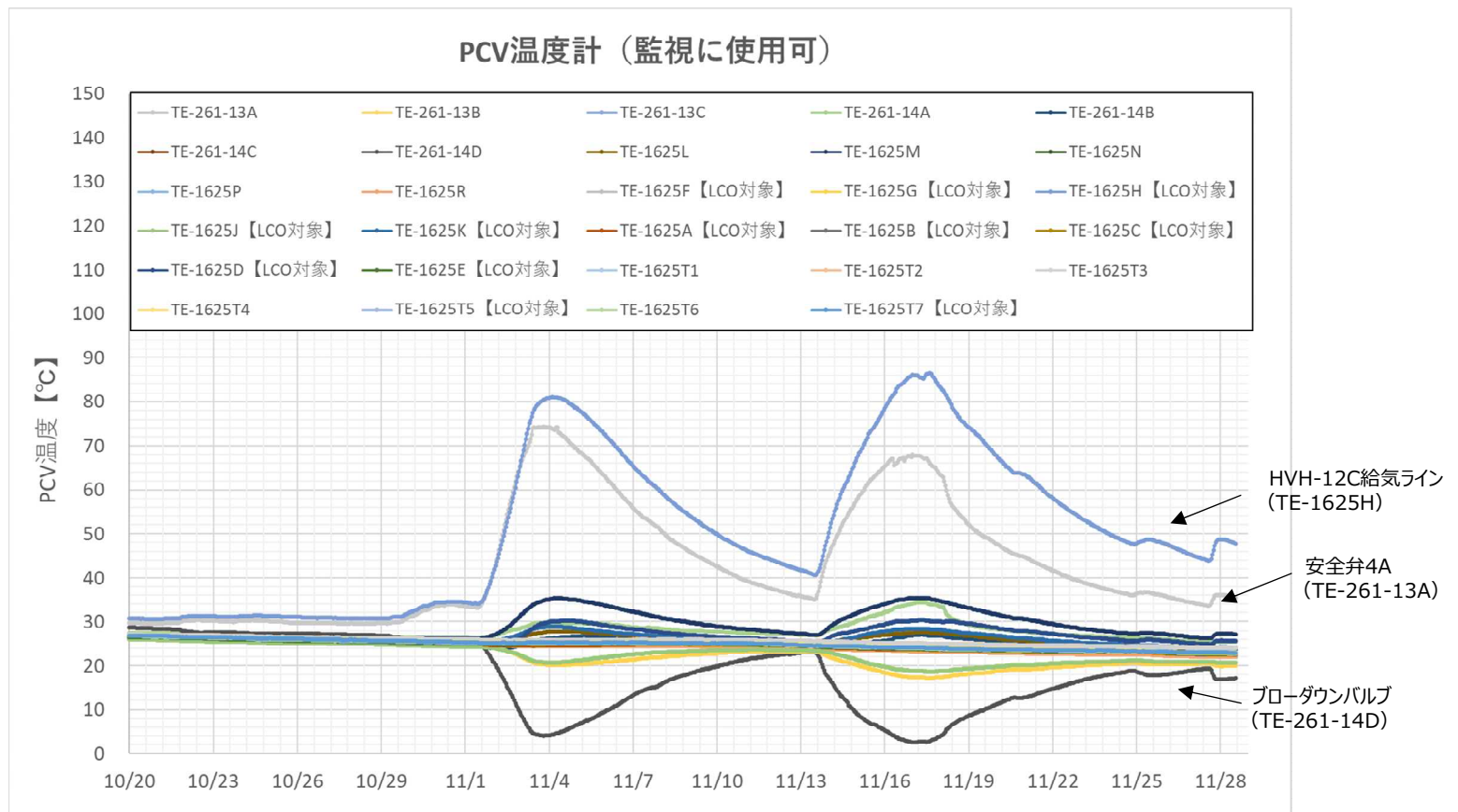
- ✓ 仮設ダストモニタの放射能濃度は試験に伴う有意な変化は確認できなかった
- ✓ 水素濃度は変化していない



監視パラメータ以外のPCV/RPV温度（1/2）



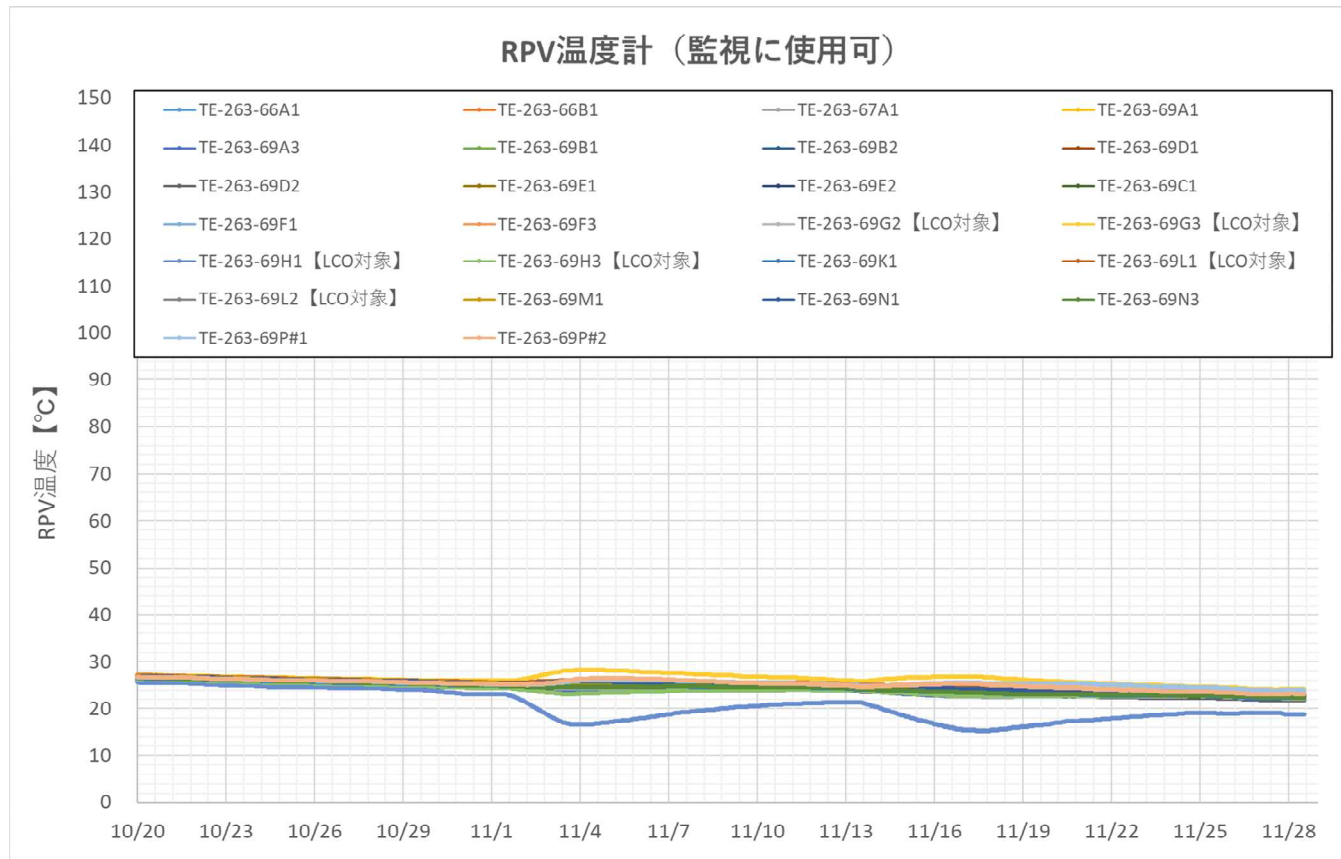
- PCV温度計の挙動を以下に示す
 - ✓ 今回監視対象としなかった温度計についてもトレンドを確認
 - ✓ 中には大きく温度低下している温度計も確認されている



監視パラメータ以外のPCV/RPV温度（2/2）



- RPV温度計の挙動を以下に示す
 - ✓ PCV温度に比べて変化は小さいものの、一部温度低下しているものなどが確認されている

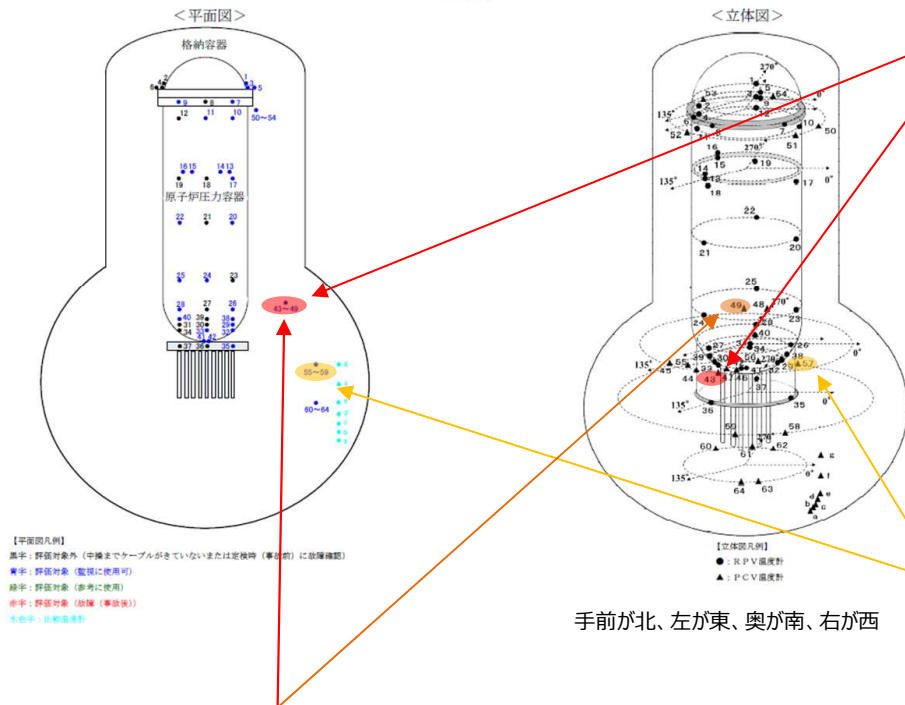


【参考】PCV/RPV温度計の配置



RPV/PCV温度計配置図

1号機



①安全弁4A（TE-261-13A） **温度上昇**
設置高さ：TP15214付近
設置方位：北北東

②HVH12C供給ライン（TE-1625H） **温度上昇**
設置高さ：TP12564付近
設置方位：南南西

③ブローダウンバルブ（TE-261-14D） **温度低下**
設置高さ：TP15614付近
設置方位：南東

試験の結果



■ 今回の試験結果から確認されたこと

- ✓ PCV給排気流量の変更を行うことでPCVが負圧になることを確認
- ✓ 窒素封入量に対し排気量が少ない状態においてもPCV圧力が負圧になる
- ✓ 給排気流量バランスを変更すると、一部のPCV/RPV温度計の指示値が変化し、その中で局所的に上昇率が大きいものがある
- ✓ 窒素封入停止時においては、酸素濃度の上昇が顕著

■ 試験結果を踏まえた今後の対応についての考察

- ✓ 現状の1号機のプラント状態であれば、PCVを負圧にするための大容量設備は不要
- ✓ 一方、PCV圧力は、給排気流量バランス以外の要素（季節による環境条件の違い、PCV水位変化による開口部の気相露出を含む）にも依存する可能性
- ✓ 局所的に水冷の効果が小さく、空冷の効果が大きい可能性。空冷でPCV内全体の冷却が可能なのか、冷却方法の選択肢を増やす余地の有無を確認していく必要もある（参考4参照）
- ✓ 放射性物質の拡散を抑制するため、窒素封入量は少ないほうが良いが、水素滞留、酸素濃度上昇を抑制するため、通常時は少量の窒素封入による不活性化、掃気は必要
- ✓ 異常確認時には放射性物質の拡散抑制のため窒素封入を停止する運用としているが、給排気流量バランスの制御能力向上により大気流入量抑制も可能とする方策を検討する余地がある
- ✓ 中長期的な炉内環境の管理（不活性雰囲気を維持しつつ放射性物質の拡散を抑制する管理）の観点では、均圧（給排気流量が均等）のほうが管理がしやすい可能性
- ✓ PCVの状態は1、2、3号機で異なるため、プラント毎に試験が必要

<今後の試験の実施時期> 1号機/3号機：PCV水位低下後

2号機：内部調査・試験的取り出しを優先し、関連作業がない時期

【参考】試験実績



試験ステップ	目的	窒素封入量と排気量										
		試験予定日	-	11/1~	-	11/3~	11/13~	-	-	11/17~	11/27	-
試験前	通常の運転状態			窒素封入量：32Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h								
1 (1)	窒素封入量の減少 排気量増加による 影響確認			窒素封入量：25Nm ³ /h 排気量：23Nm ³ /h								
1 (2)		実施せず		窒素封入量：19Nm ³ /h 排気量：25Nm ³ /h								
通常状態	次ステップへの 移行準備					窒素封入量：32Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h						
2 (1)	窒素封入量減少による 影響確認					窒素封入量：24Nm ³ /h 排気量：17Nm ³ /h						
2 (2)	排気ファンの性能差確認 (B系⇒A系⇒B系)				実施せず	窒素封入量：24Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h						
2 (3)	窒素封入量減少による 影響確認					窒素封入量：16Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h						
通常状態	次ステップへの 移行準備					窒素封入量：32Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h						
3	窒素封入停止による 影響確認					窒素封入量：0Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h						
試験終了	通常の運転状態									窒素封入量：32Nm ³ /h 排気量：18Nm ³ /h		
実施計画Ⅲ 第1編 第32条適用 (計画的に運転上の制限外へ移行)		※3	← 11/1~11/6 →		← 11/13~11/20 →			← 11/27~11/28 →		※4	← 11/27 →	

窒素封入量
排気量

※3 実施計画Ⅲ 第1編 第18条 運転上の制限「PCV内温度の著しい温度上昇傾向」に抵触する想定
 ※4 実施計画Ⅲ 第1編 第25条 運転上の制限「必要な窒素封入量が確保されていること」に抵触

【参考】試験の全体像



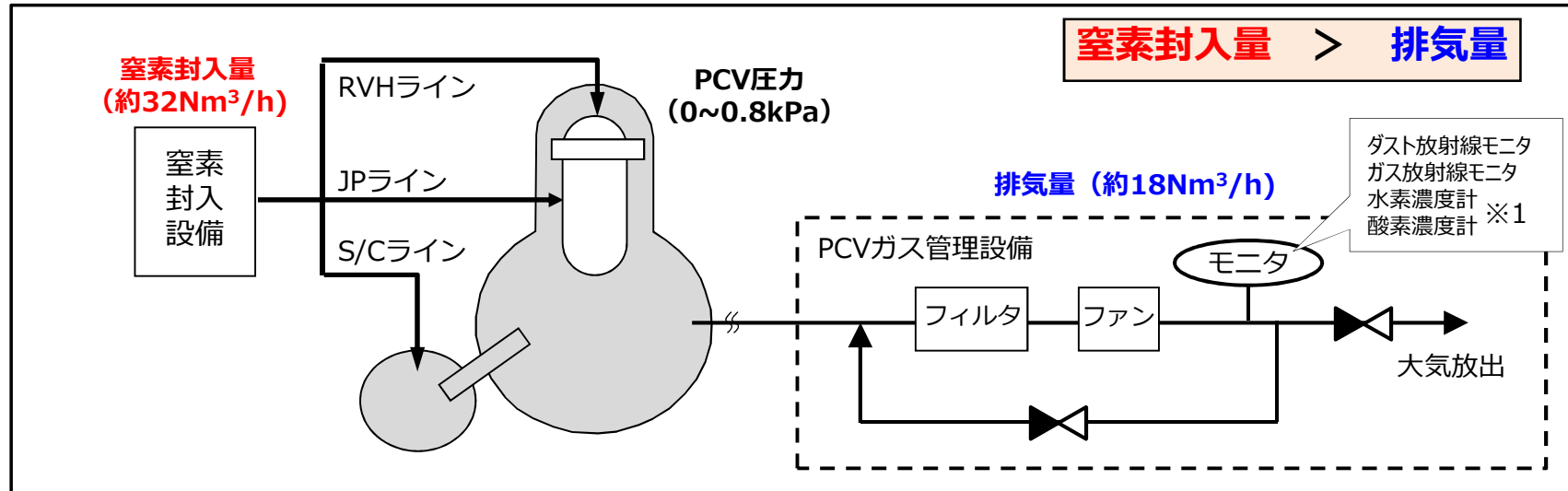
		1号機	2号機	3号機
PCV閉じ込め管理の見通し	給排気差流量管理（負圧） <small>(窒素封入 < 排気)</small>	△：難しい（試験で確認）	○：現状では対応可能	△：難しい（試験で確認）
	給排気差流量管理（均圧） <small>(窒素封入 < 排気)</small>	○：対応可能	○：対応可能	○：対応可能
	給排気均等流量管理（均圧） <small>(窒素封入 ≒ 排気)</small>	○：対応可能	○：対応可能	○：対応可能
理由		<ul style="list-style-type: none"> ・2023年11月に実施した試験から、PCV水位が真空破壊ラインベローズ（TP.6494：中心高さ）より高い状態では負圧を達成。 ・PCV水位が真空破壊管ベローズ付近を下回るとPCV圧力は1 kPaからほぼ0kPaに低下したことを確認。この時のガスバランスの状況から、酸素濃度が可燃限界の範囲内で負圧化の達成は、難しいと想定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・2020年7月のPCV減圧時に、一時的に負圧を達成。ただし、地下滞留水の水位低下時には、漏洩箇所が露出し、気層部の開口面積が拡大する可能性も想定される。 ・当時と比較してPCV圧力挙動に有意な変化がなく、現状も気層部の開口面積は維持されていると想定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・日々のPCV圧力は、2号機のような大気圧力の変動は見られず、2019年に実施した数時間のガス管停止でも、有意な圧力変動がなかったことから、2号機と比較してPCVの気密性は低く、負圧化の達成は難しいと想定。
試験実施のための検討事項（課題）		特になし	特になし	<ul style="list-style-type: none"> ・S / C 上部に滞留水素あり（滞留水素の存在を確認しており、S/C 気相部をパージする）
		閉じ込め強化に向けた窒素と排気の流量のバランスや設備上の制約（モニタ関連の仕様上の制約）を踏まえ、流量の目標設定と試験内容を検討		
試験時の懸念		<ul style="list-style-type: none"> ・窒素封入、排気のバランスを変更すると、PCV温度の指示の上昇を確認。（実施計画Ⅲ 第1編 18条のPCV温度に関するLCOが逸脱する可能性あり） 	特になし	特になし
試験の実施時期		PCV水位低下前（2023年11月実施済み） PCV水位低下後	内部調査・試験的取り出しを優先し、関連作業がない時期	PCV水位低下後

以降参考資料

通常時の窒素封入量と排気量について



〈1号機_通常時の状態（窒素封入量／排気量）〉



- ※1 PCVから排気したガスを用いて、水素／酸素濃度測定を実施
PCVガス管理設備のモニタ系が通気状態であれば、窒素封入量がゼロでも測定可
検出器の種類は以下の通り
- ・水素濃度計（熱伝導度式水素濃度検出器）
 - ・酸素濃度計（隔膜ガルバニ電池式酸素濃度検出器）

PCVガス管理設備 試験前性能確認 結果

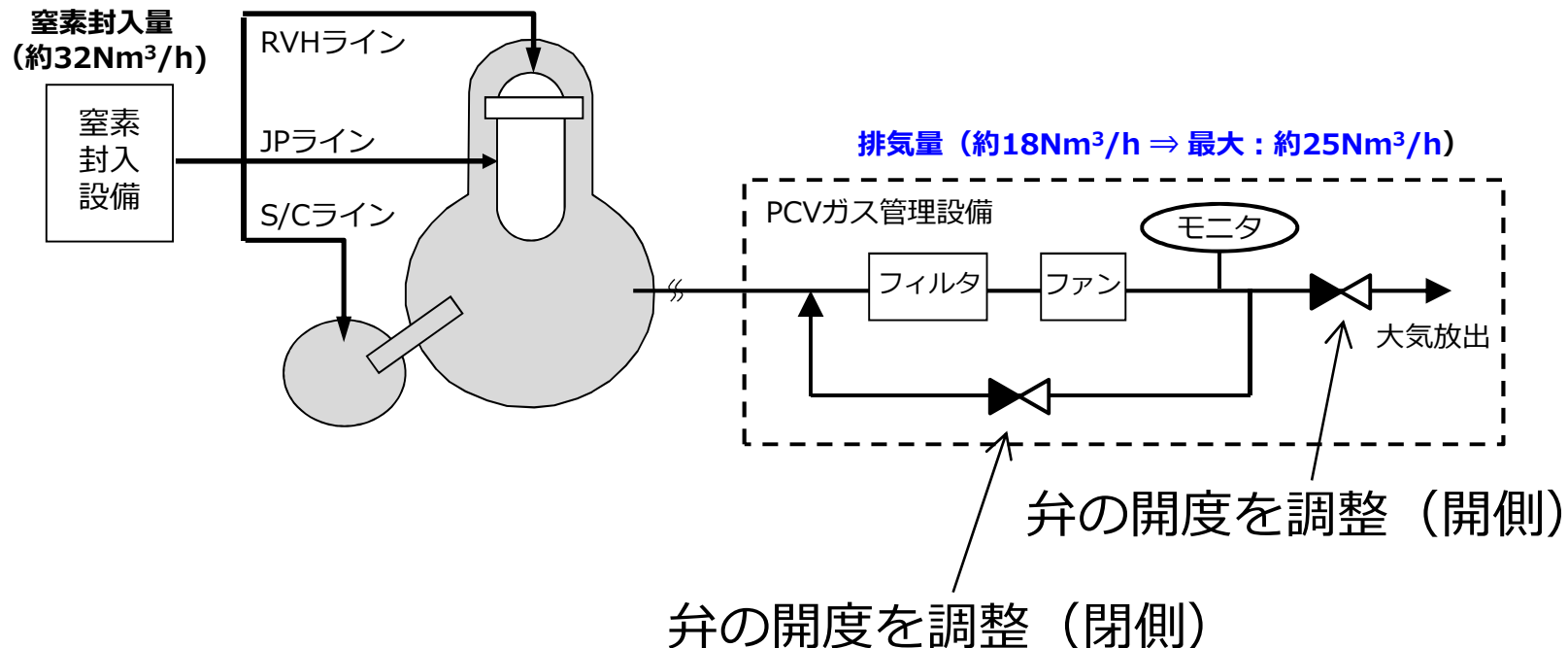


2023年10月11日、試験実施に先立ち、PCVガス管理設備の弁開度を調整して、最大排気量の確認を実施した。

■ 確認結果

- ✓ 排気量最大：約25Nm³/h
- ✓ PCVパラメータ※2に有意な変化無し

※2 PCV圧力、PCV温度、酸素濃度、放射性ダスト濃度など



参考1-1：監視パラメータと試験中止判断基準



- 試験時に監視強化するパラメータと試験中止判断基準を以下に示す。

監視強化パラメータ	監視頻度	試験中止判断基準	備考
PCV温度	毎時	・90℃を超えて温度上昇が継続していないこと	・実施計画第18条：PCV温度 全体的に著しい温度上昇傾向がないこと ※6時間当たりの上昇率から計算された100℃到達までの時間が24時間を超えていること
PCVガス管理設備 水素濃度	毎時	・0.5%以下であること	・実施計画第25条：PCV内水素濃度 2.5%以下 ・水素濃度「高」警報設定値：1.5%を参考に設定
PCVガス管理設備 酸素濃度	毎時	・3.0%以下であること	・酸素の可燃性限界：5.0%
PCV圧力	毎時	・-3.0kPa以上であること	・PCVガス管理設備のUシール圧力管理値：5.0kPaを参考に設定
PCVガス管理設備 ダスト濃度(上流)_仮設	毎時	・通常値の10倍を超えていないこと	—
PCVガス管理設備 ダスト濃度(下流)	毎時	・通常値の10倍を超えていないこと	・通常値：約15cps
大気圧	毎時	—	—

参考1-2：その他監視パラメータと試験時の対応



- 窒素封入量と排気量に対する試験時の対応を以下に示す。

監視強化パラメータ	監視頻度	対応基準と対応	備考
窒素封入量	毎時	・目標封入量から「±1Nm ³ /h」を超過した場合 → 目標封入量に調整	実施計画第25条：運転中の窒素封入設備 窒素ガス分離装置 1 台が運転中であること ※必要な窒素封入量が確保されていること
PCVガス管理設備 排気量	毎時	・目標排気量から「±2Nm ³ /h」を超過した場合 → 目標排気量に調整	—

参考2-1：運転上の制限の判断(第18条)



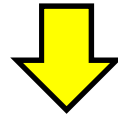
(原子炉注水系：第18条)

原子炉の状態を維持するにあたって、原子炉注水系は表18-1に定める事項を運転上の制限とする。

表18-1

項目	運転上の制限
原子炉圧力容器底部温度	80℃以下 ^{*2}
格納容器内温度	全体的に著しい温度上昇傾向 ^{*2} がないこと
運転中の原子炉注水系	原子炉の冷却に必要な注水量が確保されていること
待機中の原子炉注水系	1系列が動作可能であること ^{*3}
任意の24時間あたりの注水量増加幅	3.0m ³ /h以下 ^{*4}

〈定義〉
6時間当たりの上昇率から計算された100℃到達までの時間が24時間を超えていること(3次マニュアルに記載)



〈試験時の扱いについて〉

- ◆ 参考2-2～2-3の通り、1号機では、過去のPCV給排気の流量変更時において、PCV内の一部温度計に大幅な温度上昇が確認されている。
今回の試験では、過去よりもPCV給排気の差流量を大きく変更する事となる為、PCV内の一部温度計について運転上の制限を越える温度上昇が想定される。この為、当該試験時には計画的に運転上の制限を逸脱させるものとし、安全措置を整備した上で**PCV温度に対して第32条第1項(青旗)を適用する。**
- ◆ 局所的な温度変化でありRPV及びPCV全体の冷却に問題はないと考えるが、これらPCVの局所的な温度上昇時の影響については、放射性ダスト濃度で監視していく。

安全措置	<ul style="list-style-type: none"> • PCVガス管理設備フィルタ上流側の仮設ダストモニタによる放射性ダスト濃度監視(1時間/1回) • 異常な放射性ダスト上昇時の対応を整理(均圧状態へ移行処置等)
------	--

参考2-2：1号機PCV温度上昇事例

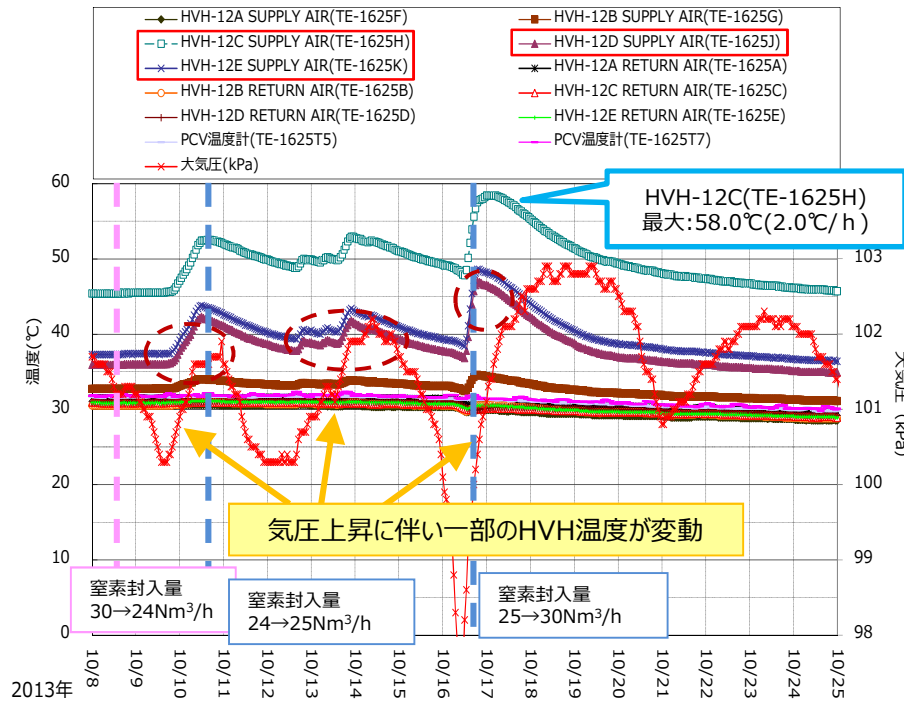


<PCV給排気差流量変更時>

- 過去にPCV給排気差流量を変更させた際、一部のPCV温度計にて上昇が確認されている。

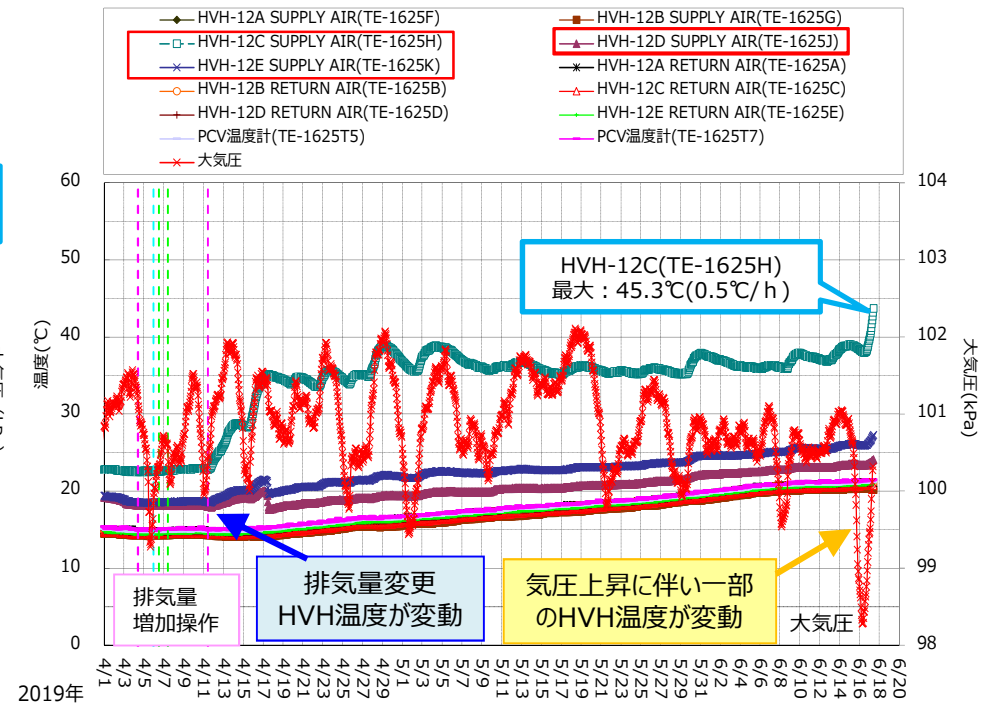
<2013年_窒素封入量減少時>

- ◆ 窒素封入量変更操作後の温度挙動は安定
- ◆ 台風等の気圧影響による温度上昇がみられる



<2019年_排気量増加による減圧時>

- ◆ 排気変更操作後にも温度上昇がみられる
- ◆ 台風等の気圧影響による温度上昇がみられる



参考2-3：1号機PCV温度上昇要因の推定



- PCV温度上昇要因については、CRD配管周辺の温度計に上昇が見られていることから、**CRD配管近傍に熱源が存在していると推定**
- 封入室素と排気の差が減少すると、PCV気相部からのリークが減少し**CRD配管付近を通過する気体量も減少し、当該温度計付近の温度が上昇すると推定**

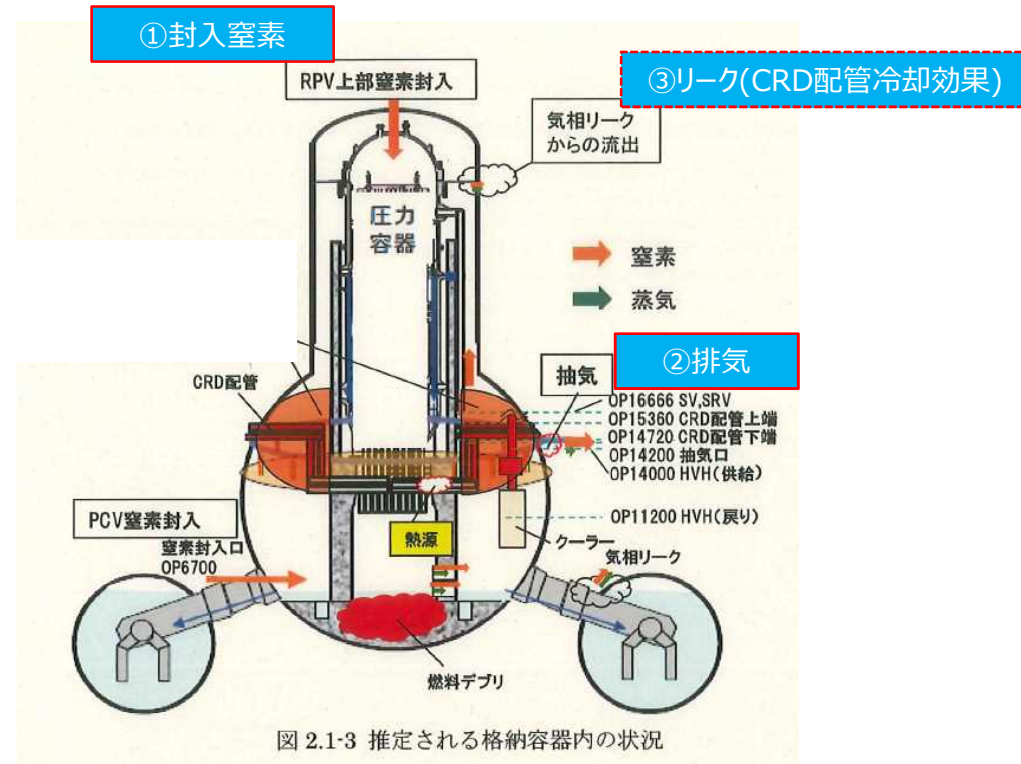
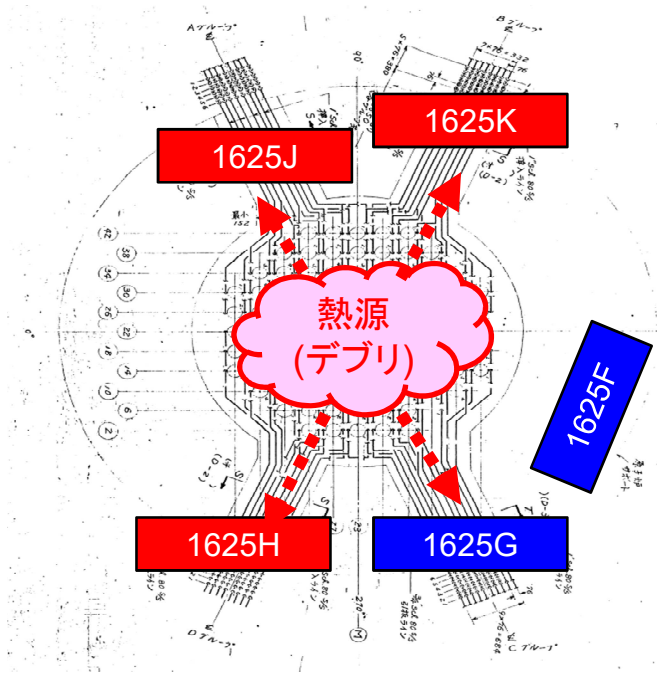


図 2.1-3 推定される格納容器内の状況

参考3：運転上の制限の判断(第25条)



(格納容器内の不活性雰囲気維持機能：第25条)

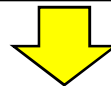
格納容器内の不活性雰囲気維持するにあたっては、表25-1で定める事項を運転上の制限とする。また、格納容器内の水素濃度の監視として、格納容器内水素濃度は表25-1で定める事項を運転上の制限とする。

表25-1

項目	運転上の制限
運転中の窒素封入設備	窒素ガス分離装置1台が運転中であること
待機中の窒素封入設備	窒素ガス分離装置1台が専用ディーゼル発電機により動作可能であること
格納容器内水素濃度	2.5%以下

窒素封入設備が表25-1で定める運転上の制限を満足していることを確認するための実施事項のうち、以下の項目がある。

「当直長は、窒素ガス分離装置を運転するとともに、必要な窒素封入量が確保されていることを毎日1回確認する。なお、必要な窒素封入量が確保できない場合は速やかに所定の封入量に戻すこと。」



<試験時の扱いについて(窒素封入停止時のみ)>

- ◆ 今回の試験では、一時的に窒素封入を停止させるため、必要な窒素封入量が確保されなくなる。このことから、試験のうち一時的に窒素封入を停止させる期間においては、計画的に運転上の制限を逸脱させるものとし、安全措置を整備した上で**必要な窒素封入量に対して第32条第1項(青旗)を適用する。**

安全措置	<ul style="list-style-type: none"> 水素濃度監視(1時間/1回) 酸素濃度監視(1時間/1回) 異常な水素・酸素濃度上昇に備えた速やかな窒素封入再開の準備
------	---

参考4：原子炉注水停止試験の経緯と現状整理



■ 原子炉注水停止試験の実績

原子炉注水停止期間

1号機	2号機	3号機
約49時間(2019.10)	約8時間(2019.5)	約48時間(2020.2)
約5日間(2020.11)	約3日間(2020.8)	約7日間(2021.4)
—	—	最長3か月間 (2022.6) ※

※PCV水位がPCV水位計下端を下回ったことから約5日間で注水再開

- 注水停止時のプラント挙動（温度、PCV水位（1/3号機）等）の確認、温度評価モデルの検証データ蓄積等を目的に試験を実施
- いずれの号機も概ね予測の範囲内で推移することを確認
- この結果を踏まえ、段階的にLCO（第18条 原子炉注水系）を見直し
 - 注水量増加幅：1.0m³/h → 1.5m³/h → 3.0m³/h
 - 必要な注水量の確保：連続して必要 → 24時間以内の注水停止を許容 等

■ 現状と今後

2024.1 現在	1号機	2号機	3号機
注水量(m ³ /h)	3.8 (CS:1.2 FDW:2.6)	1.5 (CS:— FDW:1.5)	3.8 (CS:1.9 FDW:1.9)

- 1/3号機は、PCV水位監視の観点で注水量を多めに維持していることから、PCV水位計設置、PCV水位低下を優先（その結果として注水量(滞留水)を低減できる可能性）
- 冷却に関わる選択肢を増やす余地を探るため長期間の冷却停止試験を計画（その結果としてLCO見直し等の可能性）