

福島第一原子力発電所 2号機 燃料デブリ冷却状況の確認試験について（追加説明）

2019/01/31

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

2018年12月27日廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第61回）

7時間の燃料デブリ冷却停止による影響について、評価結果を報告すること。

（影響の例）

- ・ 燃料デブリの中心温度や表面温度がどの程度上昇するのか
- ・ 燃料デブリ温度上昇に伴うセシウムやルテニウム、ストロンチウム等核種発生 of 想定
- ・ 冷却再開時に燃料デブリへ与えるヒートショックの影響
- ・ 冷却再開時の水蒸気発生による原子炉格納容器内の内圧変化

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

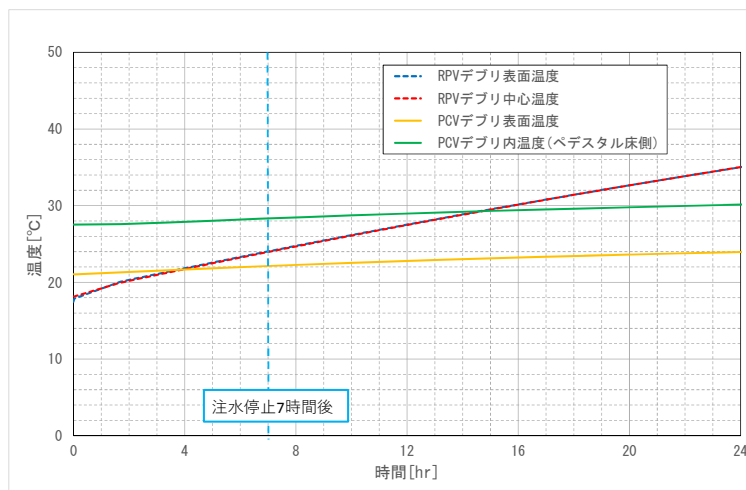
無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

注水停止時の燃料デブリ温度の推移

TEPCO

- 燃料デブリやRPV下部ヘッ드의領域を分けるなど、より詳細な評価モデルで、注水停止したときの燃料デブリの温度上昇の評価を実施。
- 評価条件による不確かさはあるものの、7時間の注水停止で、RPVの燃料デブリは6～7℃程度、PCVの燃料デブリは1℃程度の温度上昇。

	注水停止7時間 間の温度上昇
RPVデブリ表面温度	約7℃
RPVデブリ中心温度	約6℃
PCVデブリ表面温度	約1℃
PCVデブリ内温度 (ペDESTAL床側)	約1℃



注水停止時の温度推移

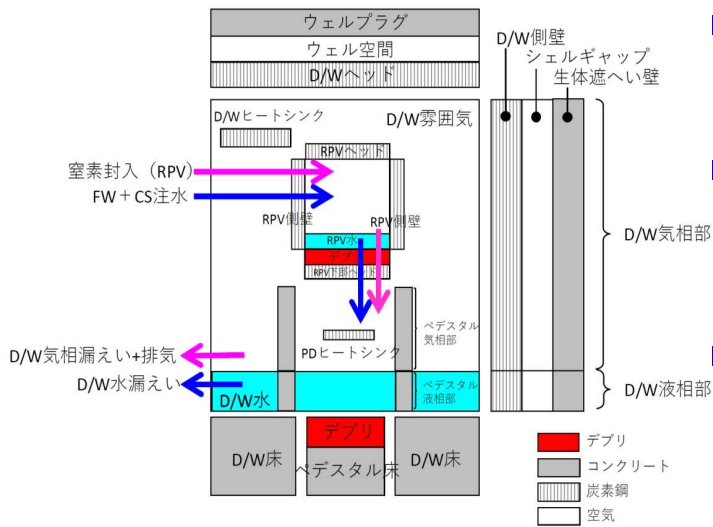
©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

- ご指摘いただいた項目を含めて、網羅的に影響を評価し、今回の注水停止試験による影響は小さいことを確認。
- 炉内の燃料デブリ分布は不明であり、水がかかっていない箇所などもあると想定されるが、短時間の注水停止による温度上昇は限定的。

項目	影響内容	短時間の注水停止における影響評価
ダスト等の放出	温度上昇によりFPが再揮発し、外部に放出される可能性がある。	注水停止による温度上昇は季節変動（変動幅20℃程度：RPV底部）の範囲であり、FPの再揮発による影響は小さい。
急冷時の影響	注水再開時の急冷に伴う急激な温度変化により、燃料デブリ・鋼材等の変形が生じる可能性がある。	注水停止による温度上昇は季節変動の範囲であり、急冷に伴う温度変化は限定的であることから、燃料デブリ・鋼材等の変形等が生じる可能性はない。
	注水再開時の急冷に伴い、蒸気が発生し、PCV内の圧力上昇が生じる可能性がある。	RPV・PCV内の温度は100℃以下で十分低いいため、注水再開時に急激な蒸気的发生はなく、PCV内の圧力上昇は生じない。
鋼材等の健全性	温度上昇によりRPV・PCV鋼材の健全性に影響を与える可能性がある。	注水停止による温度上昇は季節変動の範囲であり、RPV・PCV鋼材の健全性への影響はない。
	温度上昇によりペDESTAL壁・床の健全性に影響を与える可能性がある。	注水停止による温度上昇は季節変動の範囲であり、ペDESTAL壁・床の健全性への影響はない。

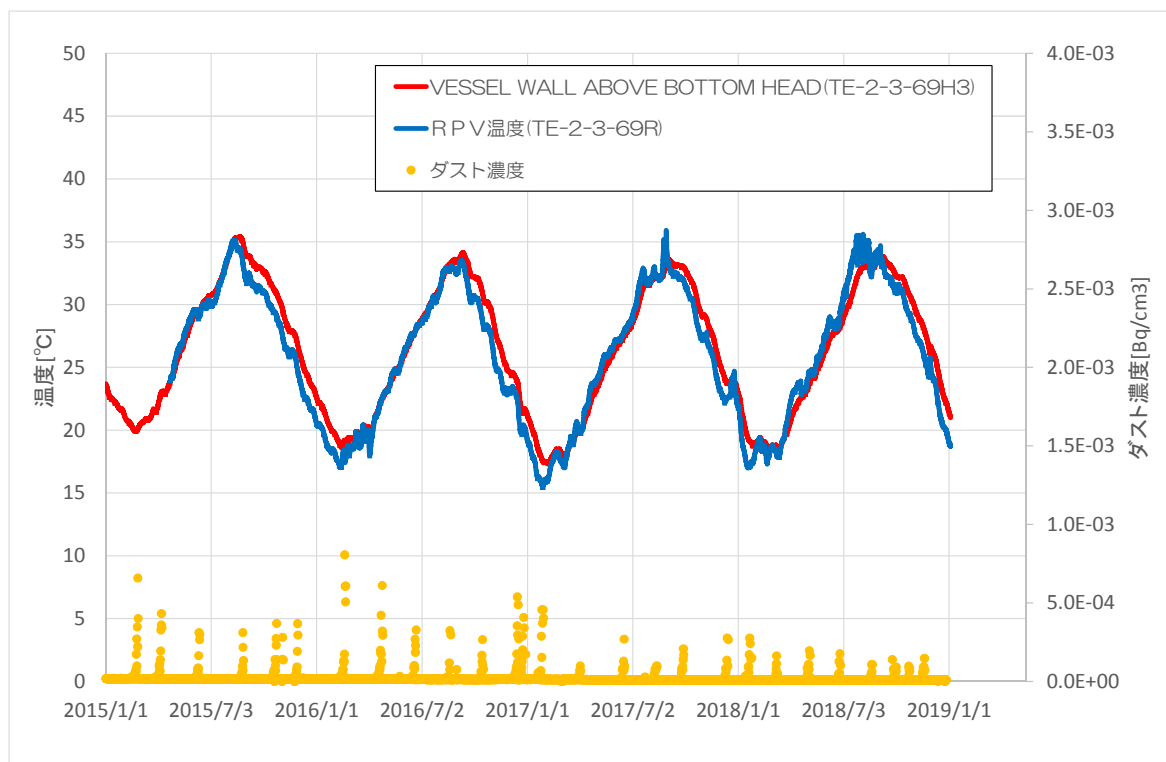
項目	影響内容	短時間の注水停止における影響評価
水素発生	燃料デブリの温度上昇に伴う、水-ジルコニウム反応により水素が発生する可能性がある。	注水停止による温度上昇は季節変動の範囲であり、水-ジルコニウム反応による水素の発生はほとんどない。
臨界	燃料デブリの温度上昇による形態変化・移動による臨界性に影響を与える可能性がある。	注水停止による温度上昇は季節変化の範囲であり、燃料デブリの形態変化・移動が生じる可能性は小さく臨界性への影響はない。
	注水停止・再開による水位変化が臨界性に影響を与える可能性がある。	燃料デブリは熔融により、健全な燃料と比較して水ウラン比(H/U)が小さく、減速不足領域となっていると考えられる。 注水停止では、水が減る方向のため、臨界性への影響はない。 注水再開では、元の状態に戻すものであり、臨界性への影響はない。



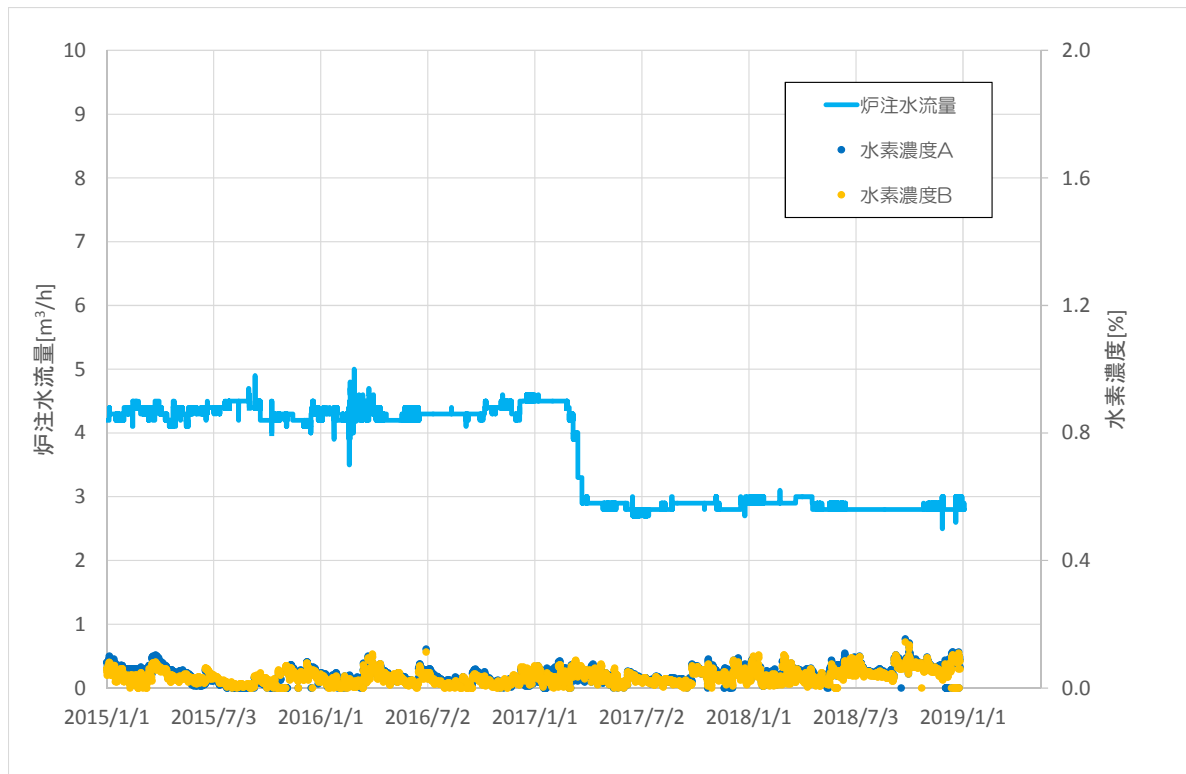
評価モデル

- 左図のとおり、燃料デブリやRPV下部ヘッドの領域を分けるなど、より詳細な評価モデルとしている。
- RPV・PCVの燃料デブリ割合は、RPV 7割、PCV 3割として評価。その他、各種パラメータは、実機測定データを再現できるよう設定している。
- 炉内の燃料デブリの状況は不明な点が多いが、燃料デブリに鉄 (Fe) を含めない組成 (熱伝導率低) とし、燃料デブリ内の温度が高くなる条件で評価している。

(参考) ダスト濃度と原子炉圧力容器底部温度の推移



※ ダスト濃度の上昇は定例的なBG測定による一時的な変動。



以降、参考

(2018年11月29日廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第60回)資料より)

- 現在、1～3号機の原子炉内には安定的に注水を継続しており、時間とともに、溶け落ちて残る燃料デブリの崩壊熱は大幅に減少している状況
- 一方で、万一、原子炉内への注水が停止した場合の温度変化の評価にあたっては、実際には生じている気中への自然放熱による温度低下等は考慮せず、燃料デブリの崩壊熱のみを考慮して計算している状況
- このような状況を踏まえ、当社は、原子炉注水の低減や停止を一時的に行い、燃料デブリの冷却状況の実態を把握するとともに、気中への放熱も考慮したより実態に近い温度変化の評価（熱バランス評価）の正確さを確認することとした
- 本試験においては、原子炉圧力容器（RPV）底部と原子炉格納容器（PCV）に事故後に設置した温度計があり、温度測定信頼性が高い2号機について、準備が整い次第、年明け以降を目途で実施を予定
- 現在運用している評価よりも、より実態に即して大幅に落ち着いている状況が確認でき、熱バランス評価を適用すれば、緊急時対応手順の適正化などの改善につなげることが可能

燃料デブリの冷却状況の確認を行う目的

①緊急時対応手順の適正化

万一、原子炉の注水が停止し多重のトラブルが発生したような場合、より実態に近い温度変化が把握できる（時間的乖離が小さくなる）ことで、緊急性の高い対応に傾注するなど、より適正な復旧対応の手順に見直すことが可能となる。

	温度上昇率	RPV温度が80℃* ¹ に達する時間* ²
現在の評価	約5℃/時間	約10時間
熱バランス評価	約0.2℃/時間	約12日

*¹ 実施計画上の運転上の制限

*² 初期温度約30℃の場合

②運転・保守管理上の改善

原子炉注水設備のポンプ切替時等、注水量に極力変化がないようにするための複雑な操作から、片方を止めた上でもう片方を起動するというシンプルな操作に見直すなど、運転・保守上の改善（ヒューマンエラーリスクの低減等）が見込まれる。

【参考】

1～3号機使用済燃料プールの水温評価について、2017年7～10月にかけて行った冷却停止時の状況を踏まえ、2018年2月1日から、崩壊熱のみを評価していた方式を熱バランス評価に変更している。

【実施事項】

2号機※において、原子炉注水量を低減する試験や、原子炉注水を短時間停止する試験を実施することにより、燃料デブリの冷却性を確認する。

※ 2号機は原子炉圧力容器（RPV）底部と原子炉格納容器（PCV）の双方に事故後に設置した温度計があり、短時間の注水変更に対する温度応答がよい

【試験方法】

燃料デブリの冷却性について、**安全を最優先に段階的かつ慎重に確認**する

STEP 1	- 原子炉注水量を低減する（$3.0\text{m}^3/\text{h} \rightarrow 1.5\text{m}^3/\text{h}$）ことで、冷却条件の変化が与える影響を確認 - 注水停止後の注水再開にあたり、設備上必要となる $1.5\text{m}^3/\text{h}$ の注水量増加幅の影響を確認
STEP 2	一時的に原子炉注水を停止し、また、再注水を開始することで、予め評価した通り安全上の影響がないことを確認

* 試験結果が良好であった場合は、他号機での試験等、追加試験を計画する

STEP 1 の概要（注水量低減、注水量増加試験）

■ 原子炉注水量の低減

- 実施計画Ⅲ第1編第18条の運転上の制限である「原子炉の冷却に必要な注水量」 $1.1\text{m}^3/\text{h}$ に余裕をみた $1.5\text{m}^3/\text{h}$ まで注水量を低減（現状は約 $3.0\text{m}^3/\text{h}$ ）し、約7日間状態を監視する。

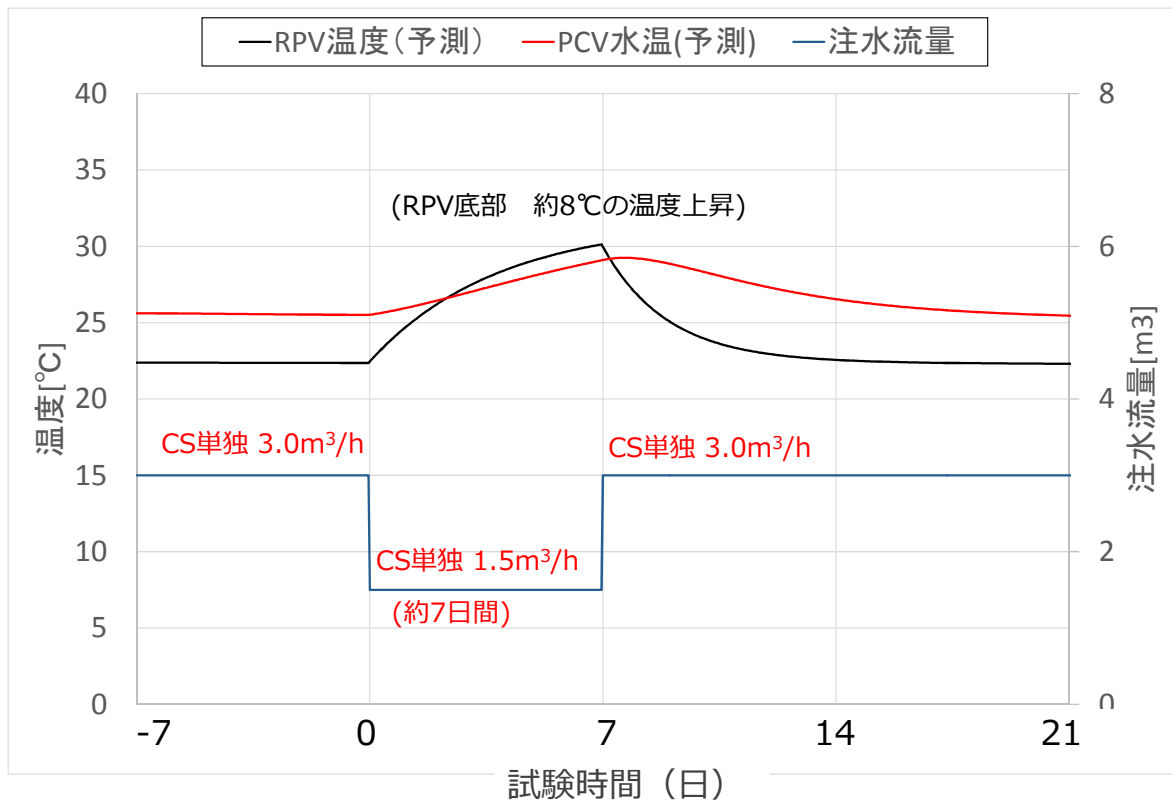
■ 原子炉注水量の増加

- STEP 2 の注水停止試験後の注水再開時は、設備上の制約により $1.5\text{m}^3/\text{h}$ の注水増加が必要。
- 原子炉注水量低減の影響確認（約7日間）が終了後、速やかに注水流量を $1.5\text{m}^3/\text{h} \Rightarrow 3.0\text{m}^3/\text{h}$ に戻し、操作後約7日間の状態を監視する。
- 本試験の実施により、任意の24時間あたりの注水量増加幅を $1.0\text{m}^3/\text{h}$ に制限する運転上の制限（実施計画Ⅲ第1編第18条）の外に計画的に移行することから、下記の**予め必要な安全措置を定めた上で実施**する。

<予め定める必要な安全措置>

- 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
- Xe135を有意に検知した場合にホウ酸水を注入する手順とする





©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

12

STEP 2 の概要 (注水停止)

■ 原子炉注水の停止

- 原子炉注水を停止し、**操作後約7時間の状態を監視**する。
原子炉の冷却に必要な注水量である1.1m³/h を確保せず、**運転上の制限(実施計画Ⅲ第1編第18条)外に計画的に移行するため予め必要な安全措置(①)を定めた上で実施**する。

■ 原子炉注水の再開

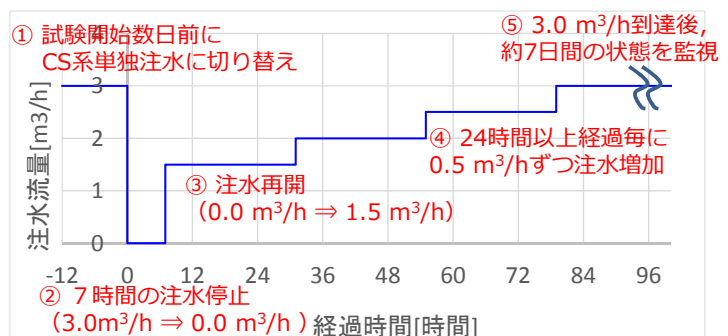
- 原子炉注水停止の影響確認(約7時間)終了後、ステップ1で確認している**1.5m³/h まで注水流量を戻す**。その後、**24時間毎に0.5m³/hずつ流量を増加**し、試験前の3.0m³/hまで戻す。操作完了後、**約7日間の状態を監視**する。
- 注水再開時に任意の24時間あたりの注水増加幅を1.0m³/hに制限する**運転上の制限(実施計画Ⅲ第1編第18条)の外に計画的に移行することから、STEP 1と同様の予め必要な安全措置(②)を定めた上で実施**する。

<予め定める必要な安全措置①>

- 原子炉圧力容器、原子炉格納容器の温度監視
- 10℃以上上昇で監視強化、15℃上昇で注水流量を増加

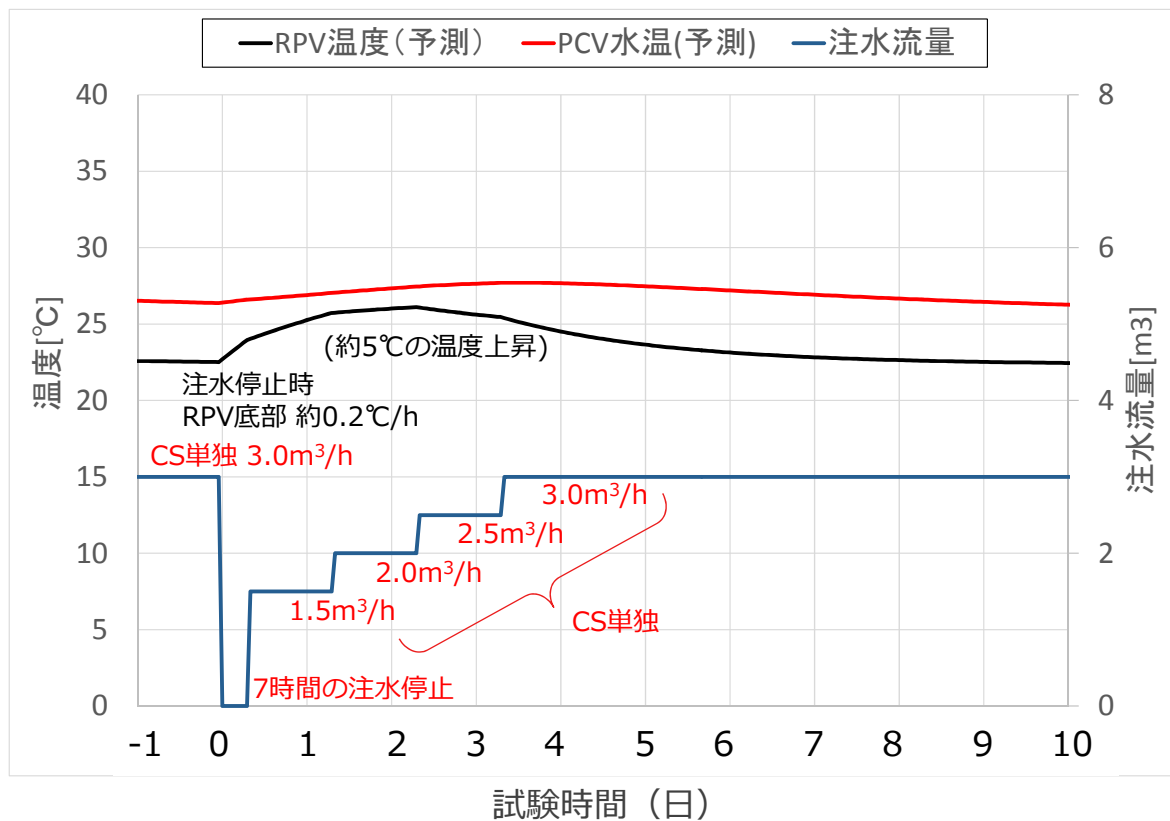
<予め定める必要な安全措置②>

- 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
- Xe135を有意に検知した場合にホウ酸水を注入する手順とする



無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

13



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

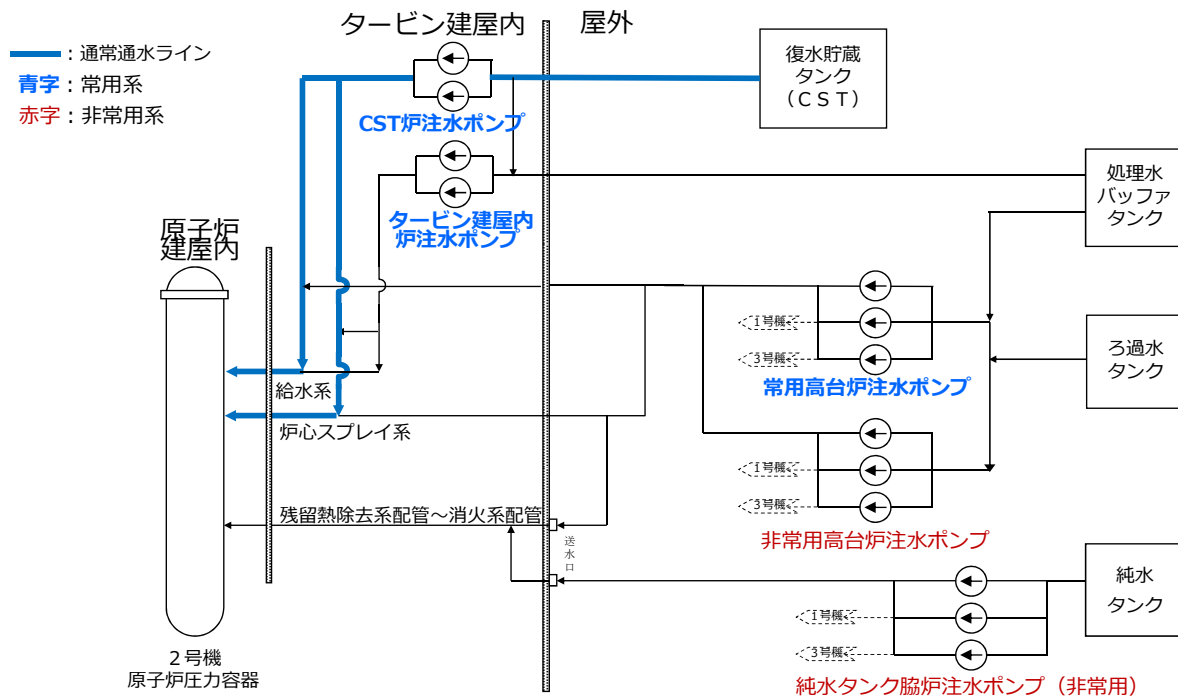
14

注水流量低減、停止に伴う影響の評価（温度変化，未臨界，ダスト）

本試験に伴う影響の評価		安全措置
温度	- STEP 2 では、炉注停止により、実施計画上の必要注水量を下回るため、計画的に運転上の制限外に移行 - 但し、除熱の減少によるRPV、PCVの温度の上昇は限定的と評価している	- 除熱の減少による影響を把握するため、RPV、PCVの温度変化を監視 - 異常な温度上昇を確認した場合、速やかな注水量増加等の措置を実施 - STEP 1 で注水流量低減試験を行い、除熱減少の影響を段階的に確認する
未臨界性	- 注水停止試験からの注水再開時、設備上の制約により計画的に注水増加量に関する運転上の制限の外へ移行する - しかし、注水増加は注水量を現在の状態に戻すだけであるので、注水再開が未臨界維持に与える影響はない	- ガス管理設備の希ガスモニタを監視 - 念のため、ほう酸注入の準備を予め行い、Xe-135が有意に検出された場合は注入する - STEP 1 で注水流量増加試験を行い、その影響をSTEP 2 の注水停止試験の前に確認する
ダスト等の放出量	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、注水量低減/増加による放出量の増加はない	- 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、速やかな注水量増加等の措置を実施

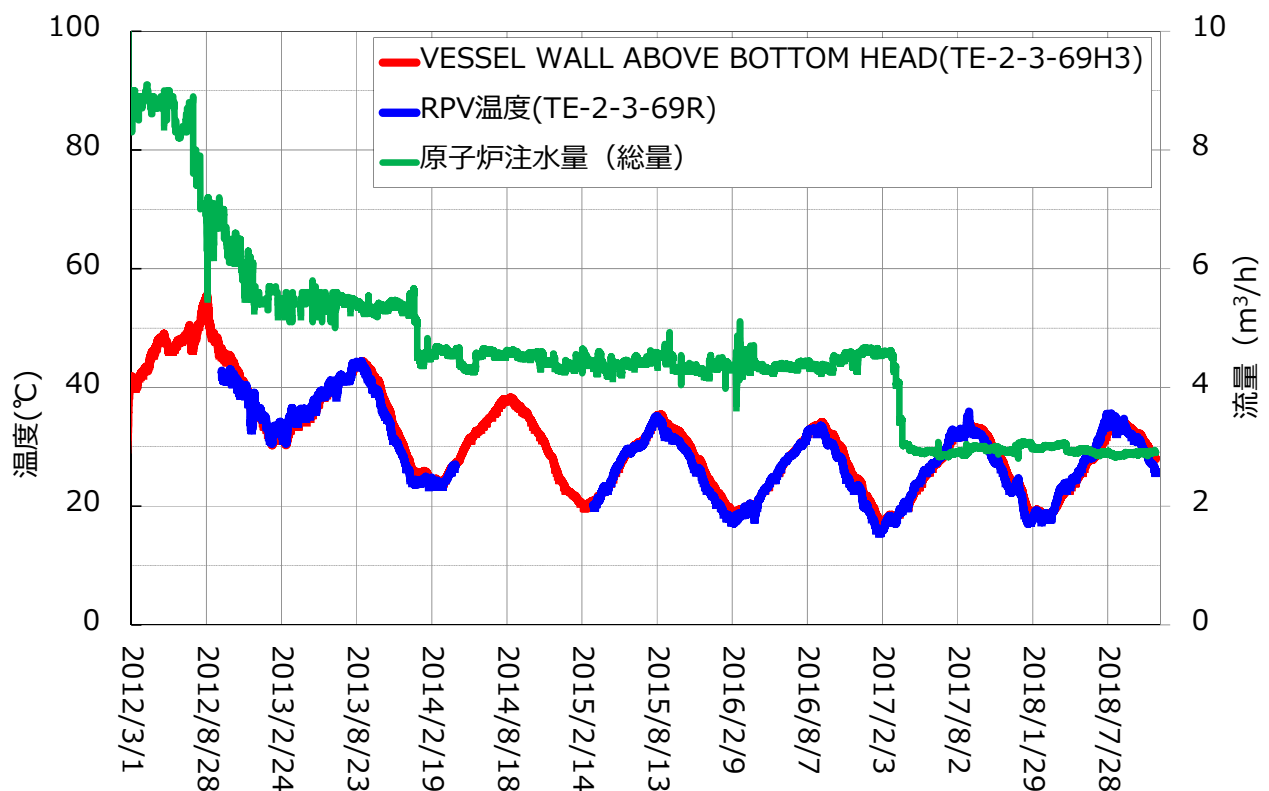
(参考) 原子炉注水設備の概要

原子炉注水設備は、常用系3設備+非常用系2設備の5設備にて構成されている。
通常は、CST炉注水ポンプにて、給水系ライン及び炉心スプレイ系ラインから原子炉へ注水している。



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All 原子炉注水設備概略図 (2号機を例示)

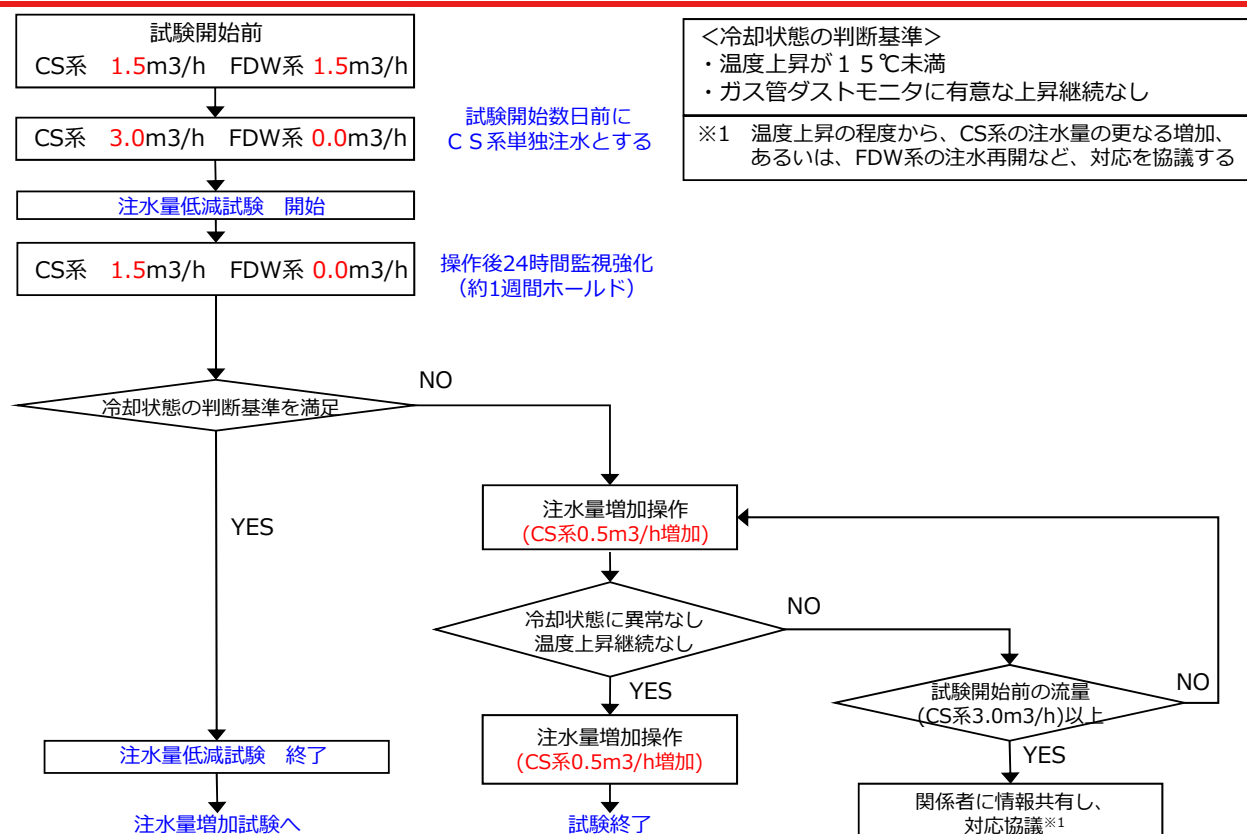
(参考) これまでの原子炉注水量と原子炉压力容器底部温度の推移



原子炉注水系に関しては、実施計画Ⅲ第1編第4章第18条において、下記の運転上の制限を定めている。

項目	運転上の制限
原子炉圧力容器底部温度	80℃以下
格納容器内温度	全体的に著しい温度上昇傾向がないこと
常用原子炉注水系	原子炉の冷却に必要な注水量が確保されていること
待機中の非常用原子炉注水系	1系列が動作可能であること
任意の24時間あたりの注水量増加幅	1.0m ³ /h以下

(参考) STEP 1 試験フロー（注水量低減）



(1) 冷却状態の監視 (注水量低減時)

- 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		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	温度上昇が15℃未満 ※1
原子炉格納容器内温度	毎時	6時間	温度上昇が15℃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

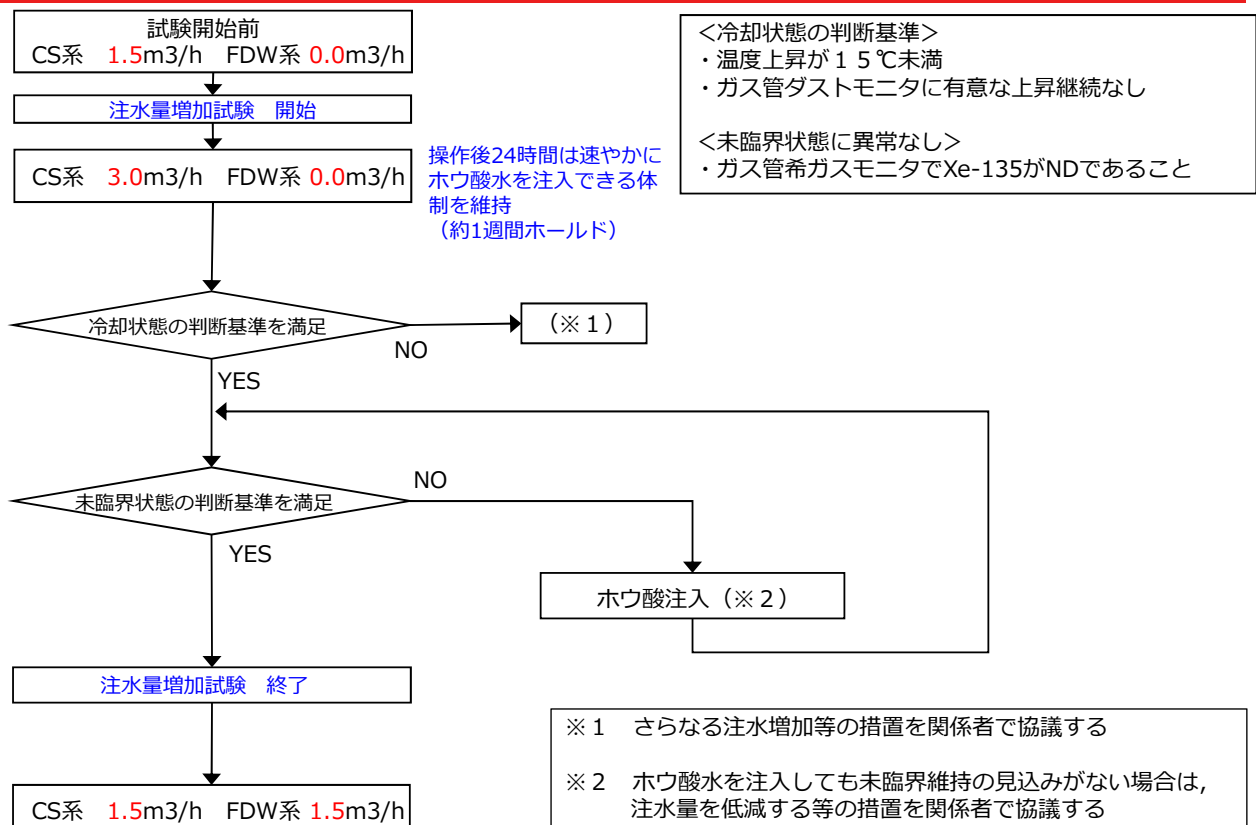
※1 注水変更後、10℃以上の温度上昇があった際には、関係者間で情報共有・監視強化を継続する。
15℃以上の温度上昇があった際には、流量を0.5m³/h増やす。

(冬季のRPV/PCV温度は概ね30度未満であり、15℃の温度上昇でも45℃未満と想定)

(2) その他の傾向監視パラメータ

- 原子炉圧力容器上部温度、格納容器圧力、格納容器内水位

(参考) STEP 1 試験フロー (注水量増加)



(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		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	温度上昇が15℃未満 ^{※1}
原子炉格納容器内温度	毎時	6時間	温度上昇が15℃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

(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		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 希ガスモニタ	毎時	毎時	Xe135が検出限界未満であること ^{※2}

※1 注水変更後、10℃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 2号機の希ガスモニタの値は、通常は検出限界値(約0.16Bq/cm³)未満である。運転上の制限である1Bq/cm³に余裕があっても、検出限界を超えて有意に検出された場合には、確実な未臨界維持のためホウ酸水を注入する。

(3) その他の傾向監視パラメータ

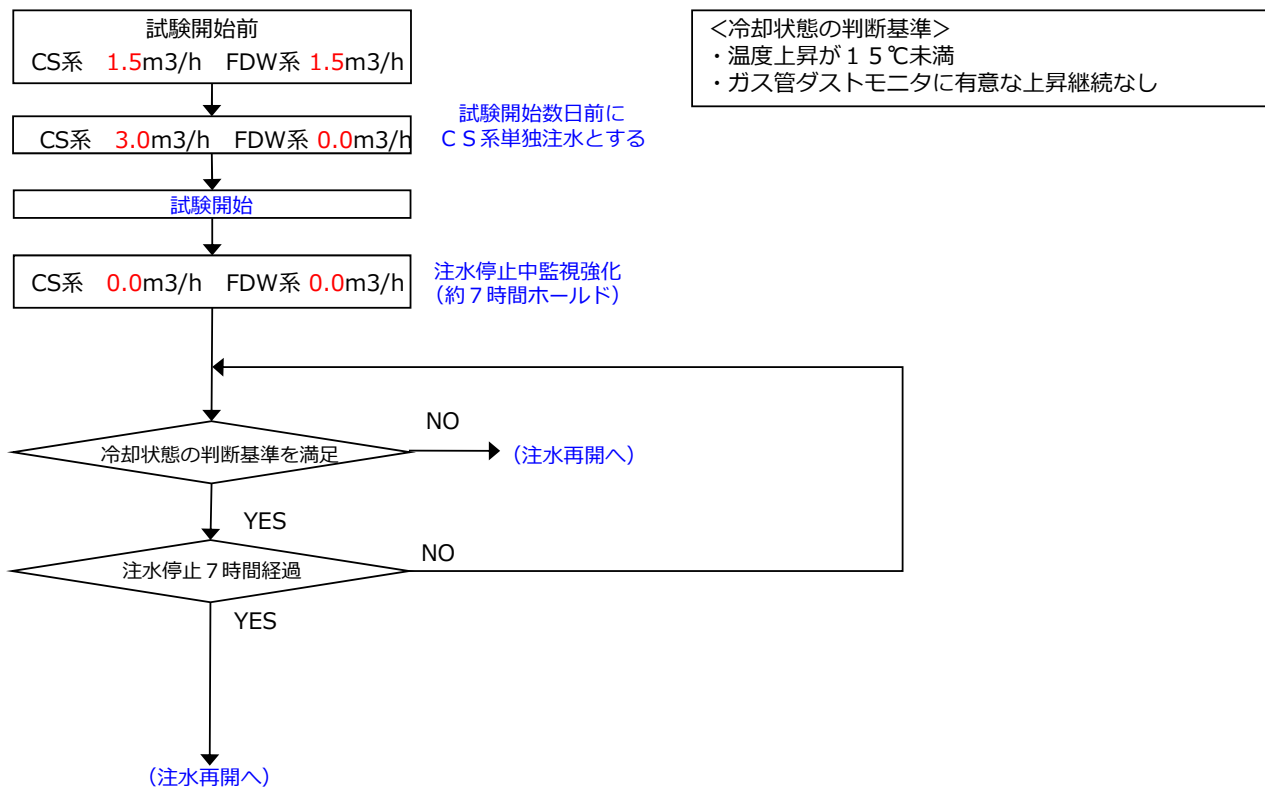
- 原子炉圧力容器上部温度、格納容器圧力、格納容器内水位

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

22

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		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	- 原子炉注水を0.5m³/hずつ増加する。 - 試験前の3.0m³/hまで流量を増加しても判断基準を満足しない場合は、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	- 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。



(1) 冷却状態の監視 (注水量低減時)

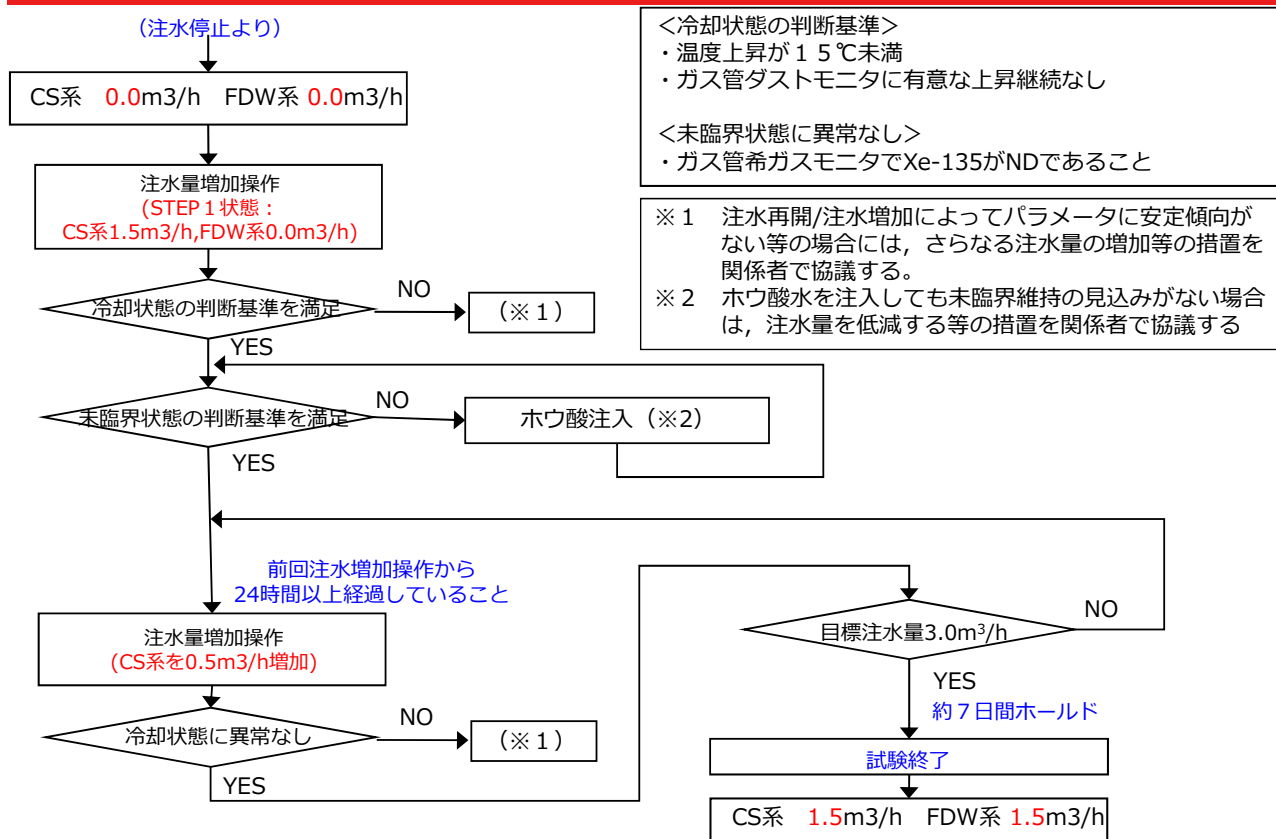
監視パラメータ	監視頻度		注水停止時の判断基準
	注水停止中	(参考) 通常監視頻度	
原子炉压力容器底部温度	毎時	毎時	温度上昇が1.5℃未満 ※1
原子炉格納容器内温度	毎時	6時間	温度上昇が1.5℃未満 ※1
原子炉への注水量	毎時	毎時	原子炉に注水されていないこと
格納容器ガス管理設備 ダストモニタ	毎時	6時間	有意な上昇が継続しないこと

※1 15℃以上の温度上昇があった際には、流量を1.5m³/hに増やす(注水を再開する)。

(冬季のRPV/PCV温度は概ね3.0℃未満であり、1.5℃の温度上昇でも4.5℃未満と想定)

(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



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

26

(参考) STEP2 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	温度上昇が 1.5℃未満※1
原子炉格納容器内温度	毎時	6 時間	温度上昇が 1.5℃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、10℃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 2 4 時間	2 4 時間以降 (通常監視頻度)	
格納容器ガス管理設備 希ガスモニタ	毎時	毎時	Xe135が検出限界未満であること※2

※ 2 希ガスモニタの値は通常は検出限界値未満 (ND) である。運転上の制限である1Bq/cm³に余裕があっても、検出限界を超えて有意に検出された場合には、確実な未臨界維持のためホウ酸水を注入する。

(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、格納容器圧力、格納容器内水位

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

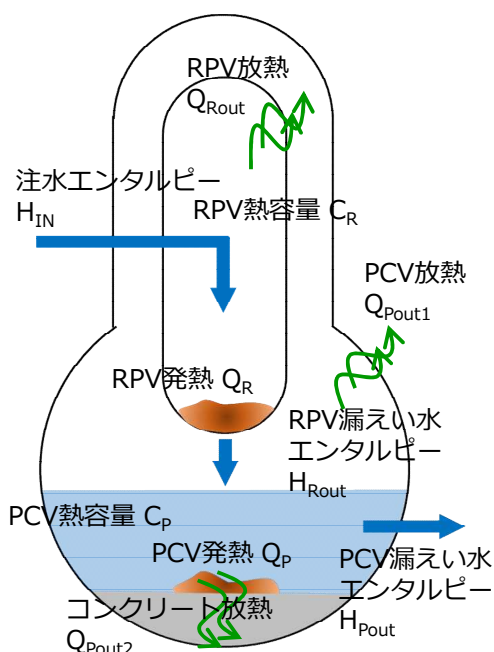
無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

27

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		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	- STEP 1 で確認している1.5m³/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	- 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) 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

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

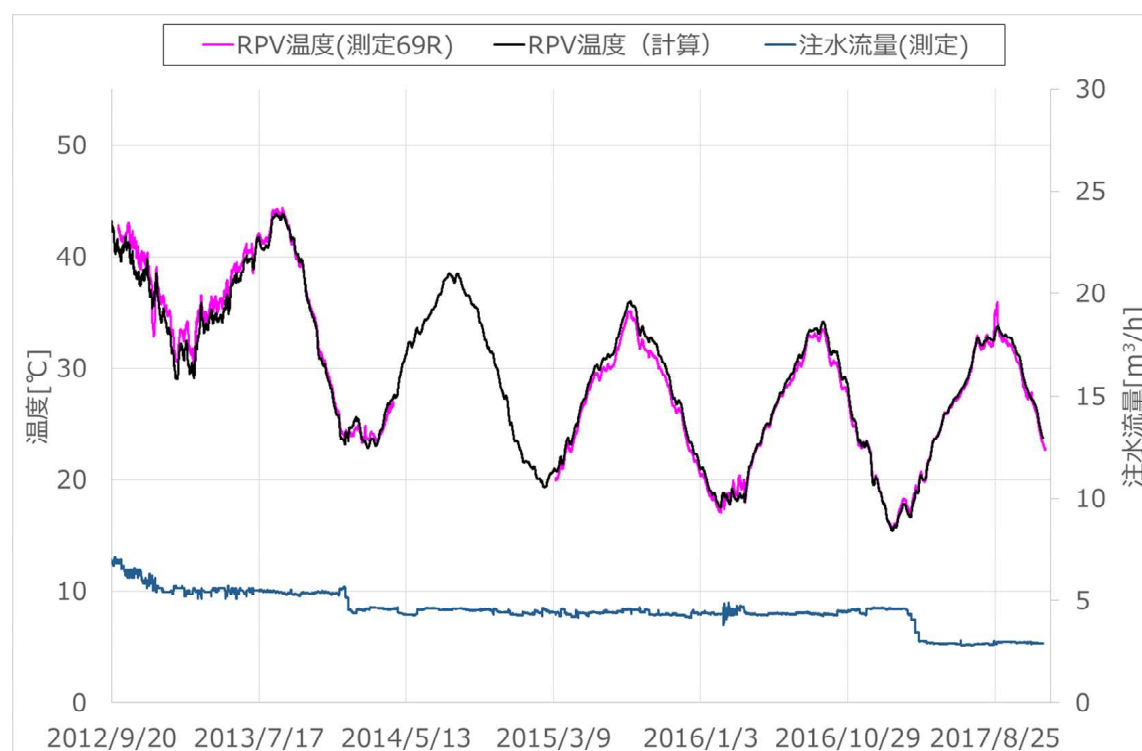
$$T_{RPV}(i+1) = T_{RPV}(i) + \Delta T_R$$

(2) PCVのエネルギー収支と温度変化の計算式

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

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

- 評価条件には仮定が含まれるものの、計算したRPV温度が、実績のRPV底部温度（新設温度計）のトレンドを概ね再現した。

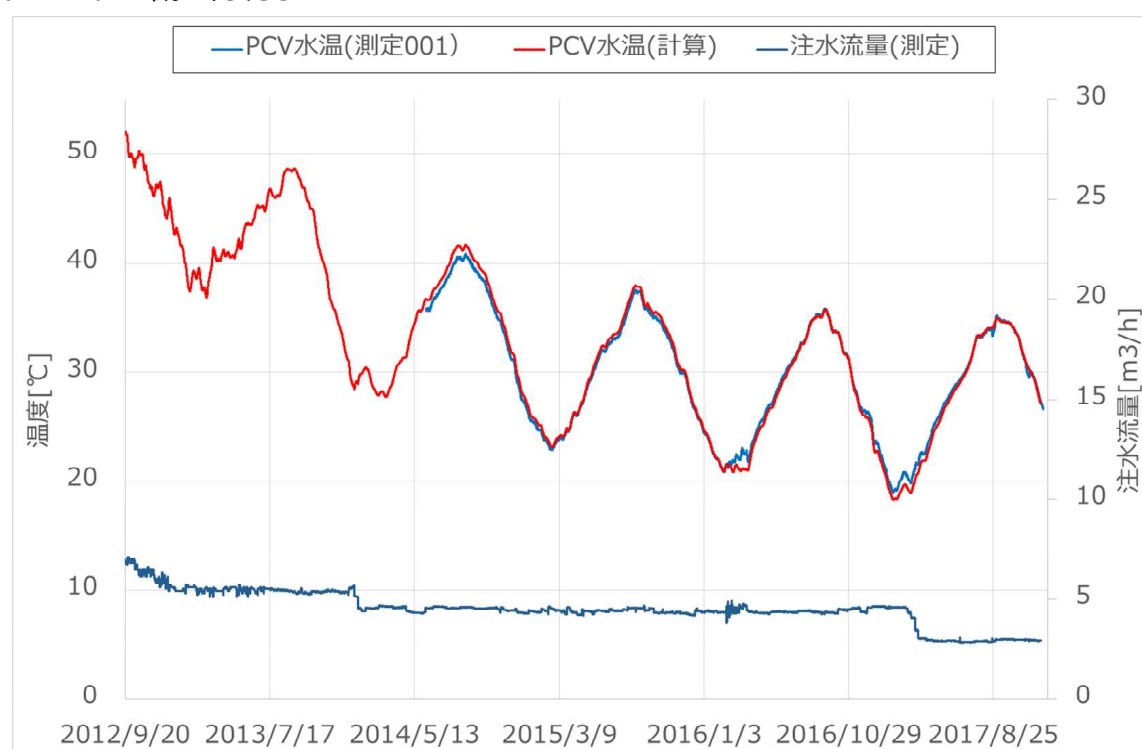


©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

30

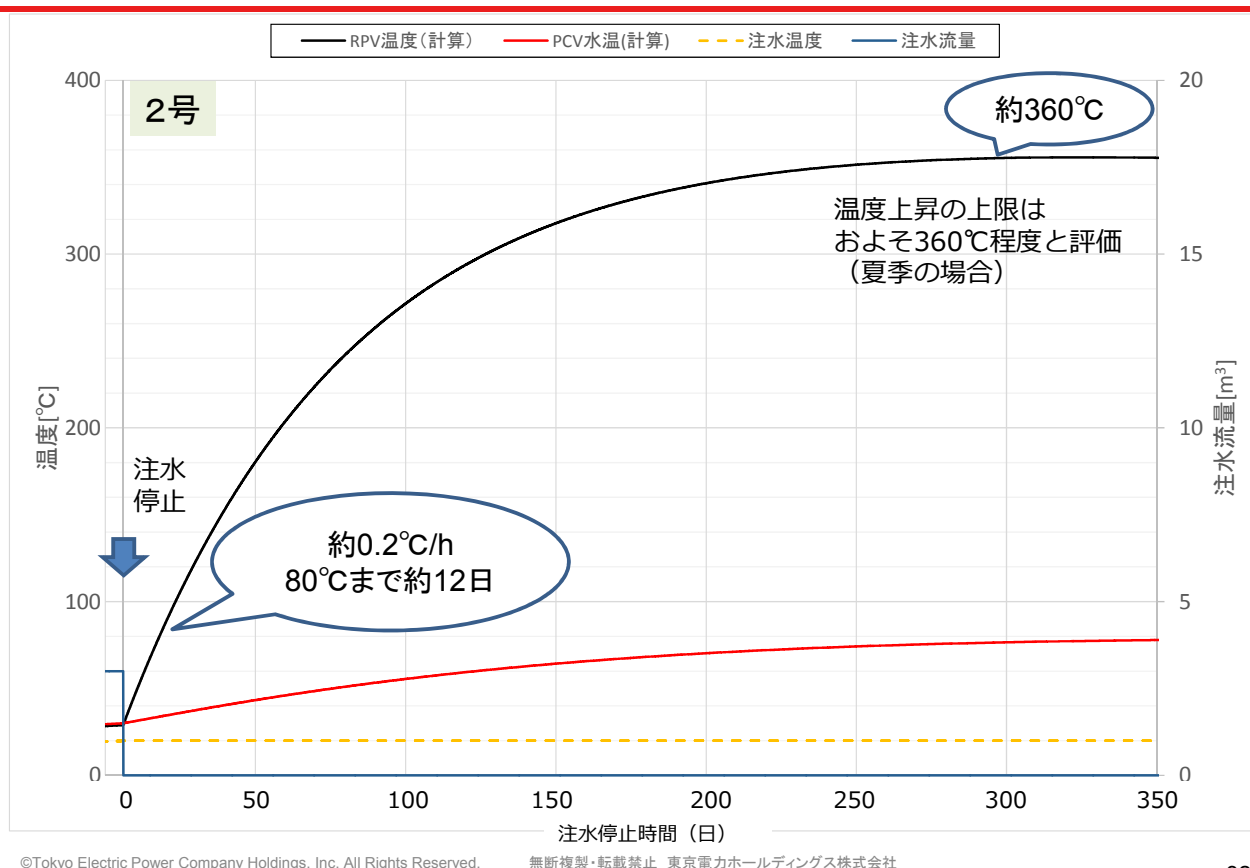
- 評価条件には仮定が含まれるものの、計算したPCV水温が、実績のPCV水温（新設温度計）のトレンドを概ね再現した。



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

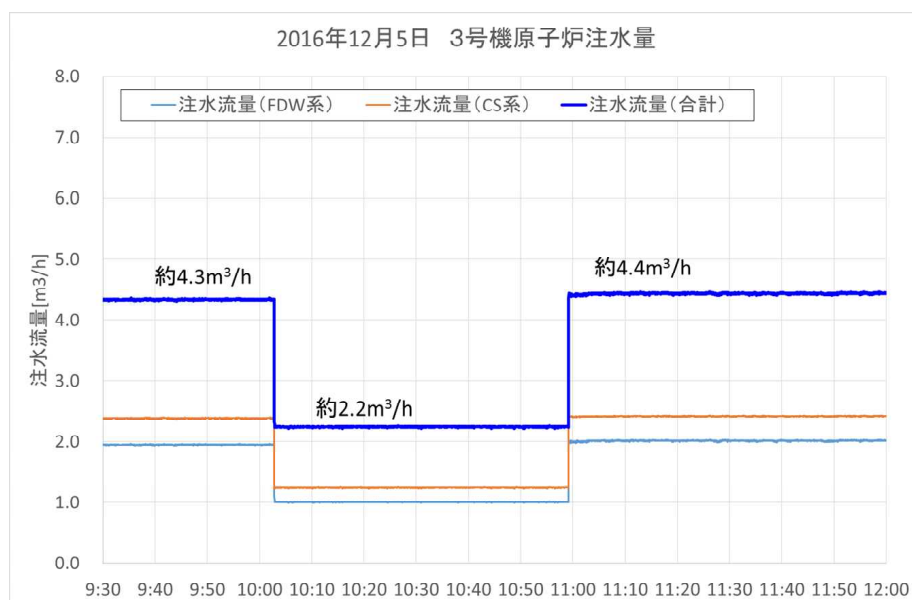
31



0

32

- 2016年12月に3号機において原子炉注水ポンプが停止するトラブルあり。
- ポンプ復旧時には、実施計画に定める要求される措置に則り、事前にほう酸水は注入せず、速やかに原子炉注水を増加。後追いで未臨界を確認。ガス管理設備の希ガスモニタにて、短半減期希ガスXe-135は検出限界未満を維持していた。



実施計画Ⅲ第1編第18条 原子炉注水系
常用原子炉注水系「原子炉の冷却に必要な注水量が確保されていること」

STEP1:
LCO内で実施

STEP2:LCO外へ計画的に移行

下記のLCOに対し尤度をもった安全措置を予め定め試験を実施する

実施計画Ⅲ第1編第18条 原子炉注水系
原子炉圧力容器底部温度「80℃以下」
格納容器温度「全体的に著しい上昇傾向がないこと」

〈予め定める必要な安全措置〉

1. 原子炉圧力容器、原子炉格納容器の温度監視
2. 15℃上昇で注水流量を増加

実施計画Ⅲ第1編第18条 原子炉注水系
任意の24時間あたりの注水量増加幅「1.0m³/h以下」

STEP1、STEP2ともにLCO外へ計画的に移行

下記のLCOに対し尤度をもった安全措置を予め定め試験を実施する

実施計画Ⅲ第1編第24条 未臨界監視
短半減期核種の放射能濃度
「キセノン135の放射能濃度が1.0Bq/cm³以下であること」

〈予め定める必要な安全措置〉

1. ガス管理設備希ガスモニタによる未臨界の監視
2. ホウ酸水注入の準備
3. Xe135を有意に検知した場合にホウ酸水を注入する手順とする