

福島第一・1～3号機 これまでの注水量変更時の温度挙動について

平成26年2月27日

東京電力株式会社



無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

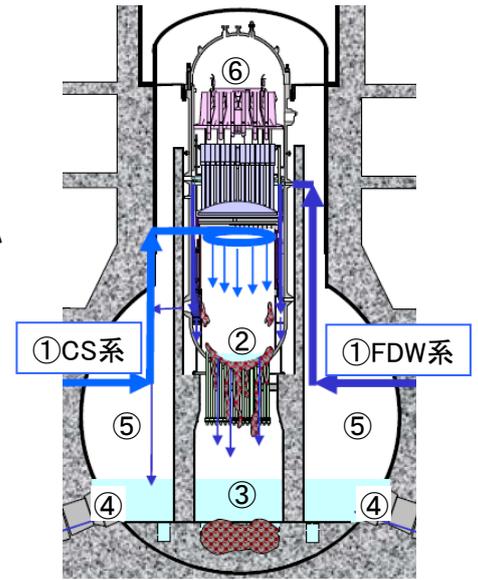
目的

- 1～3号機の原子炉注水については、これまで工事や作業に伴う必要性、水処理負荷低減等を目的に、注水量の変更を実施。
- 原子炉注水を変更した際の炉内温度応答は号機毎に異なっており、各号機の特徴から、熱源の位置など、炉内状況について推定。
- これまで実施した注水量変更のうち、変更幅が大きい実績を中心に、注水量変更時の温度挙動を整理し、得られた情報について報告する。

炉内温度の監視に用いている温度計のうち事故前から設置されているものについては、過去に高温、高圧の過酷な環境を経験しているため、信頼性が低下している可能性があるが、ここでは温度計の指示値は正しいとして評価を取り纏めている。

原子炉冷却の概要

- 事故により炉心は溶融し、燃料デブリは原子炉圧力容器(RPV)底部または原子炉格納容器(PCV)底部に落下していると推定
 - 落下の過程で、その中間にある構造物に付着している熱源も微量存在すると想定
- 炉心スプレイ系(CS系)、給水系(FDW系)から、RPVへの注水によって熱源を冷却
 - 注水の流れは、①→②→③→④
 - 主に熱源が存在すると推定される②、③の位置の温度挙動に着目
 - 下流に位置する③、④、⑤の温度は、ほぼ同等になると推定されることから、⑤の温度で代表



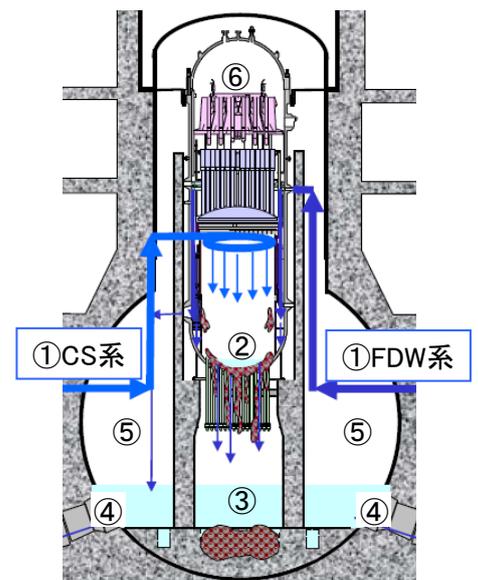
炉心状態のイメージ
(1号機)

炉内状況の推定の考え方

- 注水変更後の温度応答速度の違い
 - 注水変更後、炉内温度は時間遅れをもって緩やかに変化
 - 号機毎に温度変化の時遅れが異なるのは、炉内の水の入れ替わり速度に応じていると考えられる。

→ 応答が遅いプラントは保有水が多いと推定

- 炉内温度と熱源位置の推定
 - 注水の流れは、①→②→③→④
 - (1) 大部分の熱源がRPV内に存在
 - ◆ $② = ⑤ > ①$
 - (2) ある程度の熱源がPCV側に存在
 - ◆ $⑤ > ② > ①$
 - (3) RPV内の燃料デブリが十分冷却出来ていない場合
 - ◆ 部分的に $② > ⑤ > ①$ となりうる
 - ◆ 注水変更等における②、⑤の温度変化幅は異なる
 - (4) ⑥の温度は、セシウム等の核分裂生成物の付着の影響により、①～⑤より若干高くなる可能性有り

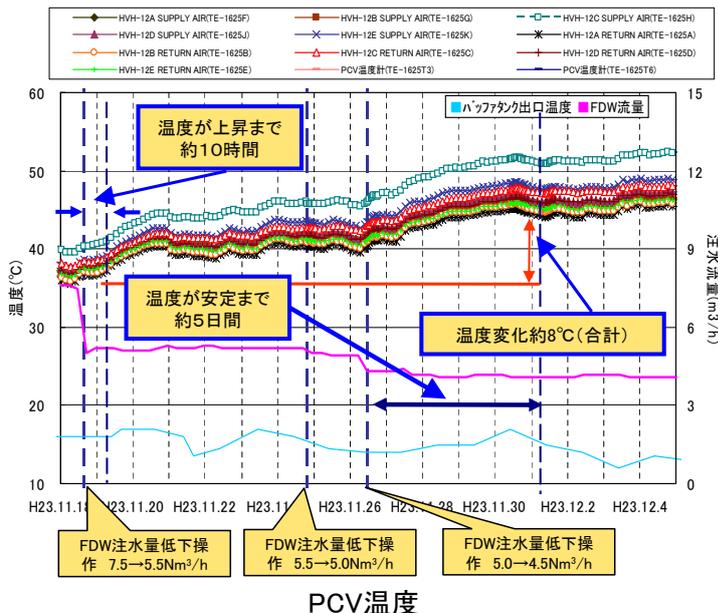
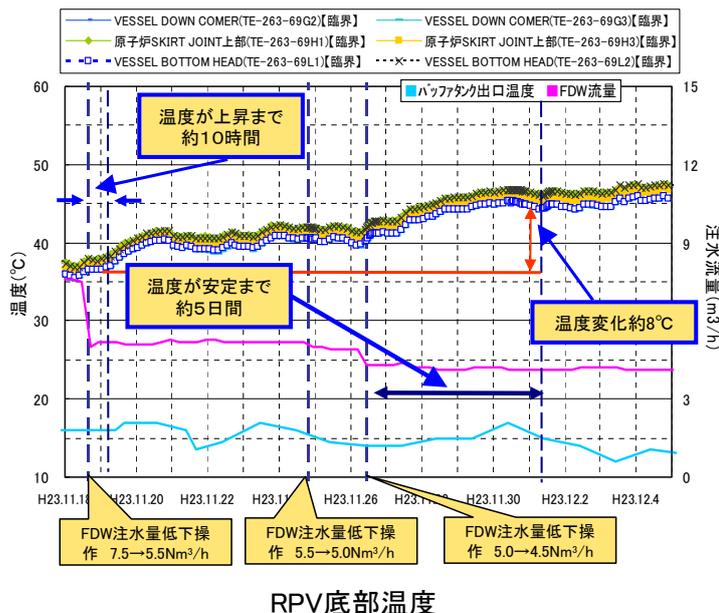


炉心状態のイメージ
(1号機)

1号機の温度応答の特徴(その1)

【実績】平成23年11月(RPV底部温度とPCV温度)

※ 注水温度は参考



- 注水変更後, 時間遅れをもって緩やかに温度変化
 - 明確な温度上昇が確認できるまでおよそ10時間程度
 - その後およそ5日程度で温度は安定
- PCV温度はRPV温度とほぼ同等だが, 一部PCV温度の方が高い



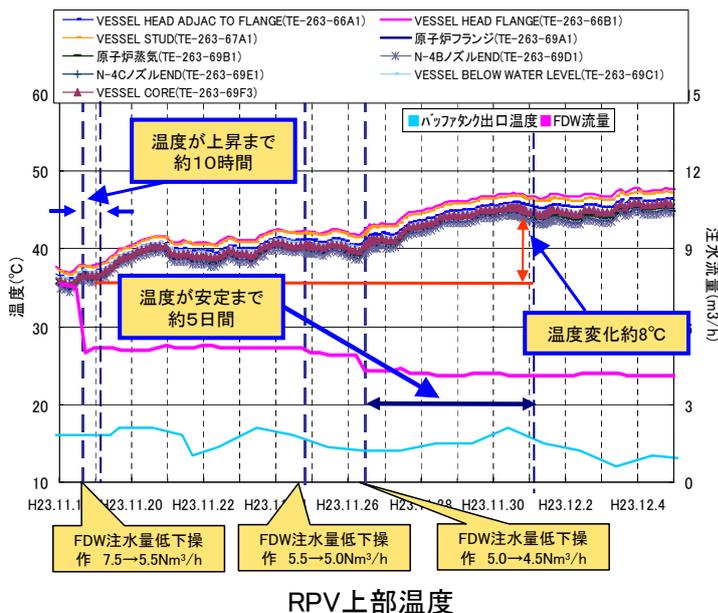
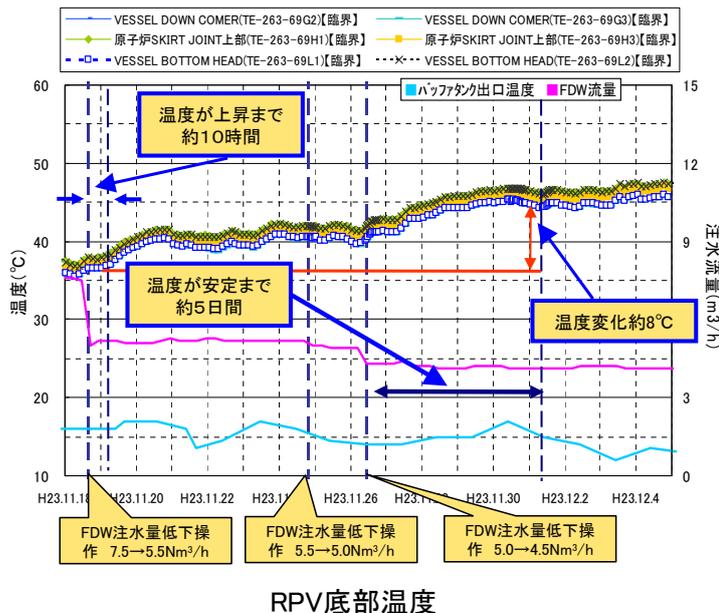
東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

1号機の温度応答の特徴(その2)

【実績】平成23年11月(RPV温度)

※ 注水温度は参考



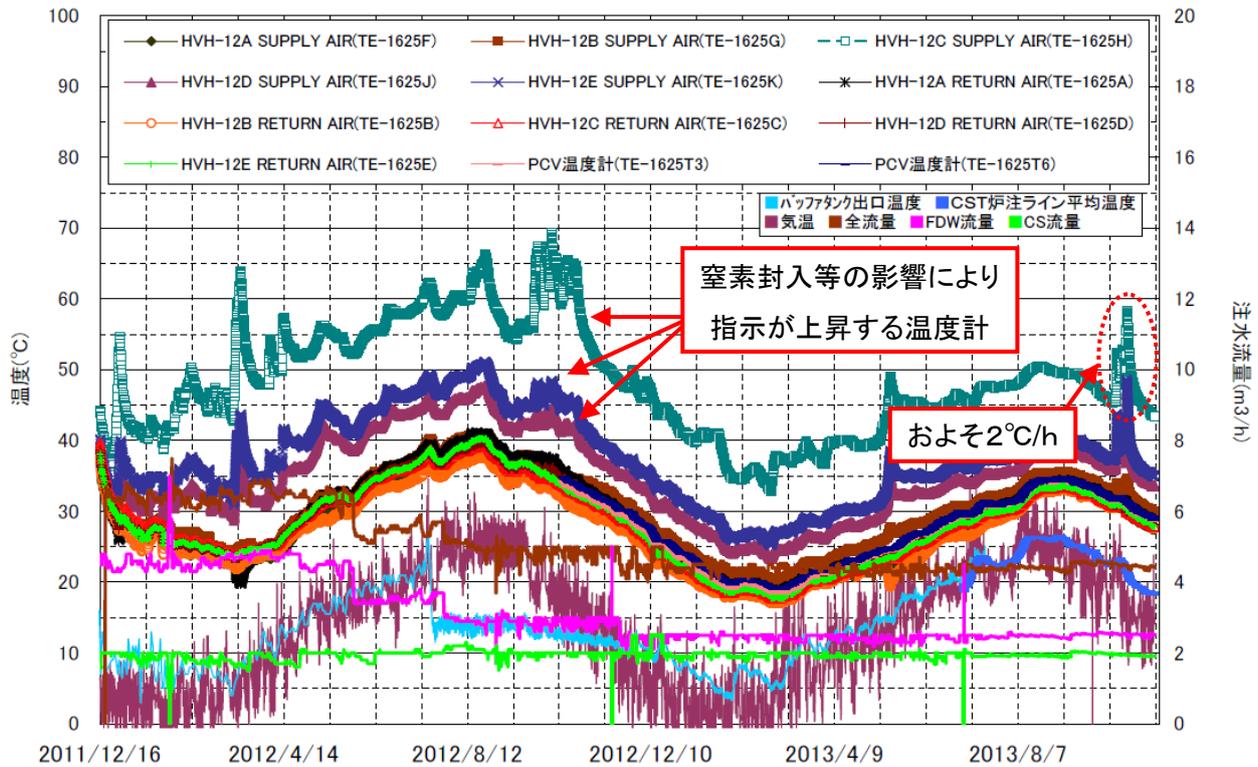
- 注水変更後, 時間遅れをもって緩やかに温度変化
 - 明確な温度上昇が確認できるまでおよそ10時間程度
 - その後およそ5日程度で温度は安定
- RPV底部温度と上部温度はほぼ同じ



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

1号機の温度応答の特徴(その3)

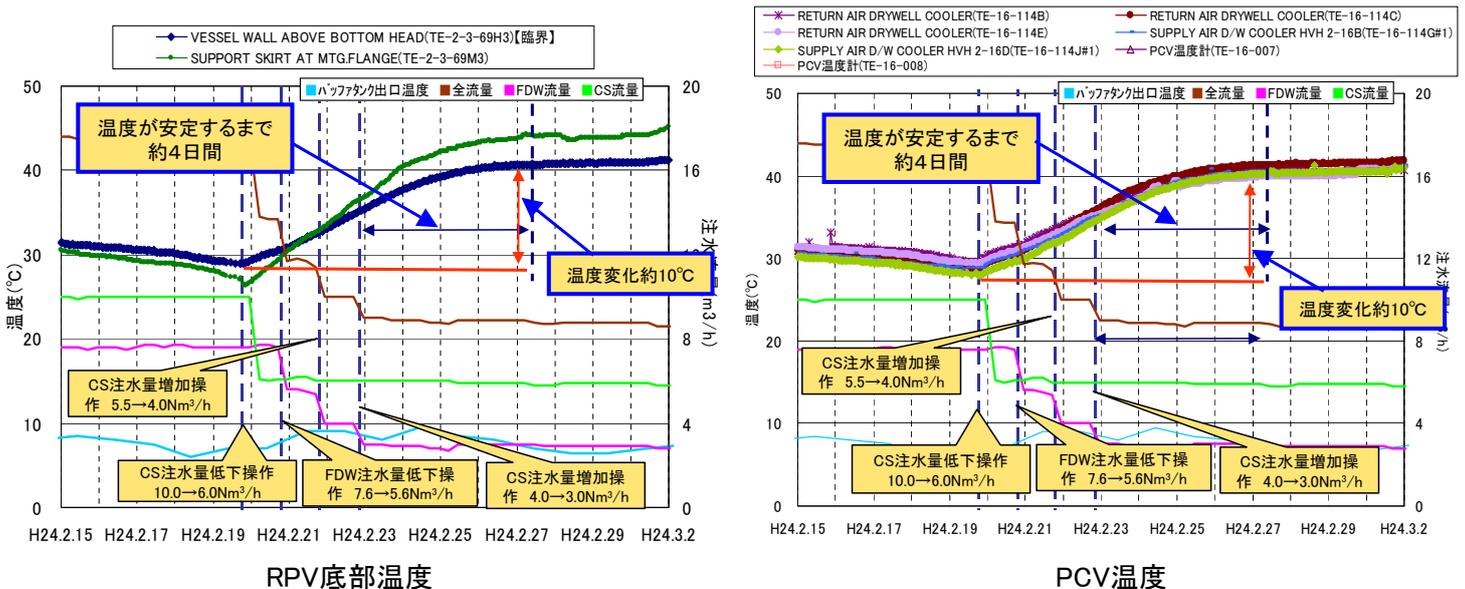


■ 1号では、注水によらず、窒素封入等の影響によって、一部のPCV温度計の指示の上昇が観測されている。

2号機の温度応答の特徴(その1)

【実績】平成24年2月 (RPV温度とPCV温度)

※ 注水温度は参考



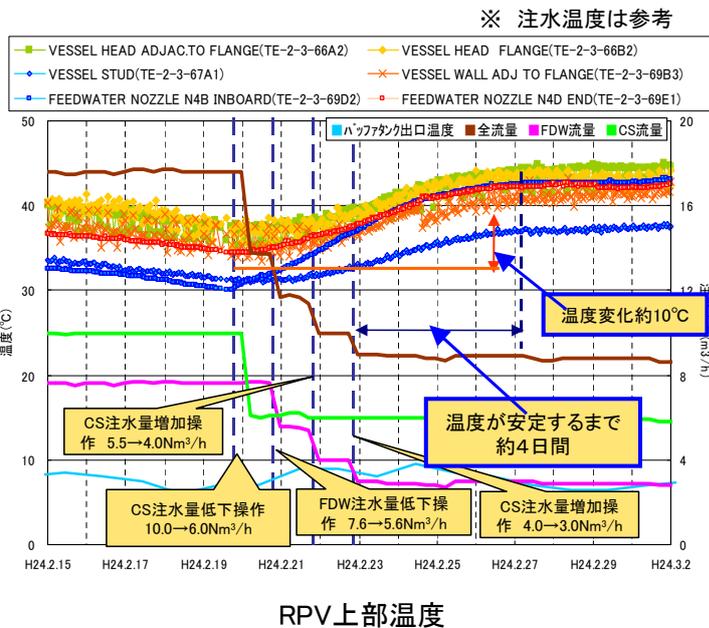
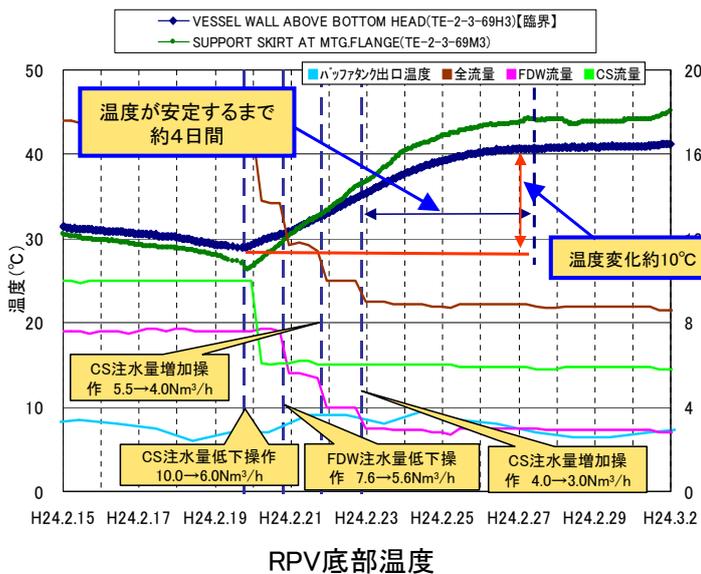
■ 注水変更後、時間遅れをもって緩やかに温度変化

- 注水変更後、比較的すぐに明確な温度上昇を確認
- その後およそ4日程度で温度は安定

■ PCV温度はRPV底部温度とほぼ同等

2号機の温度応答の特徴(その2)

【実績】平成24年2月(RPV温度)



※ 注水温度は参考

- 注水変更後、時間遅れをもって緩やかに温度変化
 - 注水変更後、比較的すぐに明確な温度上昇を確認
 - その後およそ4日程度で温度は安定
- RPV上部温度の一部は底部温度よりやや高く、応答もやや緩慢
(その中でも、給水ノズルの温度は比較的応答が早い)

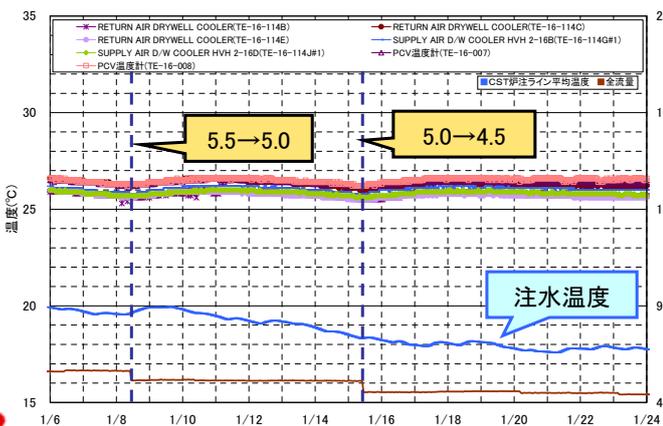
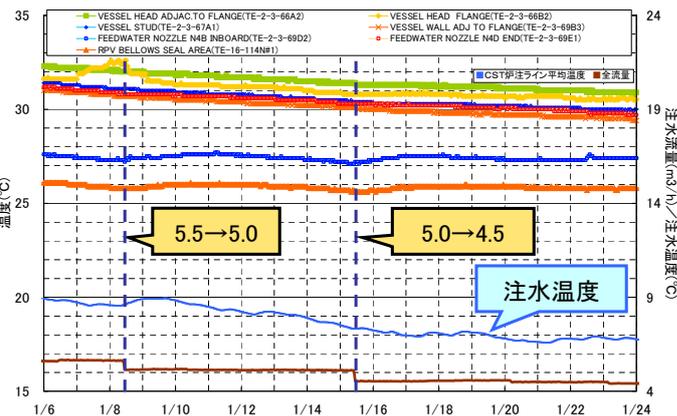
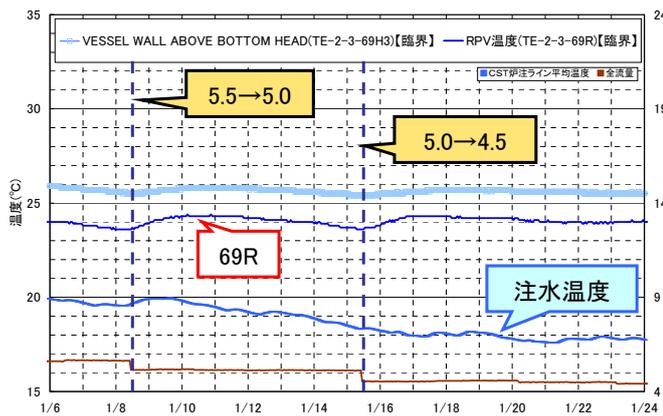


東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

2号機の温度応答の特徴(その3)

【実績】平成26年1月(RPV/PCV温度)



- 合計1m³/hの注水低減によって、急な温度上昇等の異常はなかった。
- 崩壊熱が減少している現在、熱バランスに応じた温度変化は、日常の変動幅と比較して大きくない。
- RPV底部温度のうち、TE-2-3-69Rは特に注水変更に対する応答が早い傾向。



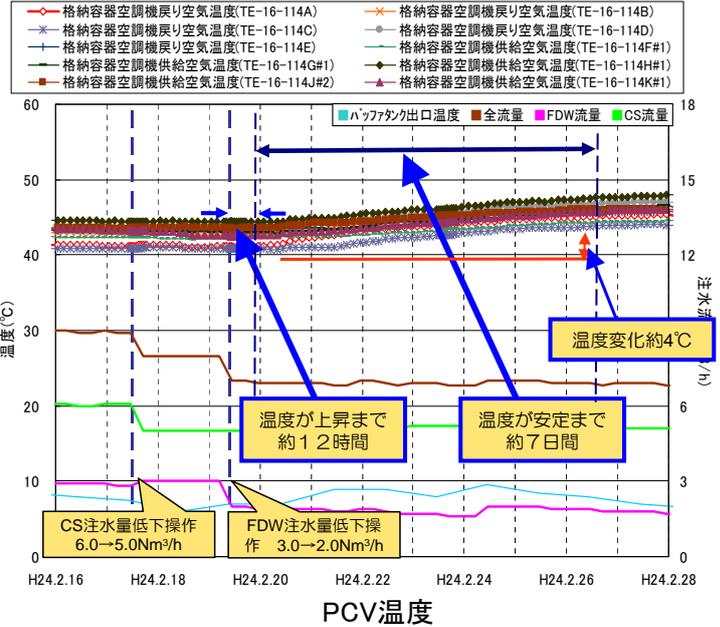
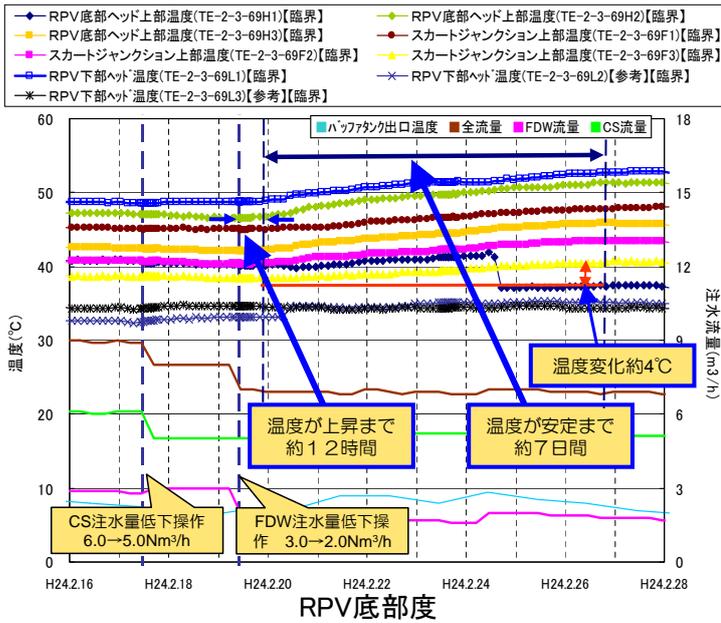
東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

3号機の注水変更と温度応答の特徴(その1)

【実績】平成24年2月

※ 注水温度は参考



- 注水変更後, 時間遅れをもって緩やかに温度変化
 - 明確な温度上昇が確認できるまでおよそ12時間程度
 - その後およそ7日程度で温度は安定
- RPV底部温度には温度分布があり, 一部はPCV温度より高い(概ね同等)



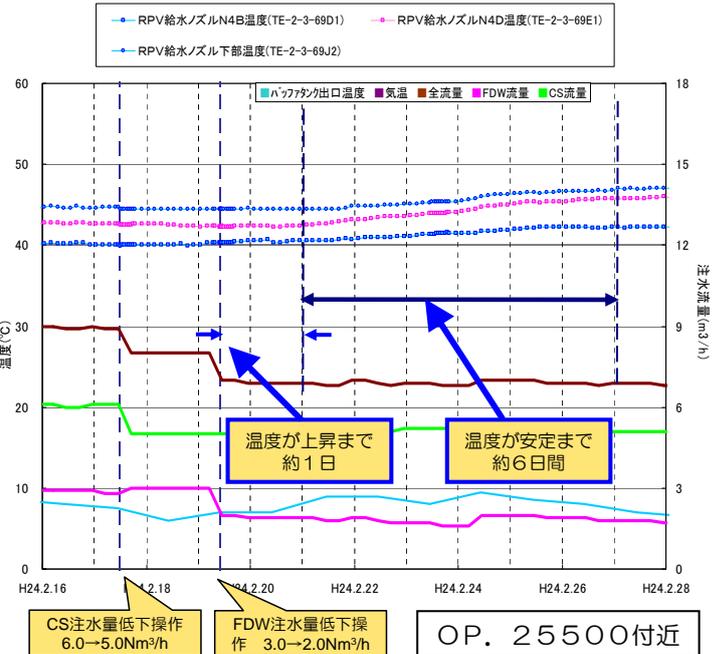
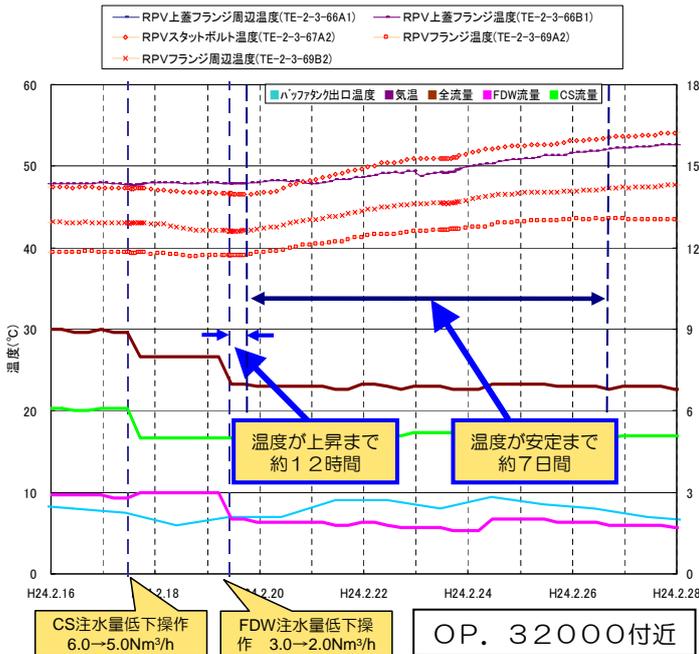
東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

3号機の注水変更と温度応答の特徴(その2)

【実績】平成24年2月

※ 注水温度は参考



- RPV上部温度の一部は底部温度よりやや高く, 応答もやや緩慢
(給水ノズル付近よりも, RPVフランジ部等の温度の方が温度上昇が早い)



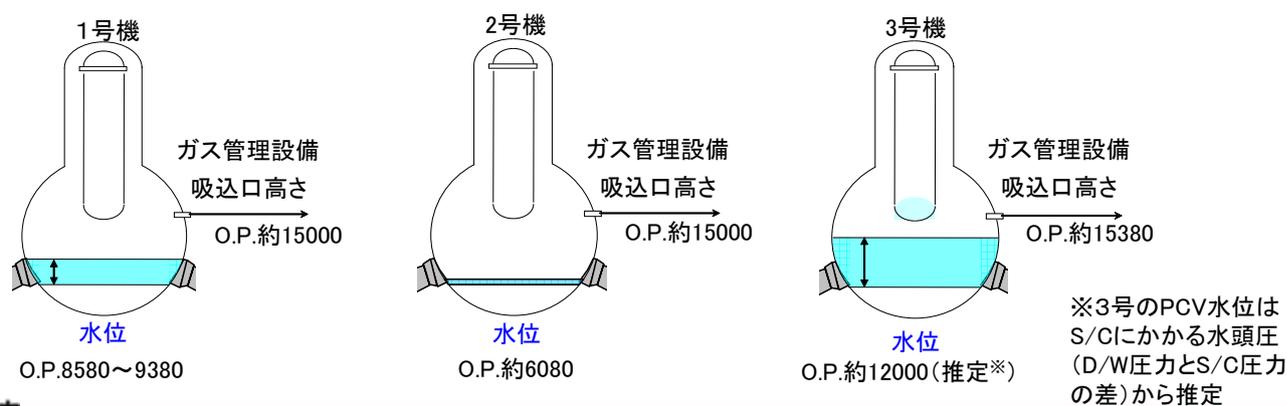
東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

推定結果(1)温度応答の時定数の違いについて

■温度変化の時間遅れを号機毎に比較すると、3号機が最も遅く、2号機が最も早い。

- 温度変化の時遅れは、炉内の水の入れ替わり速度に依っていると考え、3号機の炉内保有水量は多く、2号機は少ないと推定。これは、PCV水位の大小関係と合致。(3号>1号>2号)
- 2号機は、下鏡部(SLC配管)に設置したRPV底部温度計(69R)の温度応答が早いことから、RPV下鏡部にはほとんど水位はないと推定。
- 3号機は、RPV側の時間遅れも長いことから、RPV内にもある程度の保有水量があると推定。



推定結果(2)熱源の位置について

■温度データからは、1~3号機ともに、大部分の熱源がRPV内に存在すると推定可能

- [温度データ]2号機はRPV温度(TE-2-3-69R)の温度上昇がPCV側よりも早いことから、RPV底部に熱源が存在と推定。
- [温度データ]3号機は一部のRPV底部温度がPCV温度よりも高かった時期があることから、RPV底部に熱源が存在と推定。
(一部の熱源に水がかかる量が少なかった時期があると推定)

■上記推定は、これまでのMAAP解析結果などとは異なる部分もあり、今後の調査や検証が必要。

- [MAAP解析]1号機の炉心燃料の大部分がPCVに落下している結果もあり
→[温度データ]1号機は、これまでRPV底部温度が他より高くなっていないことから、RPV側に熱源がなく、PCV側から暖められていると考えることも出来る。
- [MAAP解析]2, 3号機についても解析の入力条件次第でPCV側にある程度の炉心燃料が落下するケースあり。

■2, 3号機はRPV上部にセシウムなどが付着して熱源になっていると推定

- [温度データ]一部のRPV上部温度がRPV底部より高いため、事故初期に放出された揮発性の核分裂生成物が上部構造材に付着して熱源となっていると推定

■温度データそのものに大きな不確かさがある

- 温度計指示値の信頼性が低下している場合、今回の推定結果に影響を与える場合がある。

まとめ

■過去実績から、以下の情報が得られた。

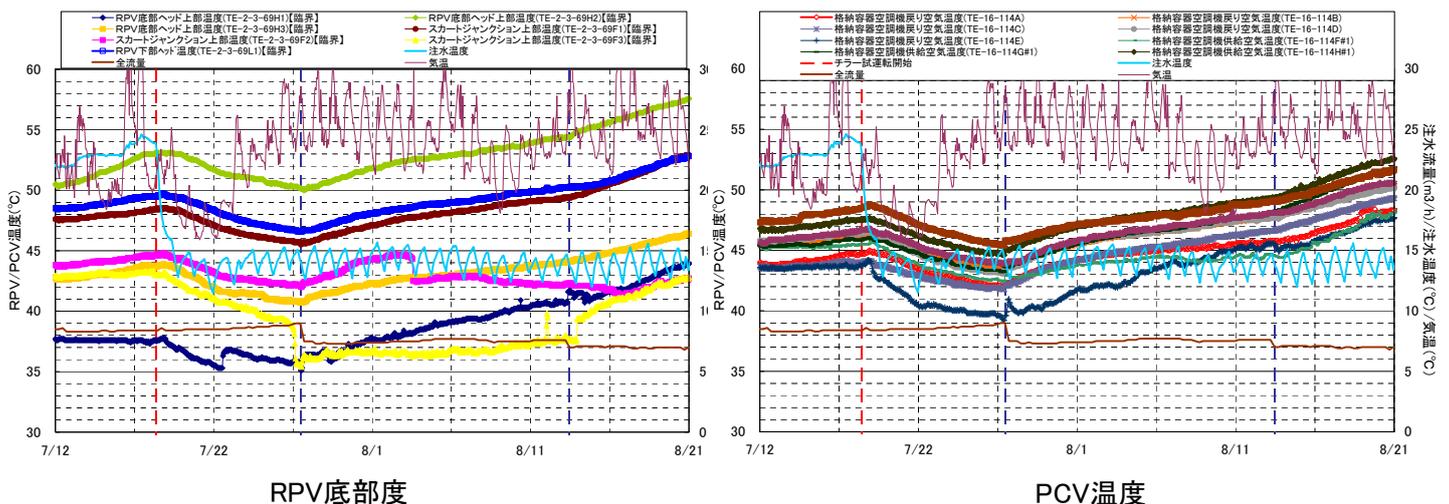
- (1)これまで、各号機の炉内温度は注水等に応じて、概ね想定通りの挙動。現在の崩壊熱は事故初期に比べ減少し、注水量の変更に伴う温度変化幅も小さくなっている。
- (2)温度応答速度の違いから、3号機は炉内保有水量が比較的多く、2号機は少ないと推定。
- (3)温度データからは大部分の熱源がRPVに存在すると推定可能だが、MAAP解析結果などと異なる部分もあり、調査や検証が必要。
- (4)温度計指示値の不確かさ(20℃)等も、別途考慮する必要がある。



- これまでも様々な注水変更を実施し、得られたデータから炉内の状況を推定。これまでと同等の試験だけでは、再実施の意義は低い。
- 新しい炉内情報の獲得は、PCV内水温測定、ペDESTAL調査など内部調査、MAAP解析等による事故検証など、別のアクションで取り組んでいく事とする。
- 今後の注水変更は、日常管理として温度データを蓄積し、想定される冷却状態に変化があった場合には、別途検証手段を検討することとする。

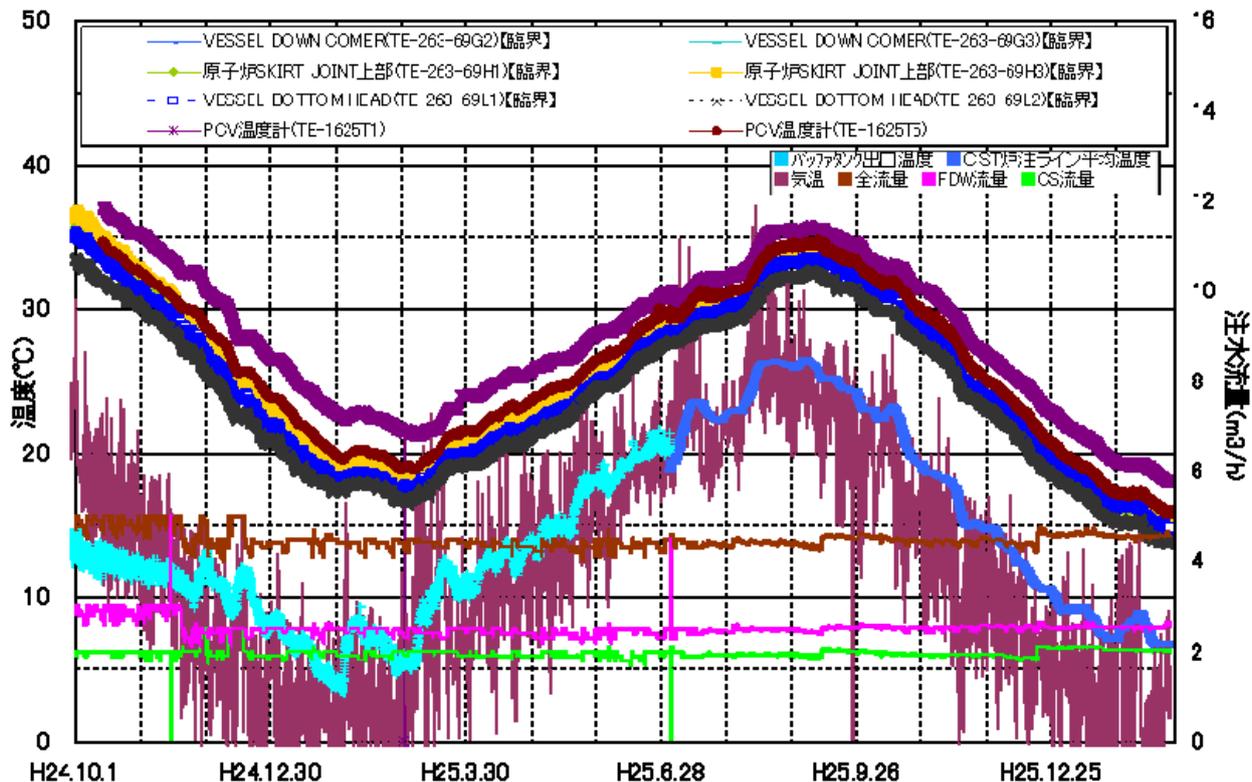
【参考】3号機 注水チラー導入時の温度応答

【実績】平成24年7月



■チラー導入により注水温度を低下させた際には、PCV側の温度の方が温度低下が早かった。

【参考】1号機 原子炉格納容器内の水温挙動



- RPV底部温度はPCV雰囲気気温度(T5)とほぼ同じ
- PCV内の水温(T1)雰囲気気温度(T5)よりやや高めを推移



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

【参考】注水変更の考え方

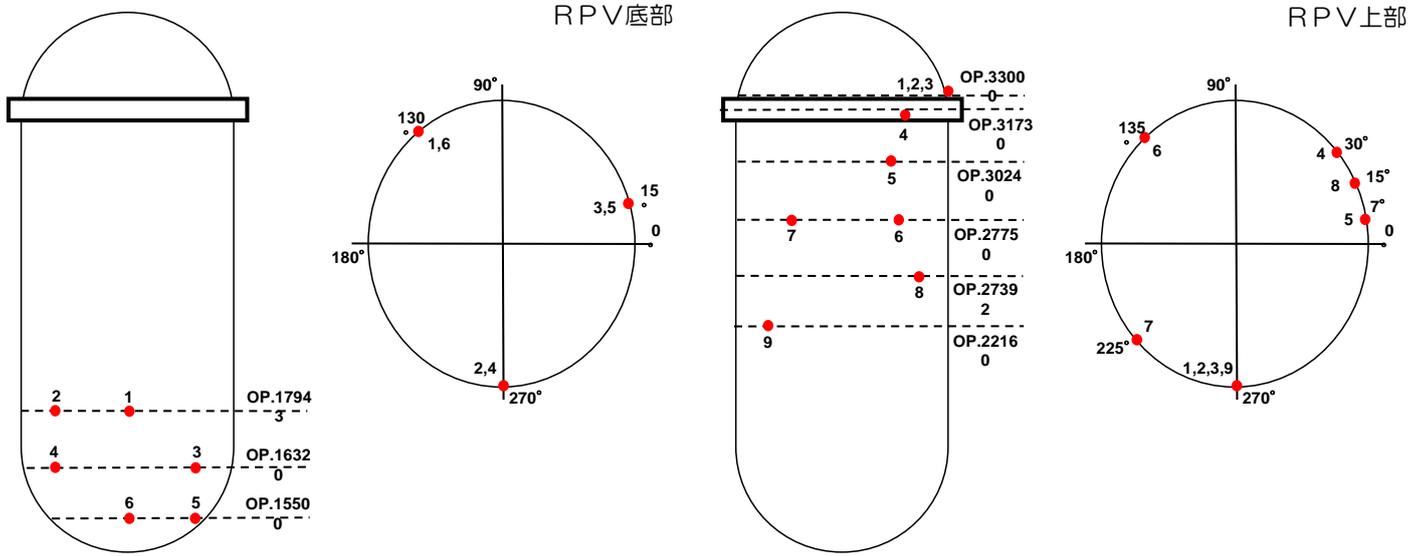
- 1～3号機とも、炉心スプレイ(CS)系、給水(FDW)系から原子炉压力容器(RPV)への注水により、安定的な冷却状態を維持。
- 注水量の1日の増加幅を $1\text{m}^3/\text{h}$ 以下とすることで、炉内への大きな反応度投入を制限し、急激に臨界に達するリスクを抑制。同時に、ガス管理設備により、短半減期希ガスの濃度を監視することで、原子炉が未臨界を維持していること(有意な臨界でないこと)を確認。
 - 炉心燃料の存在位置に関する情報は限定的であり、実際に炉内でどのように冷却され、未臨界が維持されているのか不明の部分が多い。
- 急な注水変更操作により、炉心燃料の位置の変化や冷却状態の変化があった場合には、以下の達成にリスクとなる場合があることを考慮し、慎重な判断が必要。
 - 安定した冷却状態の維持
 - 原子炉の未臨界の維持
- 現在の崩壊熱は、過去の注水変更時と比べると、 $1/2 \sim 1/3$ 程度となっており、現在の崩壊熱で $10\text{m}^3/\text{h}$ 程度に相当する注水変更は実施済み。
 - チラーの運用により、夏期であれば注水温度を大幅に変化させることが可能(2012年夏期に実施済)



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

【参考】1号機 温度計設置位置概略



No.	Tag. No.	サービス名称	高さ	方向
1	TE-263-69G2	VESSEL DOWN COMER	17943	130°
2	TE-263-69G3	VESSEL DOWN COMER	17943	270°
3	TE-263-69H1	原子炉 SKIRT JOINT 上部	16320	15°
4	TE-263-69H3	原子炉 SKIRT JOINT 上部	16320	270°
5	TE-263-69L1	VESSEL BOTTOM HEAD	15500	15°
6	TE-263-69L2	VESSEL BOTTOM HEAD	15500	130°

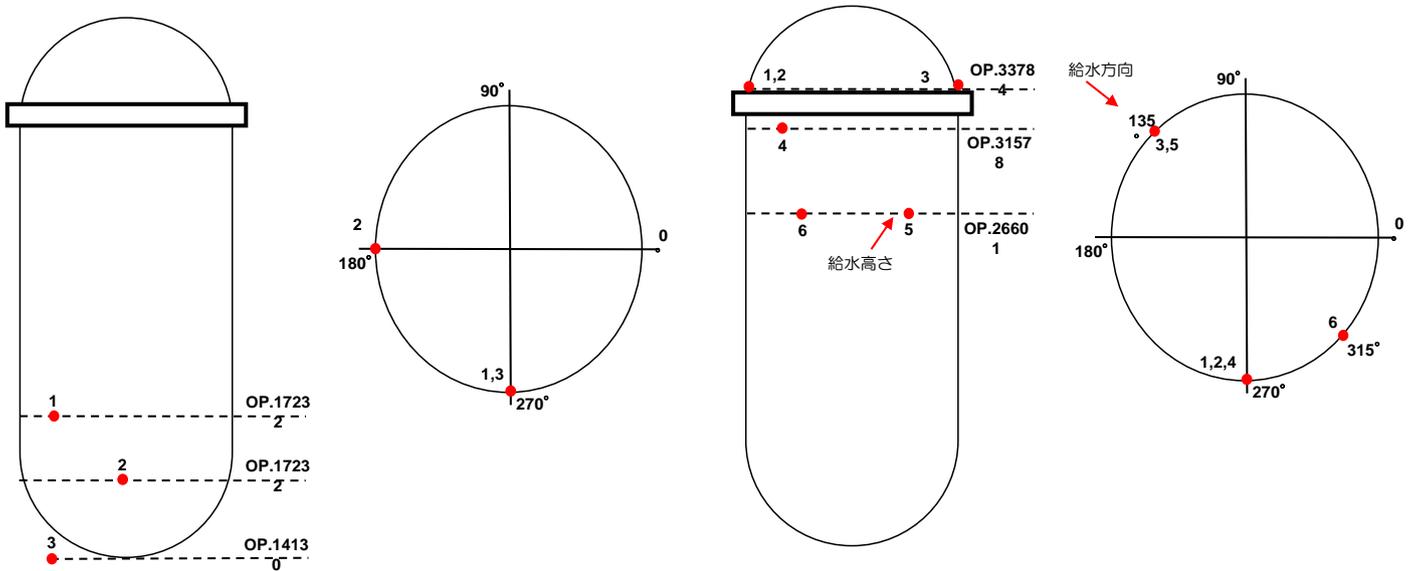
No.	Tag. No.	サービス名称	高さ	方向
1	TE-263-66A1	VESSEL HEAD,ADJAC.TO FLANGE	33000	270°
2	TE-263-66B1	VESSEL HEAD FLANGE	33000	270°
3	TE-263-67A1	VESSEL STUD	33000	270°
4	TE-263-69A1	原子炉フランジ	31730	30°
5	TE-263-69B1	原子炉蒸気	30240	7°
6	TE-263-69D1	N-4B ノズル END	27750	135°
7	TE-263-69E1	N-4C ノズル END	27750	225°
8	TE-263-69C1	VESSEL BELOW WATER LEVEL	27392	15°
9	TE-263-69F3	VESSEL CORE	22160	270°



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

【参考】2号機 温度計設置位置概略



No.	Tag. No.	サービス名称	高さ	方向
1	TE-2-3-69H3	VESSEL WALL ABOVE BOTTOM HEAD	17232	270°
3	TE-2-3-69R	RPV温度	16431	180°
2	TE-2-3-69M3	SUPPORT SKIRT AT MTG,FLANGE	14130	270°

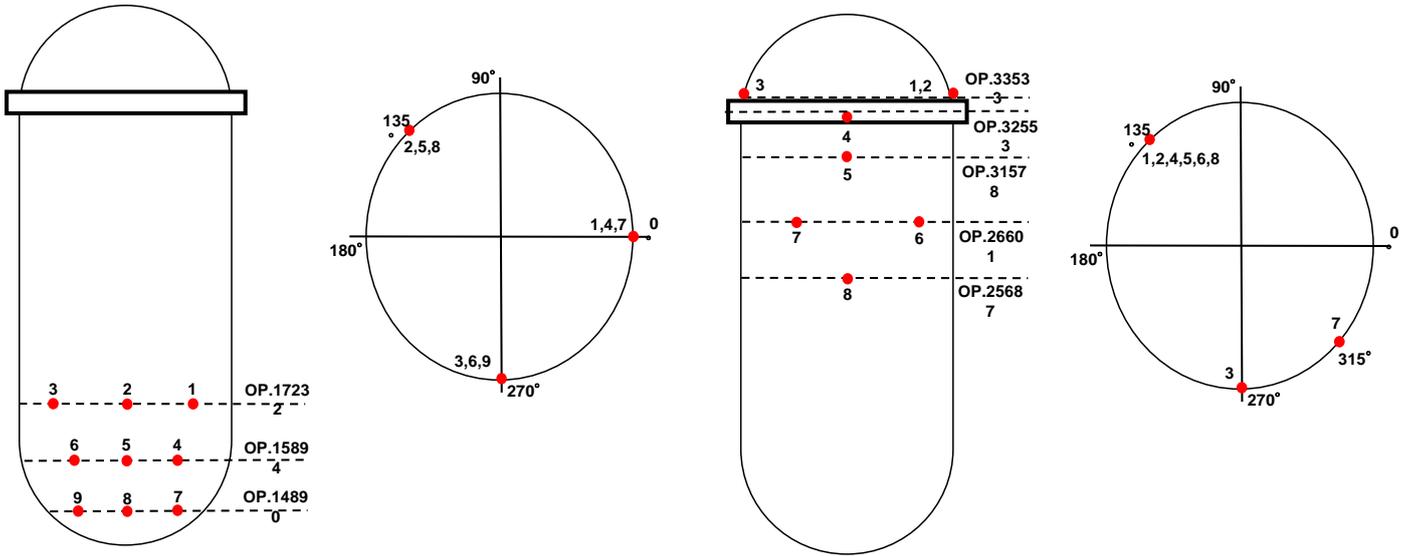
No.	Tag. No.	サービス名称	高さ	方向
1	TE-2-3-66A2	VESSEL HEAD,ADJAC.TO FLANGE	33784	270°
2	TE-2-3-66B2	VESSEL HEAD FLANGE	33784	270°
3	TE-2-3-67A1	VESSEL STUD	33784	135°
4	TE-2-3-69B3	VESSEL WALL ADJ TO FLANGE	31578	270°
5	TE-2-3-69D2	FEED WATER NOZZLE N4B INBOARD	26601	135°
6	TE-2-3-69E1	FEED WATER NOZZLE N4D END	26601	315°



東京電力

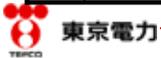
無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

【参考】3号機 温度計設置位置概略



No.	Tag. No.	サービス名称	高さ	方向
1	TE-2-3-69H1	RPV底部ヘッド上部温度	17232	0°
2	TE-2-3-69H2	RPV底部ヘッド上部温度	17232	135°
3	TE-2-3-69H3	RPV底部ヘッド上部温度	17232	270°
4	TE-2-3-69F1	スカートジャンクション上部温度	15894	0°
5	TE-2-3-69F2	スカートジャンクション上部温度	15894	135°
6	TE-2-3-69F3	スカートジャンクション上部温度	15894	270°
7	TE-2-3-69L1	RPV下部ヘッド温度	14853	0°
8	TE-2-3-69L2	RPV下部ヘッド温度	14666	135°
9	TE-2-3-69L3	RPV下部ヘッド温度	14893	270°

No.	Tag. No.	サービス名称	高さ	方向
1	TE-2-3-66A1	RPV上蓋フランジ周辺温度	33533	135°
2	TE-2-3-66B1	RPV上蓋フランジ温度	33533	135°
3	TE-2-3-67A2	RPVスタットボルト温度	33533	270°
4	TE-2-3-69A2	RPVフランジ温度	32553	135°
5	TE-2-3-69B2	RPVフランジ周辺温度	31578	135°
6	TE-2-3-69D1	RPV給水ノズルN4B温度	26601	135°
7	TE-263-69E1	RPV給水ノズルN4D温度	26601	315°
8	TE-263-69J2	RPV給水ノズル下部温度	25687	135°



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

【参考】主な注水量変更時温度挙動まとめ(1号機)

■ 1号機注水変更時の実績

※ 現在の崩壊熱 約0.14MW (注)注水流量の単位は「m³/h」

日付	全量		変化量	内容	崩壊熱※ (MW)	温度安定での 日数(①)	温度変化 (②)	一日あたりの 温度変化(①/②)
2011/10/28	3.8	↑	4.5	FDW増加	約0.53	6日	13°C	約2.2°C/日
2011/10/29	4.5	↑	5.5					
2011/10/30	5.5	↑	6.5					
2011/10/31	6.5	↑	7.5					
2011/11/18	7.5	↓	5.5	FDW低減	約0.49	5日	8°C	約1.6°C/日
2011/11/24	5.5	↓	5.0					
2011/11/26	5.0	↓	4.5					
2012/5/29	6.5	↓	5.5	FDW低減	約0.31	8日	2°C	約0.3°C/日
2012/7/27	5.7	↓	5.1	FDW低減	約0.28	7日	2°C	約0.3°C/日



東京電力

無断複製・転載禁止 東京電力株式会社

【参考】主な注水量変更時温度挙動まとめ(2号機)

■2号機注水変更時の実績

※ 現在の崩壊熱 約0.18MW (注)注水流量の単位は「m³/h」

日付	全量		変化量	内容	崩壊熱※ (MW)	温度安定での 日数(①)	温度変化 (②)	一日あたりの 温度変化(①/②)	
2011/11/24	10.1	↓	8.6	CS低減	約0.71	4日	5℃	約1.3℃/日	
2011/11/26	8.6	↓	7.5						-1.1
2011/12/10	7.5	↑	8.5	CS増加	約0.67	3日	6℃	約2.0℃/日	
2011/12/11	8.5	↑	9.0						0.5
2012/2/5	8.6	↑	9.6	FDW増加	約0.57	3日	10℃	約3.3℃/日	
2012/2/6	9.6	↑	10.6	1.0					
2012/2/7	10.5	↑	13.5	CS増加					
2012/2/11	13.5	↑	14.5	FDW増加					
2012/2/12	14.1	↑	17.4	CS増加					
2012/2/19	17.5	↓	13.5	CS低減					
2012/2/20	13.6	↓	11.6	FDW低減	約0.55	4日	10℃	約2.5℃/日	
2012/2/21	11.5	↓	10.0						-1.5
2012/2/22	10.0	↓	9.0						-1.0
2012/7/27	8.9	↓	7.5	FDW低減	約0.40	3日	2℃	約0.7℃/日	
2012/8/13	7.9	↓	7.0	CS低減	約0.39	5日	3℃	約0.6℃/日	

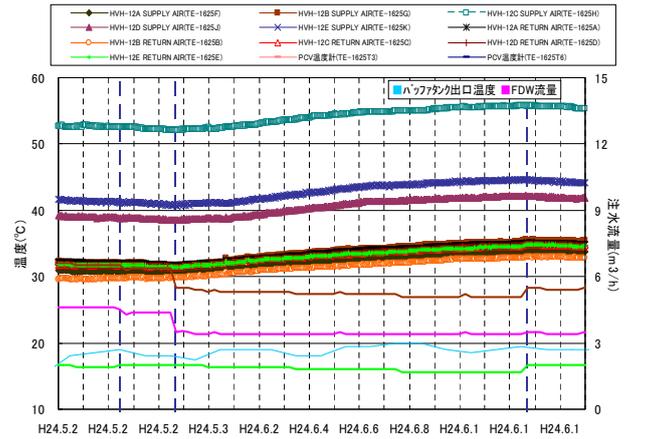
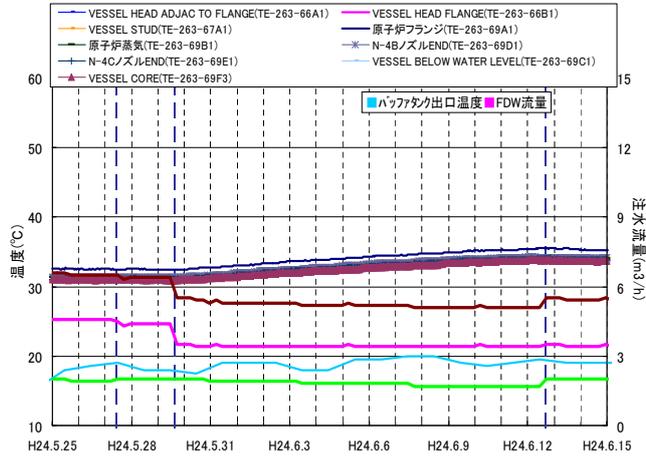
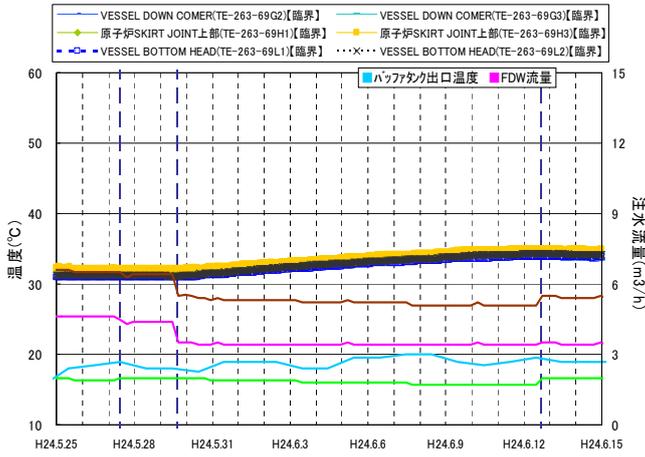
【参考】主な注水量変更時温度挙動まとめ(3号機)

■3号機注水変更時の実績

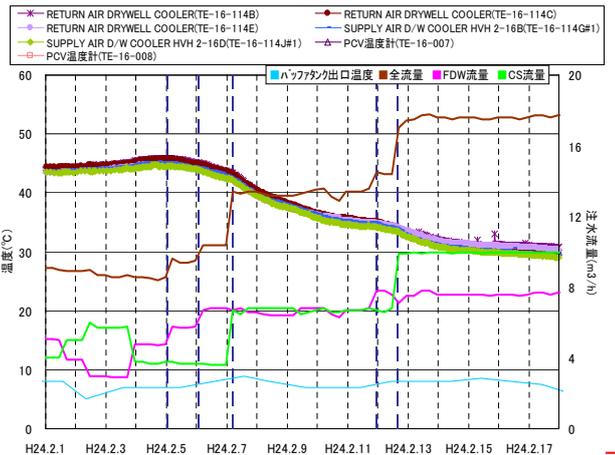
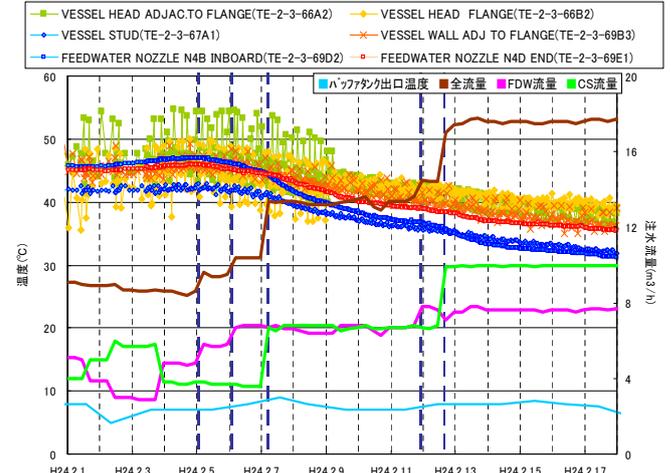
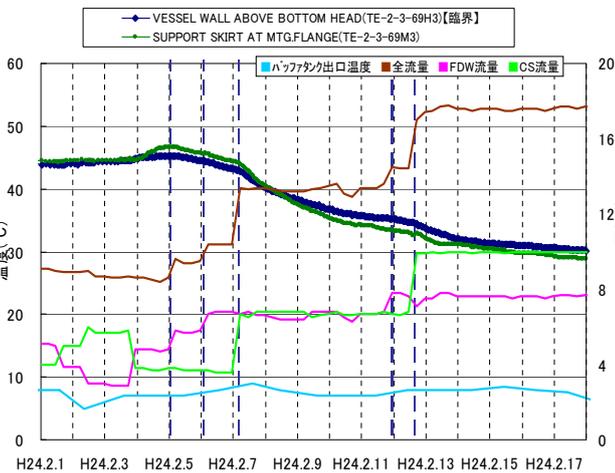
※ 現在の崩壊熱 約0.18MW (注)注水流量の単位は「m³/h」

日付	全量		変化量	内容	崩壊熱※ (MW)	温度安定での 日数(①)	温度変化 (②)	一日あたりの 温度変化(①/②)
2011/11/24	10.6	↓	9.0	CS低減	約0.72	6日	5℃	約0.8℃/日
2011/11/26	9.0	↓	8.0					
2012/2/17	8.9	↓	8.0	CS低減	約0.58	8日	4℃	約0.5℃/日
2012/2/19	8.0	↓	7.0	FDW低減				
2012/5/29	6.9	↑	7.9	FDW増加	約0.44	9日	4℃	約0.4℃/日
2012/7/27	9.0	↓	7.5	FDW低減	約0.39	10日	3℃	約0.3℃/日

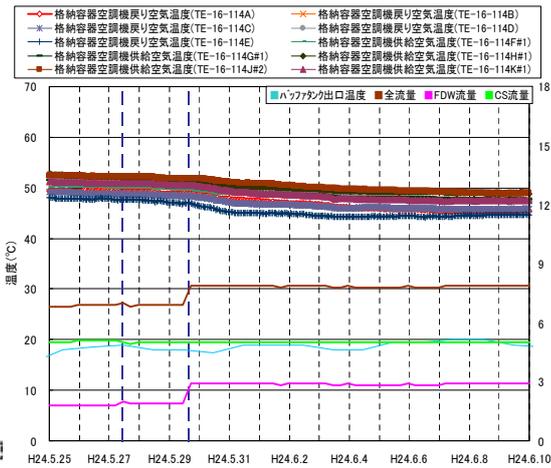
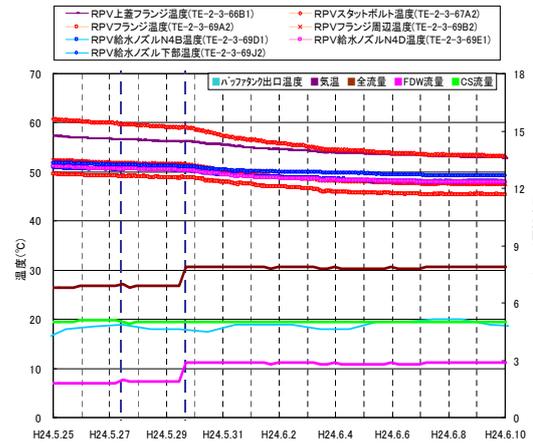
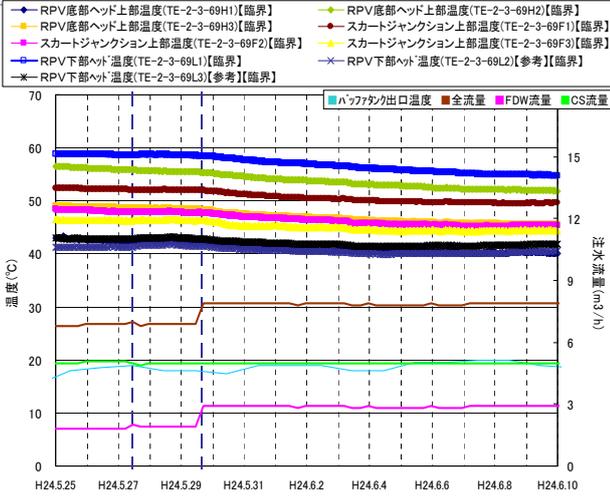
【参考】1号機 注水量変更時温度挙動(平成24年5月)



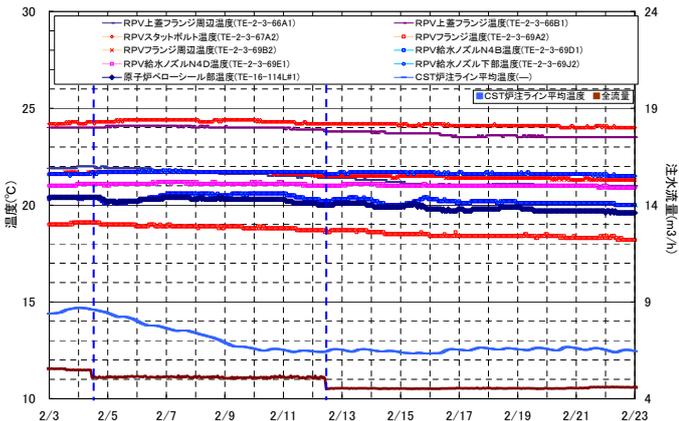
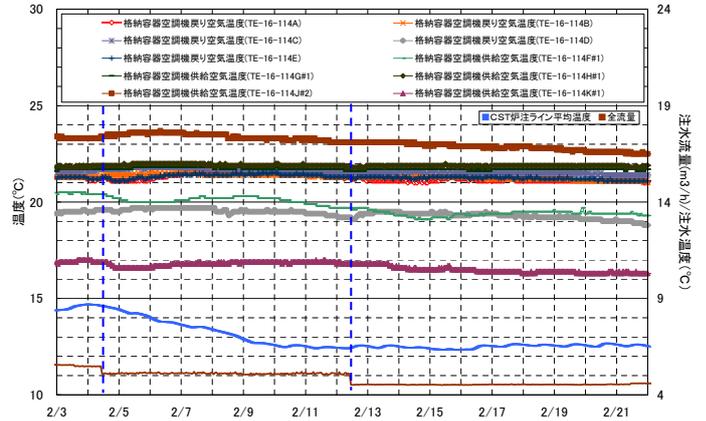
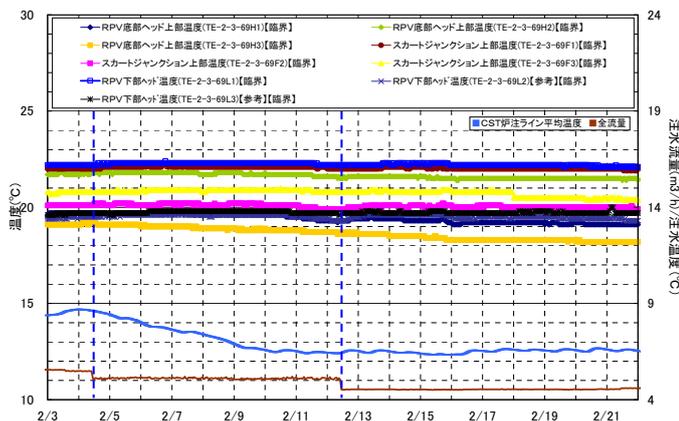
【参考】2号機 注水量変更時温度挙動(平成24年2月)



【参考】3号機 注水量変更時温度挙動(平成24年5月)

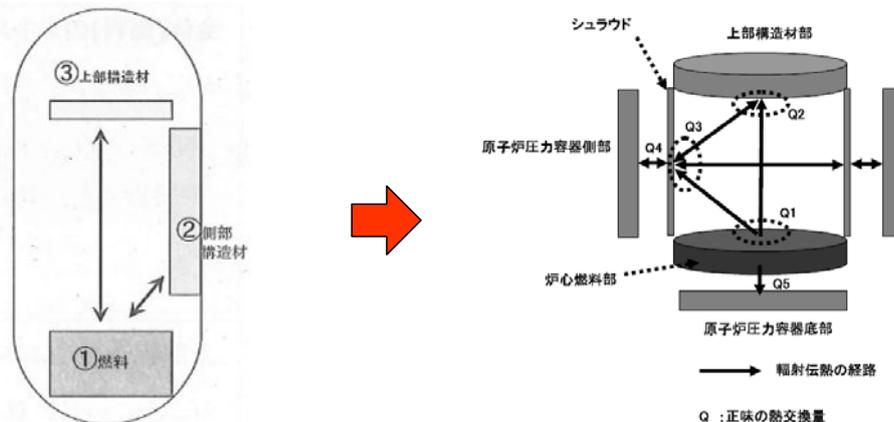


【参考】3号機 注水量変更時温度挙動(平成26年2月)



補足(1) 注水停止時の評価の保守性について

- 現在実施計画に記載している注水停止時の評価については、施設運営計画時の評価条件から、RPV構造材の配置をより現実的な条件に変更している。



■ その他の主な評価条件

- ①注水停止と同時に炉心燃料の露出を想定
- ②炉心燃料の初期温度は不確かさを考慮して150°Cと設定
- ③注水停止中の炉心燃料の除熱は、構造材への輻射のみを考慮し、系全体は断熱とする。

補足(2) 注水停止時の評価条件の検討

■ 注水停止と同時に炉心燃料の露出を想定

- 現在の1～3号機の炉心燃料は、いわゆる「掛け流し」状態で冷却しており、注水停止と同時に露出する熱源が存在する可能性が高い。
- 1, 2号機のPCV内には水位が確認されており、3号機はPCVだけでなくRPV内にも保有水がある可能性も推定されるが、RPVやPCVは事故により損傷しており、注水停止時には水位が喪失する可能性もある。

→保守側の条件ではあるが、保守性が著しく大きいとは言い難い。

■ 炉心燃料の初期温度を150°Cと設定

- 現状、炉内温度は概ね20～30°C程度(冬季)で、概ね均一であることから、炉心燃料表面温度も概ね同等程度である可能性※がある。

→夏季に炉内温度が上昇することを踏まえ、炉心燃料温度の初期温度を50°Cと設定すると炉心燃料が100°Cを超過するまでにおよそ3時間、注水停止12時間後の炉心燃料温度は凡そ230°C(実施計画記載330°C)と評価される。

■ 注水停止中の炉心燃料の除熱は、構造材への輻射のみを考慮し、系全体は断熱とする。

- 遮蔽コンクリートの断熱効果により、建屋への直接放熱効果は大きくない。
- 長時間にわたり注水停止する事象発生時には、窒素封入やガス排気など、他の設備も動作が期待出来ない可能性
- 現状のPCV内は強制対流によって除熱するだけに十分な換気を行っていない

→保守側の条件ではあるが、保守性が著しく大きいとは言い難い。

※ ただし、実際には炉心燃料位置の不確かさなどがあることから、実施計画記載の許認可にかかる安全評価としては保守的に考慮するものとする。